

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari d'Enginyeria Industrial, Energia

**Estudi comparatiu d'una central termosolar i
d'una central fotovoltaica a Andorra**

MEMÒRIA

Autor: Caballeria Terradellas, Roger
Padreny Carmona, Júlia

Directora: Pretel Sánchez, Maria del Carmen

Convocatòria: Gener 2021



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El següent projecte tracta del dimensionament i el disseny d'una central termosolar de cilindres parabòlics i d'una central fotovoltaica en un mateix emplaçament situat a Andorra, sent un dels objectius principals la comparació d'ambdues tecnologies per tal d'escollir la més adient per a l'emplaçament seleccionat.

Primerament, s'ha fet un estudi de les zones d'Andorra destinades a la producció d'energies renovables pel Ministeri de Medi Ambient per tal d'escollir la més adequada. Posteriorment, s'ha passat a fer el disseny i el dimensionament en paral·lel de les dues plantes tenint en compte les condicions mediambientals de la localització, la orientació i la inclinació del terreny, la radiació solar i les temperatures de l'emplaçament. A continuació, s'han fet els càlculs econòmics per tal d'obtenir paràmetres com la inversió inicial i el període de retorn de cada instal·lació. Finalment, s'ha realitzat la comparació valorant els diferents resultats energètics, econòmics i d'impacte ambiental de cadascuna de les centrals per tal de concloure quina d'elles és més adequada.

Com es veurà, la conclusió obtinguda és que la central més adient per a la ubicació seleccionada és la fotovoltaica, aportant una quantitat d'energia més elevada i amb una inversió inicial i un període de retorn més baixos.

Sumari

SUMARI	4
1. GLOSARI	9
2. PREFACI	10
2.1. Origen i motivació del projecte.....	10
3. INTRODUCCIÓ	11
3.1. Objectius i abast del projecte.....	12
4. SITUACIÓ ENERGÈTICA I ELÈCTRICA A ANDORRA	14
4.1. Contextualització i Marc Legal.....	14
4.2. Sistema energètic nacional.....	17
4.3. Sistema elèctric nacional.....	19
4.3.1. Consum elèctric.....	19
4.3.2. Producció elèctrica.....	21
4.3.3. Importacions.....	23
4.4. Energies renovables a Andorra.....	23
4.4.1. Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra (PSIEd'A).....	24
4.4.2. Potencial de les diverses fonts.....	26
4.4.2.1. Energia Solar Fotovoltaica.....	27
4.4.2.2. Hidroelèctrica.....	Error! Bookmark not defined.
4.4.2.3. Eòlica.....	28
4.4.2.4. Biomassa.....	28
4.4.2.5. Geotèrmica.....	29
4.4.3. Horitzó 2050.....	29
5. RADIACIÓ SOLAR	31
5.1. Tipus de radiació.....	32
5.2. Energia solar fotovoltaica.....	33
5.2.1. Tipus d'instal·lacions fotovoltaiques.....	33
5.2.1.1. Aïllades (OFF-GRID).....	34
5.2.1.2. Connectades a la xarxa (ON-GRID).....	36
5.2.1.3. Híbrides.....	37
5.2.2. Principals tecnologies de panells solars.....	38
5.2.2.1. Panells solars monocristal·lins.....	39
5.2.2.2. Panells solars policristal·lins.....	40
5.2.2.3. Panells solars amorfs (capa fina).....	40
5.3. Energia termosolar.....	41
5.3.1. Principals tecnologies de concentradors solars.....	41

5.3.1.1. Cilindres parabòlics	42
5.3.1.2. Concentradors lineals Fresnel.....	44
5.3.1.3. Central solar de torre central	45
5.3.1.4. Discs parabòlics	47
5.3.1.5. Taula Resum.....	49
6. ESTUDI PREVI	50
6.1. Requisits i consideracions del projecte	50
6.2. Emplaçament	50
6.3. Condicions meteorològiques.....	54
6.3.1. Programes utilitzats.....	54
6.3.1.1. Meteonorm	54
6.3.1.2. PVGIS	54
6.3.2. Irradiació	55
6.3.3. Temperatura	56
6.3.4. Vent	57
7. CENTRAL SOLAR FOTOVOLTAICA	58
7.1. Components d'una planta solar fotovoltaica	58
7.1.1. Mòduls fotovoltaics.....	58
7.1.1.1. Corba Tensió - Intensitat	59
7.1.1.2. Factors que afecten a les característiques del conjunt FV	60
7.1.2. Regulador i Bateries.....	61
7.1.3. Inversor	62
7.2. Disseny de la configuració tècnica	63
7.2.1. Panells fotovoltaics	63
7.2.2. Ubicació i ancoratge dels panells.....	66
7.2.2.1. Orientació i inclinació.....	66
7.2.2.2. Estructura d'ancoratge i col·locació dels panells	67
7.2.2.3. Incidència d'ombres	69
7.2.3. Número de panells.....	72
7.2.4. Inversor	73
7.2.5. Dimensionament del conjunt FV	75
7.2.5.1. Càlculs del conjunt	75
7.2.5.2. Característiques del conjunt	77
7.3. Modelització de la instal·lació FV	79
7.3.1. PVsyst.....	79
7.3.2. Simulació del disseny del projecte	79
7.4. Resultats.....	82
7.4.1. Resum del Parc Solar	82
7.4.2. Resum de les característiques del conjunt FV	84

7.4.3.	Resultats principals	85
7.4.4.	Diagrama de pèrdues	89
7.5.	Anàlisi econòmic	91
7.6.	Estudi ambiental	94
8.	CENTRAL TERMOSOLAR AMB CONCENTRADORS CILÍNDRICS PARABÒLICS	97
8.1.	Parts més importants del la central termosolar.....	97
8.1.1.	Camp solar	97
8.1.1.1.	Col·lector solar	97
8.1.1.2.	Tub Receptor	99
8.1.1.3.	Sistema d'emmagatzematge.....	101
8.1.2.	Bloc de potència	102
8.1.2.1.	Generador de vapor	103
8.1.2.2.	Turbina de vapor	104
8.1.2.3.	Condensador.....	104
8.1.2.4.	Reescalfador	104
8.1.2.5.	Desgasificador	105
8.1.2.6.	Preescalfador	105
8.2.	Dimensionament de la planta	105
8.2.1.	System Advisor Model (SAM)	105
8.2.1.1.	Mòdul del camp solar	106
8.2.1.2.	Mòdul del col·lector solar.....	108
8.2.1.3.	Mòdul del tub receptor.....	109
8.2.1.4.	Mòdul del cicle de potència	110
8.2.1.5.	Mòdul d'emmagatzematge tèrmic	110
8.2.1.6.	Mòdul de costos	111
8.2.2.	Elecció i justificació dels paràmetres de la central	112
8.2.2.1.	Fluids caloportadors	112
8.2.2.2.	Elecció i paràmetres del Col·lector solar	115
8.2.2.3.	Elecció i paràmetres del tub receptor	117
8.2.2.4.	Configuració del camp solar	119
8.2.2.5.	Múltiple solar òptim	123
8.2.2.6.	Dimensionament del sistema d'emmagatzematge.....	125
8.2.2.7.	Caldera auxiliar	127
8.2.2.8.	Cicle de potència.....	128
8.3.	Resultats	130
8.4.	Anàlisi econòmic	134
8.5.	Estudi ambiental	137
9.	COMPARACIÓ ENTRE LA CST I LA FV	138

9.1. Producció elèctrica	138
9.2. Estudi econòmic	140
9.3. Impacte ambiental	141
CONCLUSIONS	142
AGRAÏMENTS	145
BIBLIOGRAFIA	146
ANNEX	149

1. **Glosari**

PEEA: Pla estratègic de l'energia

FEDA: Forces elèctriques d'Andorra

PSIEd'A: Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra

CTRASA: Centre de Tractament de Residus d'Andorra

Litecc: Llei d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic

CFG: Compagnie Française de Géothermie

CSP: Concentring Solar Power

CST: Central Solar Tèrmica

FV: Fotovoltaic/a

LCOE: Levelized Cost Of Energy

LCE: Emissions del Cicle de Vida

2. Prefaci

2.1. Origen i motivació del projecte

Aquest projecte neix a partir de l'interès cap a un món més sostenible i per tant, la inquietud que existeix avui en dia sobre la contaminació global. Així doncs, es va decidir estudiar més a fons la utilització de mètodes nets de generació elèctrica. Aprofitant la relació laboral d'un dels autors del TFM amb una empresa andorrana i considerant la voluntat del govern del Principat d'incrementar la generació autòctona d'electricitat a partir de fonts d'origen renovable, es va optar per realitzar un estudi centrat en tecnologies solars donat que el país compta amb molt recurs solar que actualment no s'està explotant. Finalment, s'ha trobat especialment interessant fer un estudi comparatiu de dues tecnologies solars diferents: una central termosolar de concentració i una central fotovoltaica. La raó fonamental és que mai s'ha fet un estudi d'aquest tipus a Andorra que permeti recolzar la decisió del govern d'apostar per la solar fotovoltaica.

3. Introducció

La història de la civilització humana ha estat íntimament lligada a la cerca permanent de fonts energètiques i les seves formes d'aprofitament, situant l'energia com un vector del procés evolutiu de les societats.

Actualment, l'energia és un factor essencial en el desenvolupament de l'economia a totes les escales, condicionant l'estructura i funcionament de tota societat moderna. Tant el seu cost econòmic com la seguretat i fiabilitat de subministrament són elements fonamentals per a l'economia, que afegits a les externalitats que el seu ús provoca sobre el medi ambient i la societat, aporten una idea del paper cabdal que juga la política energètica en el progrés d'un país.

La connexió entre consum energètic, desenvolupament econòmic i medi ambient, s'ha convertit en un tema candent de l'agenda política global. Es poden resumir en tres els grans focus d'atenció en política energètica, motivats per la insostenibilitat del model actual: l'esgotament dels combustibles fòssils i particularment del petroli, la seguretat d'abastiment d'energia i l'escalfament global provocat en gran mesura per les emissions de CO₂ provinents de la combustió de combustibles fòssils.

La situació energètica a Andorra està molt lligada a la dinàmica del seu entorn però inclou alguns aspectes rellevants degut a les particularitats del país que el fan altament vulnerable en termes de seguretat energètica. Entre aquests factors hi destaca per damunt de tot, l'alta dependència exterior. Un altre aspecte que condiona la política energètica del país és l'adhesió l'any 2011 al Conveni de marc de les Nacions Unides i el posterior compromís de reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH) en un 37% l'any 2030 respecte a l'escenari de referència.

La forta dependència energètica de l'exterior juntament amb la demanda energètica en continu creixement anual, el risc de saturació de les línies d'importació elèctrica, l'augment constant dels preus dels carburants i de les tarifes elèctriques, la necessitat d'integrar la política energètica a la resta de polítiques sectorials i la voluntat del compliment de les directrius energètiques europees van motivar l'elaboració del Pla Estratègic de l'Energia i seguidament el Llibre Blanc de l'Energia [33].

La creixent demanda energètica i els diferents problemes generats sobre el mediambient,

han creat en l'última dècada un interès general en la investigació i implementació de mètodes de generació d'energia elèctrica a partir de recursos renovables, que tinguin un impacte ecològic mínim. Atenent a aquesta preocupació les energies renovables que utilitzen radiació solar com energia primària (Termosolar i Fotovoltaica), per a la generació d'energia elèctrica, han sorgit com una alternativa important per contrarestar aquest problema.

És per això que en aquest projecte s'ha optat per la utilització d'aquestes energies i fer-ne un estudi comparatiu, i així poder tenir una idea de quina és la millor alternativa pel país.

Per tal d'aconseguir això, el cos del treball es divideix en tres blocs diferenciats. El primer d'ells és un bloc teòric on s'ha explicat els objectius del treball, la situació energètica del país dels últims anys i els conceptes bàsics per entendre el funcionament de les centrals solars. Seguidament, s'ha entrat al segon bloc de dimensionament de les centrals. S'ha començat explicant els requisits de disseny que han de complir totes dues centrals, i s'ha seguit amb els capítols 7 i 8 on s'ha fet el dimensionament de la central fotovoltaica i de la central termosolar. Pels dimensionaments s'ha utilitzat el software PVSyst per a la fotovoltaica i el SAM per la termosolar. A part, també s'han utilitzat els programes PVGIS i Meteonorm per l'obtenció de les dades meteorològiques necessàries. Finalment a l'últim bloc, s'han extret els resultats obtinguts, s'ha fet la comparació d'aquests i s'han obtingut les conclusions.

3.1. Objectius i abast del projecte

L'objecte principal d'aquest projecte és el disseny i dimensionament preliminar d'una central termosolar i d'una central fotovoltaica en un mateix emplaçament per tal de veure quina és la més adient per a la zona seleccionada. Així doncs, es disposarà de la mateixa superfície i de les mateixes condicions ambientals. A més a més, es comercialitzarà l'electricitat seguint la mateixa legislació vigent.

D'aquesta manera, el projecte es pot desglossar en els següents objectius:

- Seleccionar l'emplaçament més adient per a aquest tipus de centrals.
- Avaluar els recursos solars energètics disponibles a l'emplaçament.
- Avaluar les necessitats energètiques del país on es farà la instal·lació.
- Dimensionar i dissenyar una planta solar tèrmica de cilindres parabòlics amb el propòsit de maximitzar el rendiment.

- Dimensionar i dissenyar una central fotovoltaica amb el propòsit de maximitzar el rendiment.
- Comparar les dues tecnologies amb els seus resultats energètics, econòmics i mediambientals.
- Escollir la tecnologia més adient per la localització tenint en compte tots els paràmetres energètics, econòmics i mediambientals.

4. Situació energètica i elèctrica a Andorra

La situació energètica d'Andorra es caracteritza per una dependència gairebé total de l'exterior (>95%), bàsicament de França i d'Espanya, i una alta supeditació als combustibles fòssils, un recurs finit i subjecte a una alta volatilitat tant en preu com en disponibilitat.

En el cas de l'energia elèctrica, tan sols una mica més del 15% de la demanda nacional és generada de forma autòctona i, majoritàriament a partir de l'energia hidroelèctrica.

Per aquesta raó el Govern d'Andorra va elaborar el primer *Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra [1]*, en el qual es recullen reflexions i propostes d'accions per implantar un nou model energètic, en el que es cerqui la garantia del subministrament energètic del país en condicions sostenibles des del punt de vista mediambiental, sense oblidar l'aspecte econòmic, és a dir, la necessitat d'assolir uns costos de l'energia compatibles amb el desenvolupament del Principat.

Així doncs, en aquest capítol s'ha contextualitzat la situació energètica actual d'Andorra. S'ha analitzat el sistema energètic i elèctric dels últims anys, s'ha estudiat lleugerament el potencial dels recursos disponibles del territori andorrà i s'han presentat les accions futures a curt i llarg termini proposades pel Govern andorrà amb l'objectiu de transformar el model energètic pel 2030 i 2050.

4.1. Contextualització i Marc Legal

En primer lloc, l'any 2005, en el Pla estratègic de l'energia (PEEA) 2006-2015, es va realitzar un estudi orientatiu de quina seria la política energètica nacional fins al 2015. Aquest, definia un conjunt d'eixos estratègics per contribuir a disminuir la intensitat energètica del país, afavorir l'eficiència i impulsar les energies renovables. Els eixos del Pla estratègic de l'energia, plasmats en el Pla d'eficiència energètica i el Pla d'energies renovables, eren els següents:

- Millorar l'eficiència en l'ús de l'energia.
- Diversificar les fonts d'energia.
- Construir i modernitzar les infraestructures que garanteixen la seguretat d'abastament.

- Impulsar les energies renovables.
- Promoure la qualitat dels serveis energètics.
- Impulsar la recerca i la gestió del coneixement.
- Sensibilitzar i conscienciar els ciutadans.
- Rol exemplar de l'Administració.
- Lluitar contra la contaminació atmosfèrica i el canvi climàtic.
- Incrementar la capacitat de reacció i adaptació del Pla a la conjuntura internacional i les noves tecnologies.

Més concretament, el Pla d'energies renovables preveia que s'impulsés la producció d'aigua calenta sanitària a través de panells solars, que s'elaborés un estudi d'increment de la producció geotèrmica en centres urbans d'importància mitjana i que es fomentés la implantació d'altres energies renovables, com la biomassa, l'eòlica i l'energia solar.

Per tal de donar resposta a aquest replantejament energètic, l'any 2010 es va aprovar la Llei 93/2010, del 16 de desembre, de mesures de promoció econòmica i social, i de racionalització i optimització dels recursos de l'Administració, que preveu la creació d'un programa de rehabilitació d'edificis, per tal d'incentivar-la en quant a eficiència o estalvi energètics, el qual va més enllà de l'anterior Llei 31/2008, del 18 de desembre, de mesures de reactivació econòmica, que preveia l'exempció dels gravàmens sobre les obres de rehabilitació amb actuacions d'eficiència energètica. Així mateix, aquesta Llei defineix les empreses de serveis energètics i els seus objectius, i crea l'obligació per part del Govern de desenvolupar els reglaments necessaris per tal de regular les prestacions energètiques dels edificis de nova construcció, les ampliacions i reformes, la instal·lació de diverses fonts d'energies renovables, així com la reglamentació d'un model de classificació energètica dels edificis.

Una altra finalitat de l'esmentada Llei 93/2010, és també l'incentiu per a la implantació de les energies renovables a través de la creació d'un programa que inclou ajuts econòmics per aquests sistemes de producció energètica.

El mateix any 2010, la Llei 85/2010, del 18 de novembre, de mesures provisionals en relació al règim de l'energia elèctrica s'aprova amb l'objectiu de facilitar l'adopció de polítiques de diversificació de les fonts de producció energètica, de reducció de la dependència energètica

i de potenciació de les energies renovables. Amb aquests objectius la Llei amplia l'objecte de les Forces Elèctriques d'Andorra (d'ara en endavant, FEDA) a les activitats de cogeneració i, permet la instal·lació de panells fotovoltaics de petita potència, així com la possibilitat de promoure instal·lacions de producció elèctrica mitjançant l'aprofitament de fonts d'energia d'origen renovable a tot tipus de promotors fins a una potència de 500 kW, entre d'altres mesures.

Per contextualitzar, FEDA és una de les empreses més importants del principat d'Andorra. Està lligada als organismes públics del país i és l'encarregada del subministrament elèctric i de la planificació estratègica sobre les necessitats energètiques.

L'any 2012 es va aprovar el Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra [1]. Aquest, tenia com a objectiu l'impuls d'un nou model energètic més sostenible, mantenint la competitivitat dels preus de l'energia. Entre les accions previstes en aquell document es destaquen les següents:

- Potenciar al màxim l'aprofitament dels recursos renovables d'Andorra (per reduir la dependència energètica i les emissions de carboni). Segons les accions previstes al Llibre blanc, les energies renovables cobriren aproximadament el 30% de la demanda elèctrica del país.
- Fomentar l'elaboració de projectes de cogeneració amb gas natural i distribució d'aigua calenta per xarxes públiques (per diversificar les fonts d'energia, millorar l'eficiència, reduir emissions i incrementar la producció elèctrica dins d'Andorra, i reduir el risc de saturar les línies de transport).
- Incrementar al màxim la capacitat d'importació d'electricitat finalitzant les obres projectades a la xarxa.

Més tard, al 2018 s'aprova el Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra (d'ara en endavant PSIEd'A), l'eina urbanística que permet identificar i ubicar l'ocupació de les infraestructures energètiques al Principat, de manera que contribueixi a l'ordenació del territori sense comprometre el creixement futur dels nuclis urbans i l'aprofitament urbanístic dels propietaris, i busca sempre el millor aprofitament del potencial energètic identificat.

Finalment, al 2018 com a resposta del PSIEd'A, es va aprovar la Llei 21/2018, del 13 de setembre, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc). Aquesta, impulsa la transició cap a un nou model energètic basat en l'ús d'energies renovables i d'energia baixa

en emissions de carboni. Amb tot, els principals objectius que aquesta Llei defineix són:

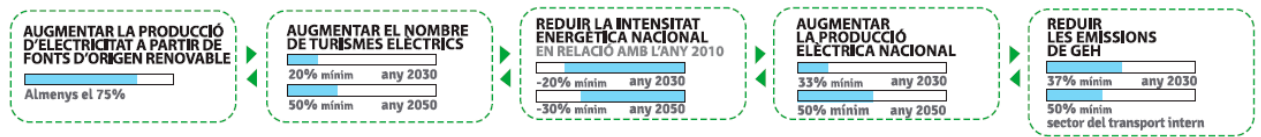


Figura 4.1. Objectius de la Llei LITECC [9].

Es pot veure com els pilars de la normativa i les polítiques del nou model energètic representades a les Figura 4.1 són:

- La millora de l'estalvi i l'eficiència energètica.
- L'augment de la producció energètica nacional i la diversificació de la producció energètica, mantenint la competitivitat dels preus de l'energia.
- La reducció de la dependència energètica exterior.
- La reducció, a escala internacional, de les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH).

4.2. Sistema energètic nacional

El consum energètic nacional mitjà del període 2006-2016, sense tenir en compte el sector del transport, és d'aproximadament 1.180 GWh a l'any. D'aquest total, un 47,6% del consum correspon a energia elèctrica i el 52,4% del consum restant a energia tèrmica essencialment procedent dels combustibles fòssils. El desenvolupament de l'activitat socioeconòmica del país depèn estretament de la seguretat en l'abastament energètic. Actualment, s'importa el 83% de l'electricitat i pràcticament el 100% de l'energia tèrmica i de la necessària per al transport, proporcionada en la pràctica totalitat per combustibles fòssils.

En el diagrama de la Figura 4.2, es mostra el flux d'energia del sistema energètic d'Andorra. Pot apreciar-se com Andorra importa directament fonts secundàries d'energia provinents d'Espanya i França. En el cas de l'electricitat, és importada pràcticament a parts iguals d'un i altre país, amb un mix elèctric altament polaritzat per l'energia nuclear en el cas de França i més diversificat a Espanya. D'altra banda, els hidrocarburs són importats principalment d'Espanya en forma de gasoil, gasolina, fuel domèstic i en molt petita mesura, gas butà i propà.

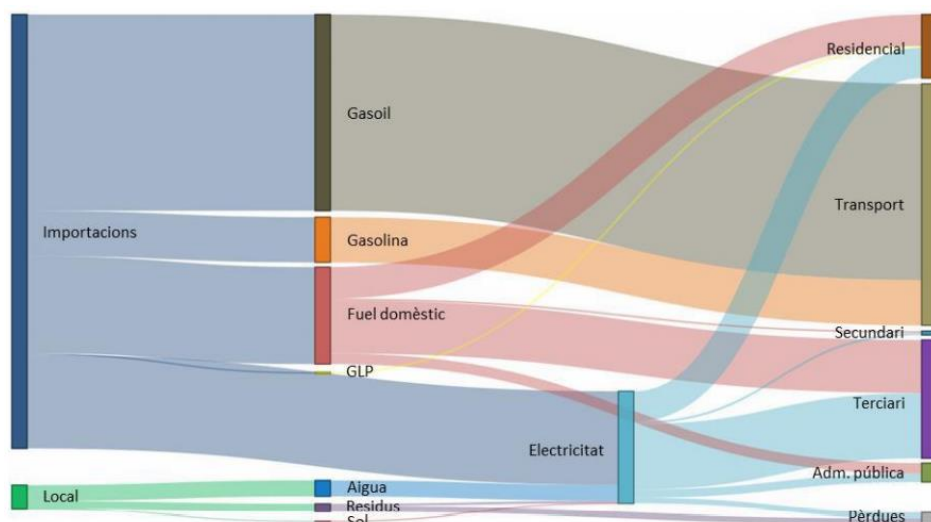


Figura 4.2. Flux d'energia del sistema energètic d'Andorra l'any 2015 [1].

El consum d'energia final a Andorra va incrementar de forma continuada durant el període 1993-2005 amb una mitjana de creixement anual superior al 4%, moment en el que s'assoleix un pic en la demanda. Des de l'any 2005 s'aprecia un lleuger descens en els consums fins a establir-se en l'actualitat. La crisi econòmica i el retrocés de la població, elements estretament relacionats a Andorra, es presenten com els principals factors responsables d'aquest constrenyiment del consum. La Figura 4.3 següent, mostra l'històric disponible d'evolució del consum d'energia final.

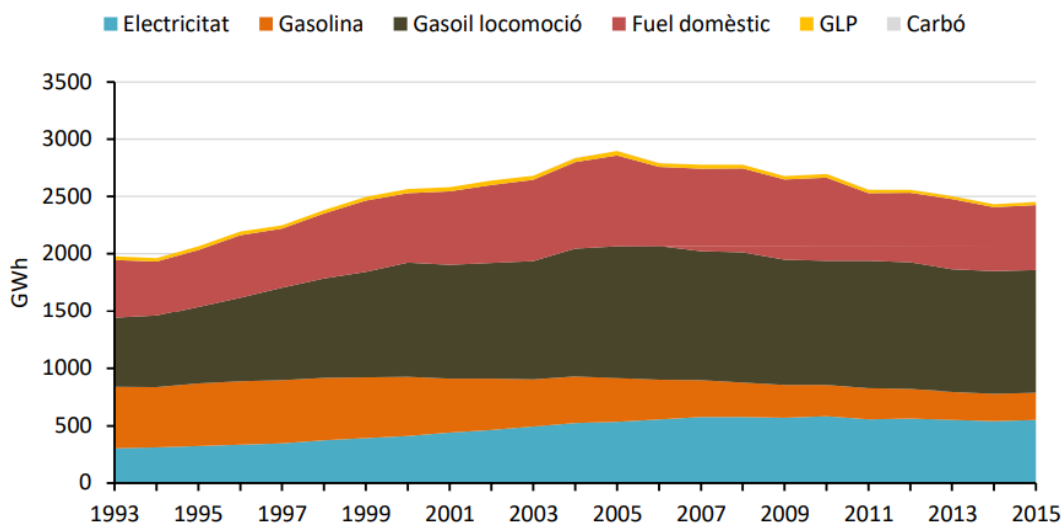


Figura 4.3. Consum d'energia final durant el període 1993-2015 [1].

La composició del consum energètic segons fonts d'energia presenta una clara tendència de canvi cap a l'electricitat, guanyant terreny any rere any als hidrocarburs. Tot i aquest factor, els combustibles fòssils representen encara més del 75% de l'energia final del país, sense comptabilitzar la part que porta intrínseca l'electricitat. Aquests estan dominats principalment pels derivats del petroli utilitzats en transport i calefacció, a més d'una aportació gairebé insignificant de carbó, gas butà i propà.

L'alta vinculació de l'economia andorrana als combustibles fòssils (importats al 100%) és la principal causa de l'important dependència energètica del país.

Pel que fa a l'electricitat, la generació interna acostuma a representar al voltant del 15% del consum elèctric del país, apreciand-se únicament petites fluctuacions provocades per la variabilitat de la generació hidroelèctrica.

Així mateix, aquesta situació implica una dependència energètica molt forta de l'exterior, superior al 90% de la demanda energètica total. Aquesta dependència exterior representa un risc d'abastament energètic davant de possibles crisis de preu dels combustibles fòssils i genera alhora incertesa i vulnerabilitat sobre l'economia nacional.

4.3. Sistema elèctric nacional

4.3.1. Consum elèctric

Tal i com s'ha observat anteriorment, el consum elèctric té un paper molt important en el model energètic andorrà. Per aquest motiu, tots els factors socioeconòmics també influencien el consum d'electricitat. D'aquesta manera, es pot veure a la *Figura 4.4*, com el consum d'electricitat va disminuir fins un 5% durant els anys de plena crisi econòmica i com després d'aquesta, el consum elèctric s'ha anat recuperant mica en mica. Tot i així, es pot observar com el 2019 ha disminuït un altre cop fins a valors similars als de la crisi anterior. Durant aquest últim any es va consumir a Andorra un total de 567.754,86 MWh elèctrics.

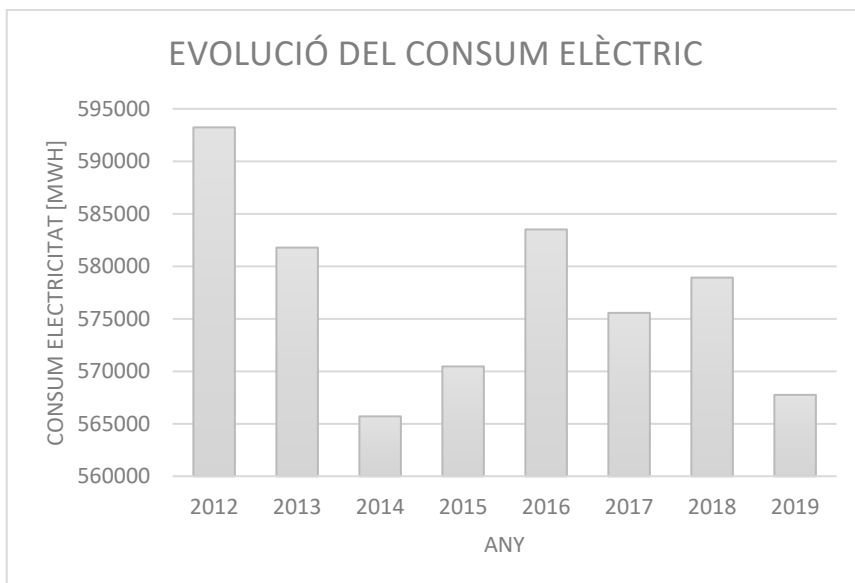


Figura 4.4. Evolució del consum elèctric a Andorra [4].

Per altra banda, com es mostra a la Figura 4.5 següent, bona part de l'electricitat consumida a Andorra s'utilitza per usos domèstics. Els sectors amb un creixement acumulat al llarg dels anys més important són les administracions. També té un paper molt important en el consum elèctric nacional el sector de la hoteleria i la restauració que, amb les estacions d'esquí, augmenten molt la demanda durant els mesos d'hivern.

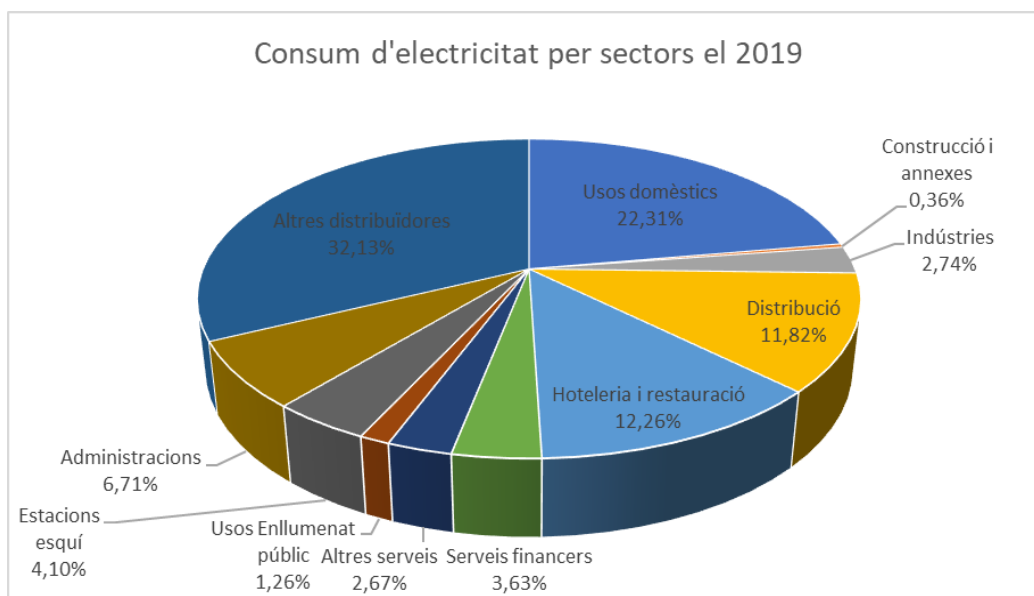


Figura 4.5. Consum elèctric per sectors [5].

4.3.2. Producció elèctrica

Com ja s'ha explicat anteriorment, Andorra ha impulsat, en els darrers anys, una transformació del model energètic per garantir la sostenibilitat i la sobirania energètiques. En aquest sentit, s'han fixat les bases d'un nou model en el qual l'electricitat es posiciona com a vector energètic de canvi.

La Llei 21/2018 [3] estableix, per primer cop, un percentatge mínim de producció elèctrica nacional del 33% al 2030 i del 50% a l'horitzó 2050 i es considera que la producció nacional d'electricitat s'ha de fomentar en com a mínim un 75% en les energies renovables. Aquest darrer compromís es reforça fins al 80% en el marc de la Declaració d'emergència climàtica i ecològica acordada recentment, pel Consell General d'Andorra.

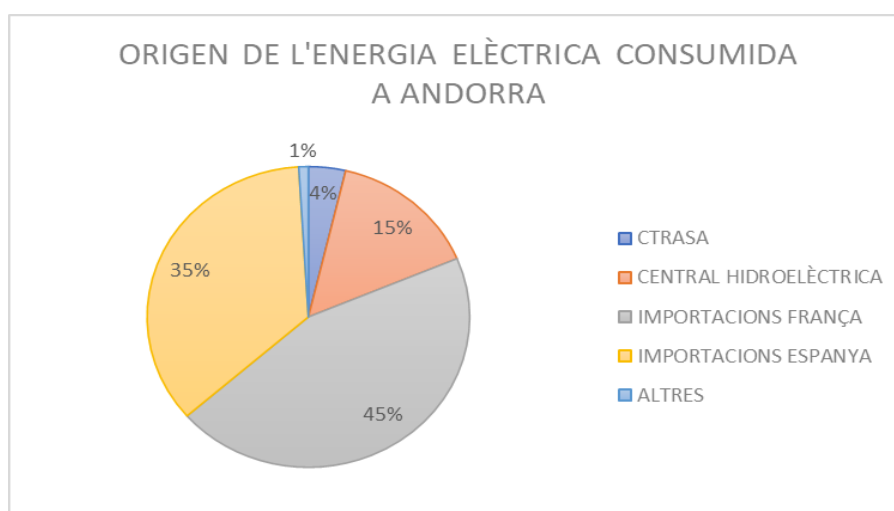


Figura 4.6. Origen de l'energia elèctrica consumida a Andorra [4].

Com es pot observar a la Figura 4.6 anterior, l'any 2019, únicament el 20% de l'electricitat consumida a Andorra es va generar de forma autòctona. L'alta dependència de les importacions ha estat una constant en els últims anys, apreciand-se únicament petites fluctuacions provocades per la variabilitat de la generació d'energia hidroelèctrica. A la Figura 4.7, es mostren les proporcions de les dues principals infraestructures de generació elèctrica del país en relació a la producció total nacional l'any 2019, que va ser un total de 111.430,33 MWh elèctrics.

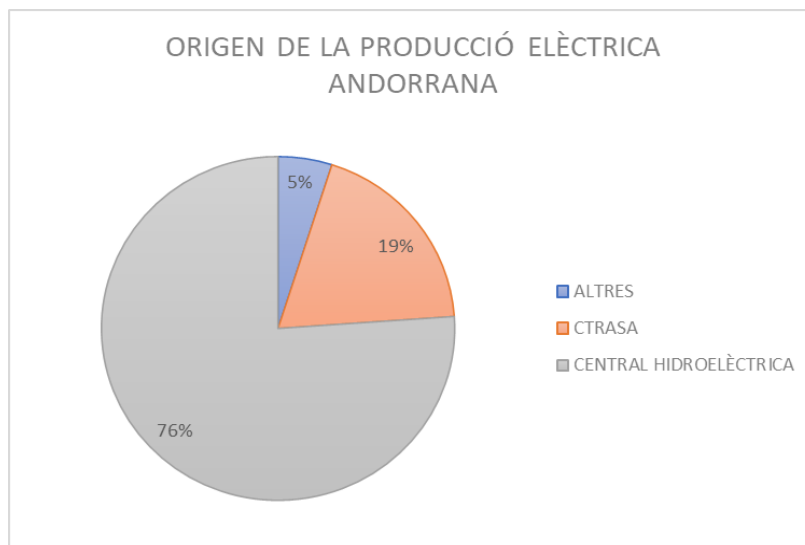


Figura 4.7. Proporció de la producció d'electricitat a Andorra durant el 2019 [4].

A la central hidroelèctrica i al centre de tractament de residus d'Andorra (CTRASA) cal afegir-hi la petita contribució de l'energia solar fotovoltaica integrada en edificis o la petita central de cogeneració situada a Soldeu.

A continuació, es presenta un gràfic, Figura 4.8, on es mostra la producció elèctrica nacional en funció dels mesos de l'any 2019. Com es pot observar, els mesos de primavera són els de major producció gràcies al increment del recurs hídic provocat pel desgel.

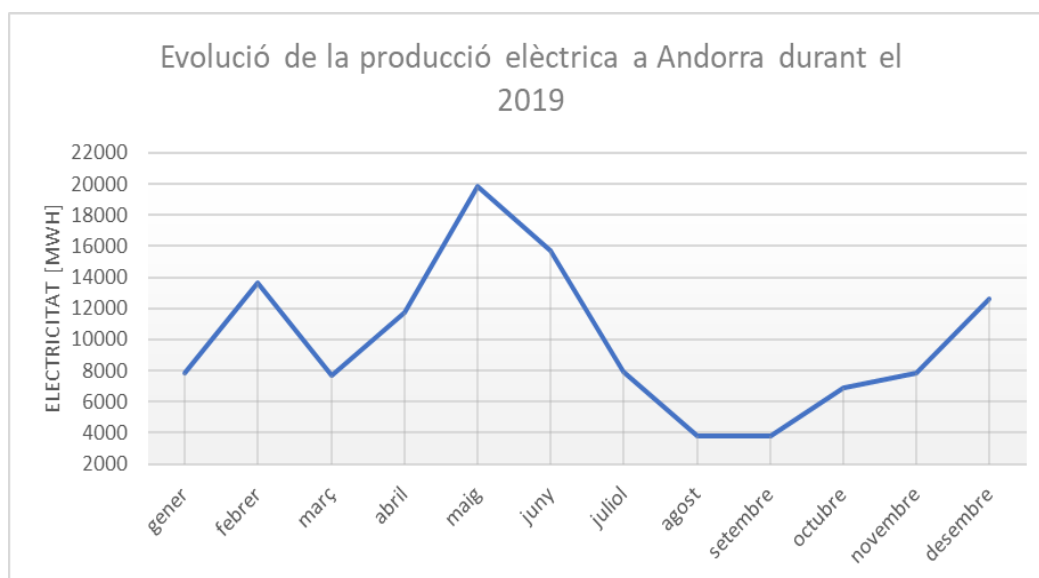


Figura 4.8. Evolució de la producció elèctrica a Andorra al 2019 [5].

4.3.3. Importacions

L'any 2019, el 80% de la demanda d'electricitat d'Andorra va ser coberta mitjançant importacions. El 35% d'aquestes provenia d'Espanya i la resta de França. La compra d'electricitat a un país o l'altre es decideix generalment en funció del preu de venda de l'energia. La tendència històrica ha estat importar més electricitat d'Espanya durant l'hivern i inicis de primavera i potenciar les importacions de França durant els mesos d'estiu quan l'electricitat provinent de la península acostuma a ser més cara. Disposar de dues línies d'importació independents permet garantir la qualitat en el subministrament donant opció a prescindir d'una d'elles en cas de fallada o realització de tasques de manteniment.

4.4. Energies renovables a Andorra

Com s'ha citat anteriorment, l'any 2010 Andorra va obrir, a través la Llei 85/2010, de mesures provisionals en relació al règim de l'energia elèctrica, la possibilitat de promoure instal·lacions de producció elèctrica mitjançant l'aprofitament de fonts d'energia d'origen renovable a tot tipus de promotors fins a una potència de 500 kW.

Al llarg d'aquests anys s'han incorporat a la producció elèctrica nacional renovable una instal·lació hidroelèctrica i 55 instal·lacions fotovoltaïques, amb un interès creixent en el sector any rere any.

L'any 2018 amb la Llei Litecc es van reforçar i ampliar les línies de la Llei 85/2010, en una important aposta pel desplegament de la producció elèctrica nacional d'origen renovable. Enguany el Govern aprovarà el Reglament de la generació d'energia elèctrica que instrumentalitza finalment les previsions de la Llei 21/2018 en aquest àmbit amb l'objectiu de facilitar aquest desplegament.

El nou context normatiu incrementa molt notablement el límit de potència de les instal·lacions de producció elèctrica que es poden desenvolupar de manera directa per qualsevol tipus de promotor. Ara és possible promoure qualsevol instal·lació de generació d'energia elèctrica a partir de fonts d'energia renovable, que estigui connectada o aïllada de la xarxa elèctrica, d'una potència inferior o igual a 2.000 kW. Cal comentar que aquesta limitació de potència afecta a promotors i empreses estrangeres. Si la instal·lació de generació ve d'acord amb el govern andorrà, com és el cas del present projecte, no hi ha cap limitació en termes de potència instal·lada.

En la següent Figura 4.9, es pot observar l'evolució de la potència instal·lada de les energies renovables des de 2013 fins a 2019. En 6 anys la potència s'ha incrementat en més de 1,7 MW i la tendència és que en els propers anys ha de seguir augmentant de forma notable.

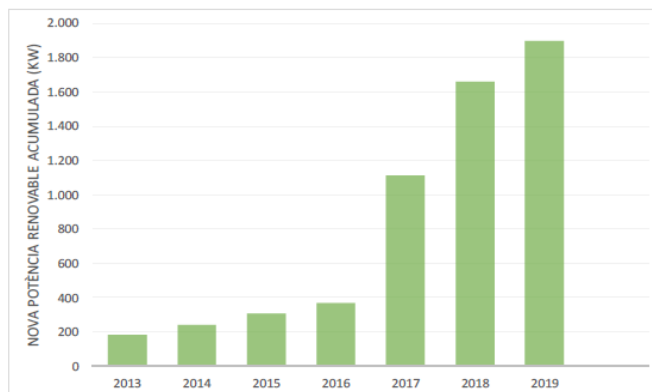


Figura 4.9. Evolució de la potència instal·lada d'origen renovable [9].

4.4.1. Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra (PSIED'A)

El PSIED'A neix de la necessitat d'un canvi de model energètic davant la dificultat i la incertesa de sostenir el model actual a llarg termini, caracteritzat per la forta dependència energètica de l'exterior i les grans emissions de gasos amb efecte d'hivernacle. En aquest context, el marc normatiu s'ha adaptat progressivament en els darrers anys per afavorir l'estalvi energètic, i la promoció nacional de les energies renovables, així com una mobilitat més sostenible.

Al febrer del 2018 es va presentar el Pla Sectorial d'Infraestructures Energètiques d'Andorra, que identifica els equipaments necessaris per incrementar la producció energètica fins al 33% de la demanda al 2030.

El pla sectorial és un instrument urbanístic que preveu la reserva de sòl per al desplegament de la política energètica nacional. Així, el pla ha de permetre assolir els objectius de producció d'energia i de foment de les energies renovables establerts per primera vegada al projecte de llei de foment de la transició energètica i del canvi climàtic.

A més, aquest pla és possible gràcies a la Llei qualificada de delimitació de competències dels comuns, ja que els comuns cedeixen gratuïtament els terrenys per als projectes d'interès nacional i de plans sectorials i posen a disposició els béns comunals. El fet de poder comptar amb aquests terrenys permetrà el desenvolupament del model energètic del país en els terrenys que s'han identificat.

El pla sectorial es divideix en tres objectius: aportar informació sobre les zones explotables per a l'aprofitament energètic de la biomassa perquè els comuns les puguin desenvolupar; definir el potencial perquè els comuns el puguin fer servir com a eina de planificació comunal, i finalment identificar les infraestructures necessàries que pot desenvolupar el sector públic i fer la reserva de sòl perquè es duguin a terme en el futur.

Així, pel que fa a les infraestructures previstes, el pla ha identificat cinc instal·lacions hidràuliques, tres fotovoltaïques, tres instal·lacions de cogeneració, sis xarxes de calor, i una de biomassa. Aquestes infraestructures permetran gairebé triplicar la producció d'energia, de manera que es pugui arribar a abastir fins al 33% de la demanda, tenint en compte l'evolució d'aquesta de cara al 2030. Així, es podrà reduir la dependència energètica de l'exterior, donant compliment a la voluntat del model energètic nacional.

A més, l'increment de la producció s'assolirà prioritzant les energies renovables, de manera que el 67,8% de la producció seria d'origen renovable, i es reduirien les emissions de gasos d'efecte hivernacle en un 33%.

No obstant això, els objectius de cara a l'any 2050, de producció del 50% de la demanda d'energia, requeriran del desenvolupament d'altres infraestructures que tenen en compte l'energia eòlica, i que seran objecte d'una segona fase del pla.

El pla, però, no es basa només en les infraestructures públiques previstes, sinó que en definir el potencial energètic de terrenys privats, es fomenta aquest desenvolupament. Així, amb la participació del sector privat, la producció nacional es podria incrementar significativament.

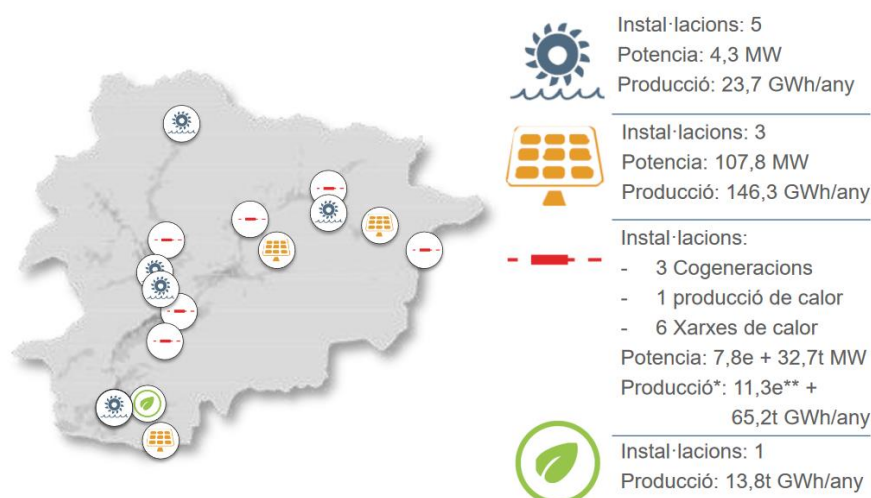


Figura 4.10. Infraestructures previstes pel 2030.[6]

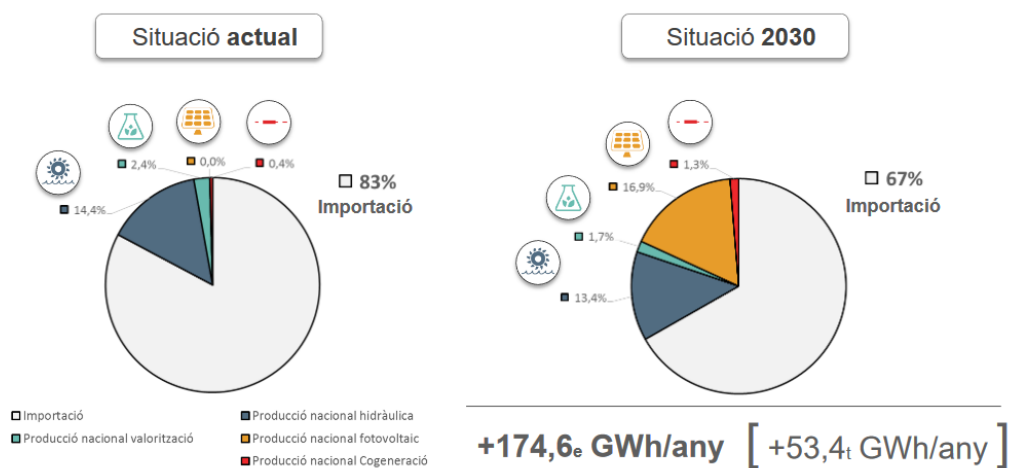


Figura 4.11. Infraestructures previstes, produccions considerades.[6]

Resumint, el Pla sectorial identifica que, tot i l'actual dependència de l'exterior, Andorra té un gran potencial en energies renovables. Com a instrument urbanístic, preveu la reserva de sòl necessari per a l'aprofitament dels potencials d'energies renovables identificats a fi de preservar-los. Aquest nou escenari energètic, i l'evolució continuada de les tecnologies, obre unes perspectives interessants per Andorra.

4.4.2. Potencial de les diverses fonts

Tot seguit es presenta un gràfic, en el qual es recopila la informació presentada en aquest apartat. Es tracta d'un resum del potencial d'aprofitament per a cada una de les tecnologies renovables que s'expliquen a continuació.

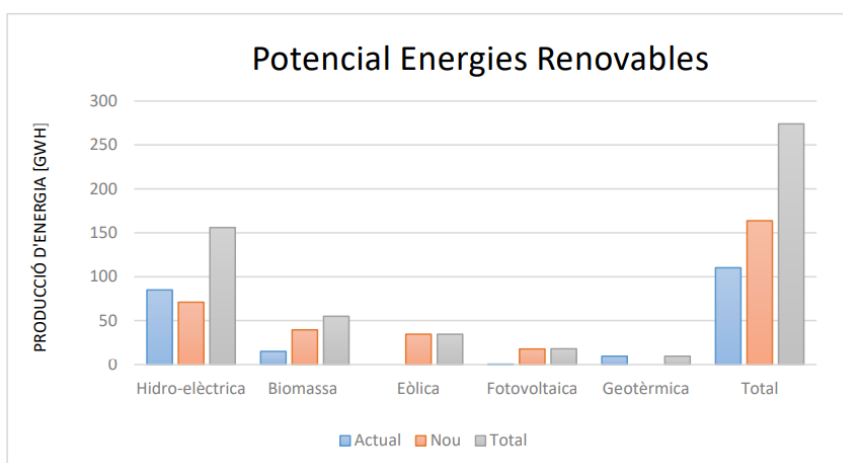


Figura 4.12. Producció d'energia segons model energètic.[1]

Com es pot veure a la *Figura 4.12*, el potencial en energies renovables d'Andorra és limitat i, en tot cas, insuficient per evitar la dependència energètica del país. No obstant, el seu aprofitament és molt aconsellable ja que contribueix a millorar a llarg termini la sostenibilitat mediambiental i econòmica del sistema de producció energètic.

En tot cas, també existeix la possibilitat d'estudiar possibles inversions en energies alternatives en projectes situats a l'estranger, a ser possible pròxims a Andorra, com és el cas de les plantes de producció de biometà situades a l'Alt Urgell per a l'obtenció de gas natural.

4.4.2.1. Energia Solar

Fins ara, la legislació andorrana únicament permetia l'ús de la tecnologia fotovoltaica en instal·lacions incorporades en edificacions. De totes maneres, l'administració ha considerat la possibilitat a curt termini de reglamentar i facilitar la creació de camps solars (PSIED'A). Per aquest motiu s'inclou al projecte com a una tecnologia potencial de formar part del sistema energètic a mitjà i llarg termini del model energètic andorrà.

Els estudis realitzats fins al moment sobre el potencial de la fotovoltaica indiquen que el recurs instal·lat en edificacions estaria entre 12 i 18 GWh anuals. També s'ha realitzat una estimació en la qual s'indica que per satisfer el consum elèctric actual d'Andorra, al voltant de 570 GWh anuals, caldria cobrir un 1,1% del territori amb panells fotovoltaics.

4.4.2.2. Hidràulica

L'energia hidroelèctrica és actualment la principal font d'energia utilitzada per produir electricitat al Principat. L'actual central hidroelèctrica de FEDA a Escaldes aprofita gairebé la totalitat dels recursos hídrics del riu Valira d'Orient i Madriu (85 GWh anuals). Aquesta central compta amb diferents zones d'emmagatzematge, la principal és el llac artificial d'Engolasters, però també es disposa de diversos estanys d'alta muntanya.

S'han realitzat diversos estudis amb la finalitat d'estimar el potencial de la producció hidroelèctrica al territori andorrà. Les conclusions d'aquests estudis indiquen que a causa de la topografia del terreny d'Andorra i la manca de zones d'emmagatzematge, únicament es podrien realitzar 6 minicentrals d'aigua fluent amb una capacitat de producció de 57 GWh i amb potències inferiors als 10 MW (minicentrals). Estarien situades a les valls no explotades, essencialment Valira del Nord i Gran Valira.

4.4.2.3. Eòlica

L'energia eòlica és l'energia renovable que ha crescut més en els últims anys, juntament amb la fotovoltaica. És considerada la tecnologia que presenta més expectatives de futur per la seva fiabilitat operacional i també degut als costos unitaris de les instal·lacions.

Malgrat que a nivell internacional l'energia eòlica ha estat la tecnologia amb un major creixement en els darrers anys, en el cas d'Andorra existeixen diversos aspectes que en dificulten la seva implantació.

Primer de tot, cal remarcar que la localització d'Andorra no és del tot idònia, ja que la zona no és especialment ventosa.

El principal escull per a la instal·lació d'aerogeneradors és que les zones de major recurs eòlic són de difícil accés degut a la topografia andorrana, incrementant-ne de forma considerable els costos d'instal·lació i manteniment.

D'altra banda, les condicions climàtiques extremes faciliten la formació de gel durant alguns mesos, amb el consegüent risc en cas de ser instal·lacions properes a espais freqüentats en temporada d'hivern.

Degut a les limitacions d'accés a zones amb bon recurs eòlic, la potència unitària dels aerogeneradors que es podrien instal·lar aniria entre els 300 kW i els 800 kW generant una producció eòlica anual de entre 20 i 35 GWh [1].

Actualment al Principat només s'hi pot trobar un aerogenerador de petita potència (5,5 kWp) situat a la zona de La Margineda, Andorra la Vella.

Tot i així, FEDA, l'any 2011 ja va fer els primers estudis de viabilitat al Pic de Maià estudiant, entre d'altres, la velocitat del vent. A dia d'avui encara no s'ha construït tot i així, l'estudi va sortir favorable i es creu que es podrà realitzar la infraestructura del parc eòlic a curt o mig termini.

4.4.2.4. Biomassa

La biomassa és una matèria primera de gran interès energètic tot i que està molt subjecta a la proximitat del recurs. En el cas d'Andorra es disposa abundantment de biomassa d'origen forestal i de residus sòlids urbans tractats pel Centre de Tractament de Residus d'Andorra.

Actualment, únicament s'utilitzen residus sòlids urbans al forn incinerador de la Comella, els quals permeten generar anualment al voltant de 15 GWh.

Els estudis realitzats fins al moment estimen que el potencial de biomassa forestal aprofitable en condicions econòmiques assumibles es podria estimar en unes 8.000 tones per any, que permetria produir al voltant de 30 GWh anuals.

4.4.2.5. Geotèrmica

Andorra disposa d'un jaciment d'aigües termals a la zona d'Escaldes-Engordany. Actualment aquest recurs surt a una temperatura de 70°C i, per tant, el seu ús es limita a la producció d'ACS o bé per a finalitats terapèutiques o lúdiques com és el cas del centre termal Caldea.

FEDA i la Compagnie Française de Géothermie (CFG) van realitzar un estudi amb l'objectiu de conèixer el potencial del recurs i avaluar la possibilitat d'utilitzar-lo en una xarxa de calefacció urbana. L'estudi va concloure que el cabal d'extracció actual ja és el màxim per conservar les fonts de la zona i si s'augmentés el cabal podria eixugar aquestes fonts.

4.4.3. Horitzó 2050

Així doncs, Andorra es proposa treballar en el canvi del model energètic i s'estableix un horitzó pel 2050 per tal de realitzar aquesta transició cap al nou model energètic. Com s'ha comentat anteriorment es busca crear un model basat en la diversificació energètica, amb un increment considerable de la producció elèctrica en territori andorrà i la substancial millora de les emissions d'efecte hivernacle del conjunt de la població andorrana.

El model actual és extremadament dependent de l'exterior, amb una escassa producció interna i molt ús dels combustibles fòssils derivats del petroli. A la Figura 4.13, es pot apreciar la transició cap al nou model energètic en alguns sectors. Bàsicament, s'introdueixen totes les millores que s'han comentat en capítols anteriors per tal de reduir la dependència; reduir el consum de fòssils tant en els edificis com en el sector de la mobilitat, introduir centrals de cogeneració amb xarxes de calor, fomentar les energies renovables i millorar les xarxes elèctriques connectades als països veïns per tal de poder augmentar la importació elèctrica.

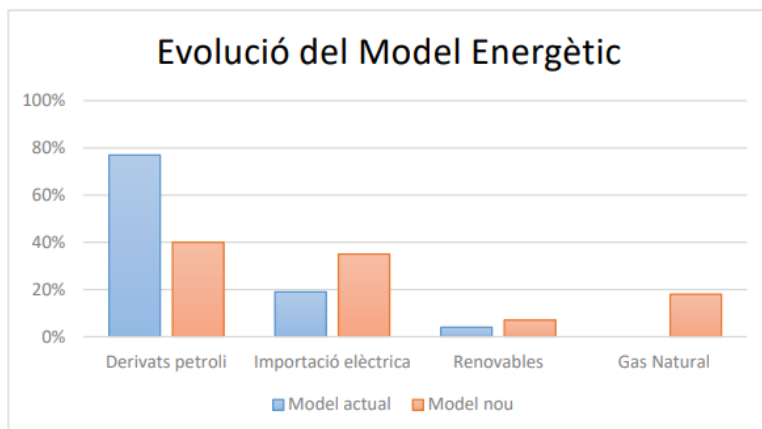


Figura 4.13. Evolució del model energètic [1].

El nou model també ha d'augmentar la producció interna i alhora aquesta ha d'estar diversificada en diferents fonts d'energia. Per aquest motiu Andorra busca implantar noves tecnologies i fomentar-ne el seu ús. En la Figura 4.14 es comparen ambdós models energètics, l'actual i el futur.

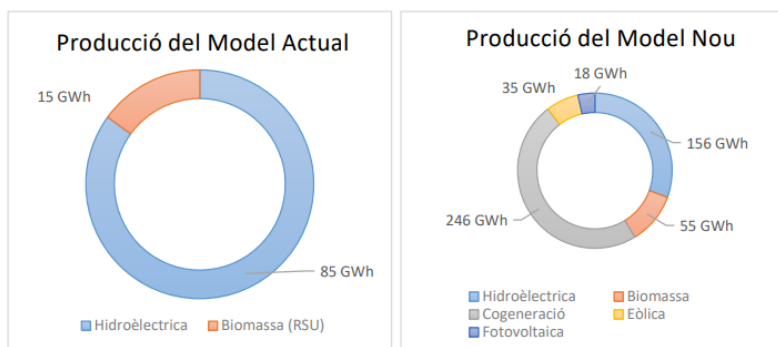


Figura 4.14. Comparació de la producció elèctrica dels dos models [1].

5. Radiació solar

En aquest apartat el que es vol és donar unes pinzellades del tipus i funcionament de les diferents tecnologies que utilitzen la radiació solar com a font d'energia, tot explicant conceptes relacionats amb l'energia solar.

L'energia solar o radiació solar, com el seu nom indica, té com a generador primari el Sol i té origen al seu interior. Allà, les condicions de temperatura ($15 \cdot 10^6$ K) i de pressió ($340 \cdot 10^9$ vegades la pressió atmosfèrica de la Terra) són tan intenses que donen a lloc a reaccions nuclears alliberant grans quantitats d'energia en forma de radiació electromagnètica.

El Sol és un cos que emet energia amb un espectre associable a la seva temperatura superficial, d'uns 5.500 K. El terme radiació es refereix a l'emissió contínua d'energia des de la superfície de qualsevol cos, aquesta energia s'anomena radiant i és transportada per les ones electromagnètiques que viatgen pel buit de l'espai a la velocitat de 299.792.458 m/s. Les ones de ràdio, les radiacions infraroges, la llum visible, la llum ultravioleta, els raigs X i els raigs gamma constitueixen les diferents regions de l'espectre electromagnètic com es pot veure en la Figura 5.1 [9].

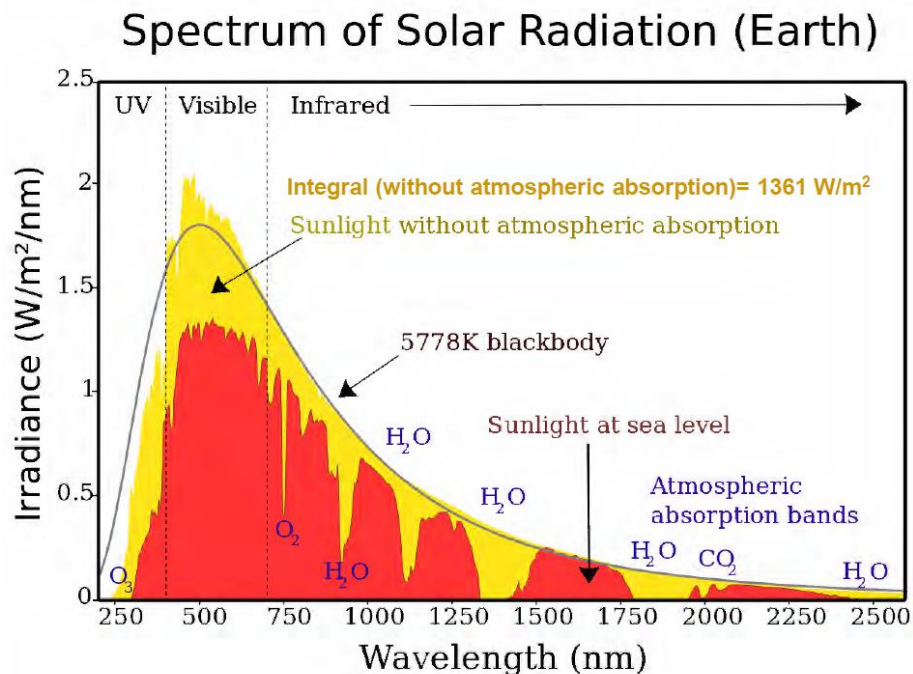


Figura 5.1 Espectre de la radiació solar [9].

La radiació solar que arriba a la Terra ha estat aprofitada pel ser humà des de l'antiguitat, amb Arquímedes inventant armes per prendre foc als vaixells enemics mitjançant miralls, fins a l'actualitat amb tecnologies molt avançades com les cèl·lules fotovoltaïques, els col·lectors solars o els heliòstats.

Les diferents tecnologies solars es poden classificar en passives o actives segons com capturin, converteixin i distribueixin l'energia solar. Les tecnologies actives utilitzen la radiació solar directe per obtenir energia tèrmica mitjançant col·lectors solars, i radiació solar directe i difusa per obtenir energia fotovoltaica mitjançant panells solars o captadors fotoquímics. Entre les tecnologies passives es troben tècniques emmarcades en l'arquitectura bioclimàtica i en la convecció natural.

5.1. Tipus de radiació

Radiació directa: és la que es rep directament des del Sol en línia recta sense que es desvii al seu pas per l'atmosfera. Dins de la radiació directe es troba la radiació normal directe, que es la que incideix perpendicularment en el sistema de captació.

Radiació difusa: és la radiació que arriba a la superfície terrestre amb un canvi de direcció al passar per l'atmosfera. Aquest desviament dels raigs solars es produeix pel xoc directe amb certes molècules i partícules de l'aire. És radiació difusa és la que es rep a través dels núvols per exemple. Sense aquesta radiació el cel es veuria negre, tot i ser de dia, tal i com succeeix a la Lluna o altres planetes del sistema solar.

Radiació reflexada: és la radiació provinent d'objectes terrestres, per exemple, la que reflexa l'herba, una paret, un llac, entre d'altres.

Albedo: és el percentatge de radiació que qualsevol superfície reflecteix respecte a la radiació que incideix sobre ella. Les superfícies clares tenen valors d'albedo superiors a les fosques. L'albedo mitjana de la Terra és del 37-39% de la radiació que prové del Sol [9].

En la següent Figura 5.2 es poden veure representats els diferents tipus de radiació solar.

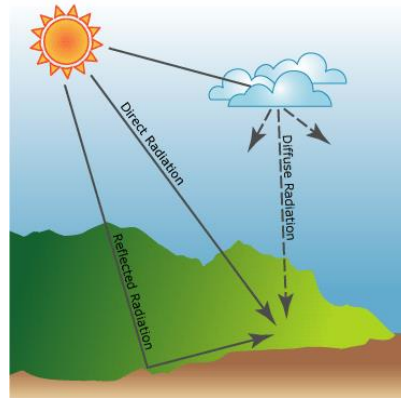


Figura 5.2. Diferents tipus de radiació. [10]

5.2. Energia solar fotovoltaica

Un sistema fotovoltaic és el conjunt d'equips elèctrics i electrònics que produeixen energia elèctrica directament a partir de la radiació solar. El principal component d'aquest sistema és el mòdul fotovoltaic, compost per cèl·lules capaces de transformar l'energia lluminosa incident en energia elèctrica de corrent continu a través de l'efecte fotoelèctric. Un altre component imprescindible és l'inversor, aquest és l'encarregat de transformar l'energia continua generada pels panells en energia alterna (font d'alimentació de la majoria d'aparells i màquines de consum). La resta d'equips inclosos en un sistema fotovoltaic depenen en gran mesura de l'aplicació en la que estiguin destinats, hi destaquen els equips d'emmagatzematge i els equips de regulació, els quals protegeixen la bateria de sobrecàrregues o excessos de descàrregues [11].

5.2.1. Tipus d'instal·lacions fotovoltaiques

Independentment de la potència i l'ús posterior que se li pugui donar, les instal·lacions fotovoltaiques es classifiquen en:

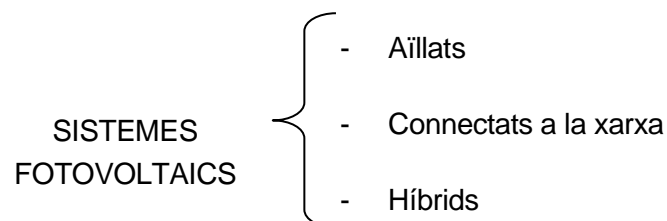


Figura 5.3. Classificació dels sistemes fotovoltaics.

5.2.1.1. Aïllades (OFF-GRID)

Es pot descriure aquest tipus de sistema com aquells que tenen com a objectiu principal cobrir la demanda total o parcial d'energia elèctrica a llocs en els que no hi hagi xarxa elèctrica de distribució o el seu accés sigui complicat. En aquest cas, normalment es disposa de sistemes d'acumulació d'energia, ja que sense ells tan sols es pot utilitzar l'energia en el moment en que es produeix. En alguns casos també s'opta per incorporar un grup electrogen, ja sigui per reduir la grandària de les bateries o per funcionar com a equip d'emergència

Per aquest motiu, cal considerar que els costos d'implantació i explotació d'una instal·lació solar fotovoltaica aïllada són superiors als d'una instal·lació connectada a la xarxa. La viabilitat econòmica d'aquest tipus d'instal·lacions únicament està justificada quan hi ha dificultats d'accessibilitat a la xarxa de distribució elèctrica.

Es pot establir que, en termes generals, el criteri principal per al dimensionament i disseny d'aquest tipus d'instal·lacions és donar cobertura a les necessitats energètiques previstes amb un disseny i execució eficaços que han de permetre el màxim aprofitament de l'energia solar i, alhora, garantir el subministrament elèctric en les circumstàncies de radiació solar més desfavorables.

Existeixen dues tipologies d'aplicacions principals:

1. **Espacials:** proporcionen electricitat a aquells elements situats a l'espai gràcies a l'ésser humà, com és el cas de l'Estació Espacial Internacional, els satèl·lits de comunicacions, etc. Gràcies a la investigació duta a terme en aquesta àrea, s'ha produït un gran desenvolupament dels equips fotovoltaics tal com els coneixem en l'actualitat.



Figura 5.4. Imatge del Vanguard I, primer satèl·lit artificial alimentat amb energia solar fotovoltaica [30].

2. Terrestres:

- Telecomunicacions: telefonia rural, via ràdio; repetidors (de telefonia, televisió, etc.)
- Electrificació de zones rurals i aïllades: instal·lacions que es poden realitzar en qualsevol lloc. Estan pensades per a regions i països en desenvolupament i totes aquelles zones on no hi ha accés a la xarxa elèctrica comercial: habitatges aïllats, d'ocupació periòdica o permanent, refugis a la muntanya, etc. En determinats països com passa a Cuba o Brasil, s'empren en edificis comunitaris (centres mèdics, escoles) o per proveir d'energia elèctrica a un determinat grup de persones (un poble, un llogaret, etc.)



Figura 5.5. Imatge d'un hospital a Uganda alimentat amb energia solar fotovoltaica [30].

- Senyalització: s'utilitza, per exemple, en senyals de trànsit lluminosos amb díodes LED, alimentats per un panell solar i una bateria.
- Enllumenat públic: emprat en zones en què és complicat portar una línia elèctrica convencional.
- Bombament d'aigua: aquestes instal·lacions estan pensades per a llocs com ara granges, horts, etc. Es poden realitzar en qualsevol lloc. El seu ús pot ser tant per a aigua potable com per a reg.
- Xarxes VSAT: xarxes privades de comunicació (per a una empresa, un organisme oficial, etc.) que actuen a través de satèl·lit. L'energia solar s'utilitza per alimentar les estacions de la xarxa.
- Telemetria: permet realitzar mesures sobre variables físiques i transmetre la

informació a una central (per exemple control de la pluviometria de la conca d'un riu).

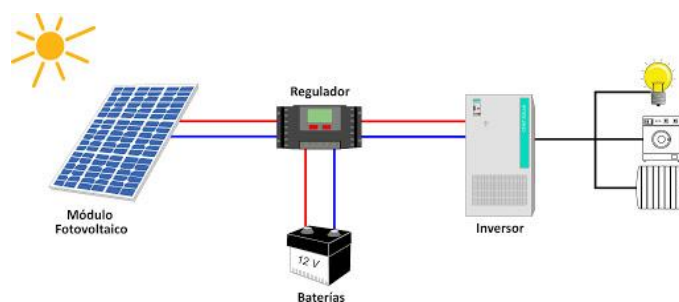


Figura 5.6. Esquema del sistema solar fotovoltaic aïllat.[30]

5.2.1.2. Connectades a la xarxa (ON-GRID)

Originàriament, la concepció d'aquest tipus d'instal·lacions estava dirigit a un model de generació distribuïda, basada en un recurs energètic renovable, amb una tecnologia que permetia acostar la producció d'energia elèctrica al punt de consum, fet que afavoreix l'eficiència energètica del sistema de producció.

Sobre la base d'aquest criteri, les primeres instal·lacions fotovoltaïques connectades a la xarxa van neixer com a petites centrals elèctriques, interconnectades a la xarxa de distribució i associades a edificis en els quals es consumeix la major part de l'energia generada. Tot i això, l'evolució natural d'aquesta tecnologia ha afavorit a la implantació de grans centrals de producció solar fotovoltaica, en les quals s'optimitzen els costos d'execució, cosa que millora la rendibilitat econòmica de la inversió, però penalitza l'eficàcia energètica d'aquest tipus de solucions.

En aquest context, es pot establir que, en termes generals, el dimensionament i disseny d'aquest tipus d'instal·lacions està supeditat a l'optimització econòmica de la instal·lació amb un disseny i execució eficaç que ha de permetre la màxima rendibilitat de la inversió i, en conseqüència, el mínim període d'amortització possible. Per aquest motiu, aquest tipus d'instal·lacions no requereixen la incorporació d'un sistema d'acumulació, és a dir, bateries, sent aquest un dels elements més cars de la instal·lació.

Com que les instal·lacions fotovoltaïques connectades a la xarxa elèctrica no han de garantir la demanda energètica de l'usuari, el dimensionament d'aquestes instal·lacions està condicionat per criteris essencialment econòmics. Sota aquesta premissa, les instal·lacions de connexió a la xarxa estan categoritzades en les variants següents:

- **Instal·lacions fotovoltaïques de venda d'energia:** tenen per objecte la venda d'energia elèctrica al sector majorista d'electricitat. En aquest sentit, aquestes instal·lacions estan concebudes com a centrals generadores d'electricitat connectades a la xarxa de distribució i han de disposar dels dispositius i mecanismes necessaris per a la interconnexió a la xarxa de distribució, així com la facturació de l'energia generada.

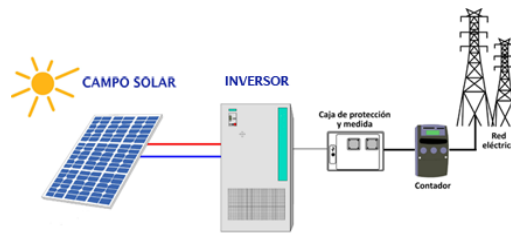


Figura 5.7. Esquema del sistema solar fotovoltaic connectat a la xarxa per venda d'energia.[30]

- **Instal·lacions fotovoltaïques d'autoconsum:** tenen per objecte reduir la factura elèctrica, per mitjà de l'autogeneració fotovoltaica d'electricitat per a consum propi o compartit. Per aquest motiu, aquestes instal·lacions majoritàriament estan connectades a la xarxa interior del consumidor i poden exportar els excedents a la xarxa de distribució, en cas de tenir-ne.

A efectes pràctics, les dues opcions estan subjectes als mateixos criteris de disseny elèctric, a excepció de detalls específics referits estrictament a la interconnexió amb la xarxa elèctrica i/o els procediments tecnicoadministratius de legalització de la instal·lació de generació fotovoltaica [20].

Així doncs, pel present projecte s'ha prescindit de la utilització de bateries. L'energia que es produeix a les hores de sol es ven a FEDA per tal de que en faci la distribució per la xarxa elèctrica

5.2.1.3. Híbrides

Quan es genera energia elèctrica a partir d'una altra font d'energia integrada a la solar fotovoltaica, es diu que es té un sistema de tipus híbrid. Generalment, aquesta configuració fa servir un inversor de potència híbrid que integra l'energia produïda pels panells solars, l'energia emmagatzemada en les bateries i l'energia d'una altra font externa.

Una de les aplicacions d'aquest sistema són els casos de sistemes fotovoltaics aïllats, els quals es complementen amb una altra font d'energia diferent per obtenir més garanties de

disponibilitat d'electricitat. Normalment, aquest altre sistema és eòlic, es tracta d'aerogeneradors. No obstant això, la generació fotovoltaica és compatible amb qualsevol altre tipus de generació elèctrica.

Aquestes combinacions es creen amb l'objectiu del benefici d'algun altre recurs energètic en un lloc proper a la instal·lació o per tenir més seguretat o fiabilitat en el subministrament d'energia.

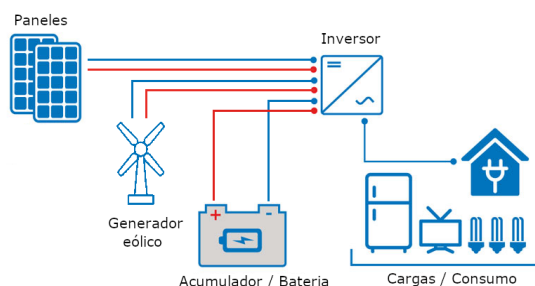


Figura 5.8. Instal·lació fotovoltaica híbrida.[30]

5.2.2. Principals tecnologies de panells solars

El panell fotovoltaic és un mòdul que està format per un conjunt de cèl·lules solars, veure Figura 5.9, que mitjançant l'efecte fotoelèctric s'encarreguen de convertir directament en electricitat els fotons que reben de la llum del Sol. La producció de corrent que generen depèn de la irradiància i de la temperatura que reben, de manera que, com més llum capten i menys temperatura, major intensitat elèctrica generen [11]. En el panell solar, el conjunt de cèl·lules estan connectades elèctricament entre si, i muntades en una estructura de suport o marc.



Figura 5.9. Cèl·lula fotoelèctrica [12].

En el mercat els panells que més s'utilitzen són el panell de 60 cèl·lules de 1,6 x 1 metres i el de 72 cèl·lules de 2 x 1 metres, tal com es pot veure a la Figura 5.10. El criteri d'elecció recau en el tipus de coberta o ubicació de la instal·lació i de la facilitat de dur-la a terme, tot i que hi ha altres factors que determinen la seva elecció. El panell de 60 cèl·lules és més econòmic que el de 72 i són més habituals en rangs de potència d'entre 200 i 300 W. El seu inconvenient és que necessiten d'un regulador de seguiment del punt de màxima potència (MPPT) per evitar problemes amb la càrrega de les bateries, si fos el cas. El panells de 72 cèl·lules no necessiten obligatòriament (tot i que és recomanable) el regulador MPPT però, al tenir un voltatge molt superior a les bateries, necessiten d'un regulador PWM (Pulse-Width Modulation) per aconseguir treballar amb les mateixes tensions i evitar grans pèrdues [13].

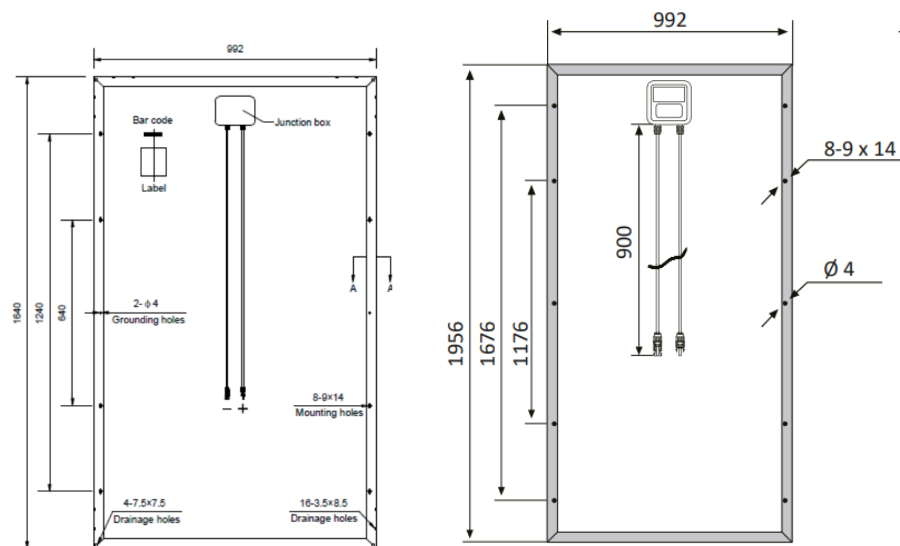


Figura 5.10. Panell de 60 cèl·lules i de 72 cèl·lules respectivament.

Els tipus de panells fotovoltaics venen donats per la tecnologia de fabricació de les cèl·lules:

5.2.2.1. Panells solars monocristal·lins

S'obtenen del silici pur fos dopat amb bor. Consta de nombroses fases de cristallització per formar el monocristall. Són típics els blaus homogenis i la visibilitat de les connexions de les cèl·lules individuals entre si. El seu rendiment sol estar al voltant del 20%. És el panell més eficient i un dels més utilitzats [11]. Veure Figura 5.11.



Figura 5.11. Panell monocristal·lí [14].

5.2.2.2. Panells solars policristal·lins

S'obtenen del silici pur fos dopat amb bor però, a diferència dels monocristal·lins, es redueixen les fases de cristal·lització. Per això la seva fabricació és més econòmica. La superfície està estructurada en cristall i a simple vista es distingeixen diferents tonalitats de blau. El seu rendiment sol estar al voltant del 15%. Aquest panell també és molt utilitzat ja que treballen millor que els monocristal·lins amb l'augment de la temperatura. A la següent Figura 5.12 es pot veure el panell [11].



Figura 5.12. Panell policristal·lí [15].

5.2.2.3. Panells solars amorfs (capa fina)

Són fabricats mitjançant la col·locació d'una capa fina de silici amorf no cristal·lí sobre una superfície com vidre o plàstic. És el mòdul més econòmic per la seva fabricació. Té un color homogeni, però no existeix connexió possible entre les cèl·lules. El seu rendiment és menor al 10% cosa que fa que sigui el menys utilitzat en el mercat [11]. Veure Figura 5.13.



Figura 5.13. Panell amorf [15].

5.3. Energia termosolar

El concepte en el que es basa l'energia termosolar és en la concentració de radiació provinent del Sol en un receptor, per així aconseguir temperatures elevades i posteriorment ser utilitzades per a generar vapor i operar un cicle de potència. Se la coneix internacionalment com Concentring Solar Power (CSP).

Una de les seves característiques més interessants és la facilitat d'emmagatzematge d'energia que presenta. Sol estar complementada per un sistema de recolzament de generació per tal de garantir la generació fins i tot en dies ennuvolats o de neu. Pel que fa a les limitacions, la gran distància que hi pot haver entre punts de generació i de consum fa que sigui molt important l'eficiència del transport de l'energia.

No només la generació d'electricitat es pot beneficiar de l'energia termosolar. Aplicacions com produir calor per l'aigua calenta sanitària (ACS) i processos industrials; cogeneració de calor, fred i electricitat; dessalinitzar aigua o cuines solars són alguns altres exemples de la seva utilitat.

5.3.1. Principals tecnologies de concentradors solars

La producció d'electricitat mitjançant energia solar tèrmica es caracteritza per l'ús de sistemes de concentració d'alta temperatura. Aquesta energia concentrada és transportada per un fluid calorífic que alimenta un cicle de vapor el qual s'encarrega de generar l'electricitat.

La concentració de la radiació es pot aconseguir de quatre formes diferents que es poden subdividir en dos grups. El primer grup dirigeix la radiació incident cap a un únic punt, mentre

que el segon la dirigeix al llarg d'una línia.

Dins el primer grup s'hi troben les centrals amb receptor central. Aquestes centrals es componen d'un camp d'heliòstats que reflecteixen la radiació cap a una torre central elevada des d'on s'utilitza el fluid calent per un cicle de potència o és emmagatzemat. L'altre tecnologia que es troba dins d'aquest grup són els discs parabòlics amb motor Stirling. En aquest cas es tracta de petites unitats capaces de treballar independentment utilitzant un motor Stirling per transformar la radiació solar en energia elèctrica.

En el segon grup s'hi troben els reflectors lineals Fresnel i els cilindres parabòlics. Els reflectors tipus Fresnel concentren l'energia reflexada en miralls situats al terra cap a un tub horitzontal col·locat en la posició adequada. En el cas dels cilindres parabòlics la línia on es col·loca el tub receptor és la línia focal d'una paràbola formada per miralls. En ambdós casos l'energia és conduïda al cicle de potència o als tancs acumuladors [16].

5.3.1.1. Cilindres parabòlics

Els sistemes de cilindres parabòlics consisteixen en files paral·leles de miralls amb forma de paràbola que concentren la radiació al llarg de la línia focal d'aquesta. Aquestes files fàcilment arriben als 300 metres de longitud i gairebé els 6 metres d'amplada.

Per a la seva construcció s'utilitzen fines làmines de material reflectant que són doblades i corbades en forma de paràbola, o petits miralls ajuntats aconseguint també aquesta forma. En la línia focal d'aquesta es col·loca el tub receptor, tub d'acer recobert amb un material selectiu que millora l'absorció de calor. Al voltant d'aquest tub hi ha una carcassa de vidre que redueix les pèrdues convectives amb l'exterior. Entre el tub receptor i el vidre es fa el buit.

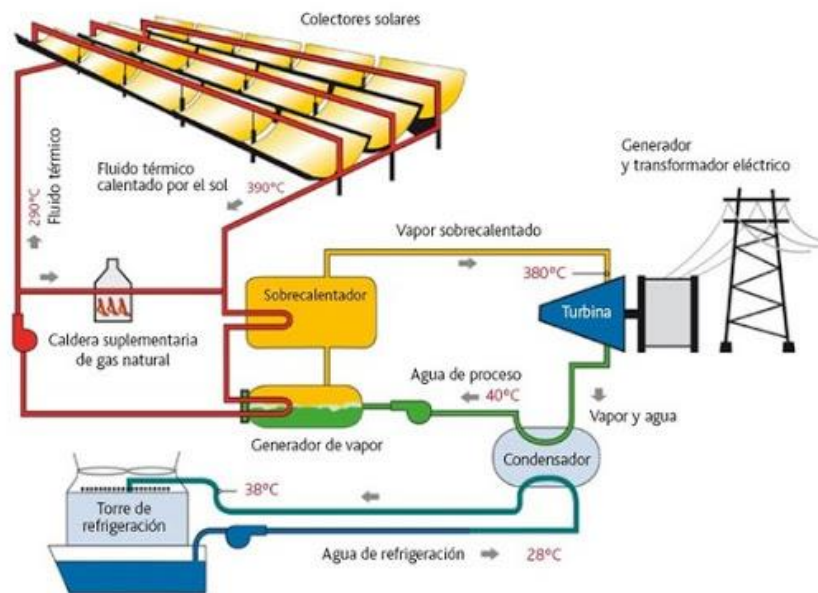


Figura 5.14 Esquema d'una central termosolar amb cilindres parabòlics [16].

De la mateixa manera que qualsevol altre sistema de concentració, els col·lectors parabòlics únicament aprofiten la radiació directa. És per això, que es necessita d'un sistema de seguiment que modifiqui la posició del col·lector al llarg del dia. El sistema d'orientació i seguiment que tenen aquestes plantes és d'un grau de llibertat. Únicament roten al llarg d'un eix, que és la línia focal de la paràbola. L'orientació pot ser de nord a sud, seguint al Sol d'est a oest; o d'orientació est a oest, amb un seguiment de nord a sud. Els dos tipus d'orientació tenen característiques diferents. L'elecció d'aquest paràmetre depèn de l'aplicació de la instal·lació i de l'època de l'any que es demani més energia.

El sistema de seguiment no només s'usa per a un òptim aprofitament dels recursos solars, sinó que també té funcions de protecció. En condicions climatològiques adverses com fortes pluges, ratxes de vent o nevades, el col·lector és retornat a una posició segura.

L'energia absorbida pel fluid calorífic és utilitzada per produir vapor reescalfat que s'utilitza en un cicle de vapor. El fluid utilitzat pot ser aigua desmineralitzada per a temperatures inferiors a 200°C, olis sintètics per a temperatures superiors, o sals foses.

Les temperatures que es poden assolir amb aquesta classe de col·lectors van des dels 50 °C fins als 550 °C aproximadament. Són sistemes que compten amb una alta eficiència i un baix cost.

Habitualment les centrals de cilindres parabòlics utilitzen una caldera de gas natural auxiliar

que asseguri el subministrament de calor necessari per a la producció. Actualment, les plantes de recent inauguració i en projecte estan incorporant sistemes d'emmagatzematge que permetin la continuïtat de l'efecte solar durant un nombre determinat d'hores.

A Espanya existeix una de les plantes de generació amb cilindres parabòlics més gran del món. Està ubicada a la província de Granada en els municipis de Aldeire i La Calahorra. Consta de 3 plantes de 50 MW formant una potència total de 150 MW elèctrics on cada planta cobreix una superfície de captadors de 180.000 m² amb 624 unitats dotades d'un mecanisme de seguiment solar. El principi fonamental de la planta és la generació d'electricitat mitjançant olis tèrmics en el camp col·lector i sals foses en el sistema d'emmagatzematge [17].



Figura 5.15 Central termosolar Andasol de concentradors cilíndrics parabòlics d'Aldeire. [17]

5.3.1.2. Concentradors lineals Fresnel

Els concentradors tipus Fresnel tenen un funcionament semblant als cilindres parabòlics. En aquest cas, s'utilitza llargues files de miralls plans o lleugerament corbats que reflecteixen la radiació en un receptor lineal horitzontal col·locat a una certa alçada sobre els miralls. Els miralls tenen un sistema de seguiment d'un sol eix per tal de seguir el moviment del Sol durant el dia. El receptor sol estar recobert per la part superior d'una altre superfície parabòlica que ajuda a concentrar els rajos reflexats pels miralls. Per l'interior d'aquest receptor circula el fluid destinat al transport de la calor absorbida del Sol.

Un dels principals avantatges és la seva simplicitat pel que fa al disseny, ja que és molt més simple que altres sistemes i requereix costos d'inversió menors. L'ús de miralls plans o lleugerament corbats i el fet d'estar ubicats pròxims al terra, són factors que fan reduir el cost dels reflectors tipus Fresnel. No obstant això, els concentradors lineals són menys eficients i tenen més dificultats a l'hora d'integrar un sistema d'emmagatzematge.

Un dels principals desavantatges d'aquesta tecnologia és l'aparició d'ombres entre els diferents miralls ubicats al terra. Per evitar aquestes pèrdues, o s'augmenta l'espaiat entre miralls o s'augmenta l'alçada del tub receptor, la qual cosa significa més costos econòmics per les dues alternatives.

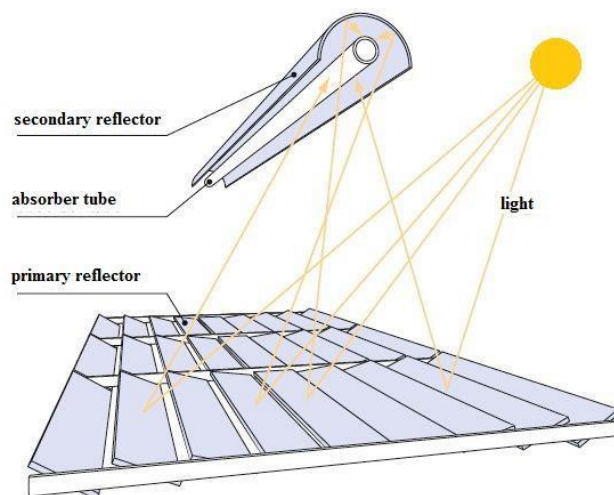


Figura 5.16. Concentradores solars tipus Fresnel. [18]

5.3.1.3. Central solar de torre central

Aquest tipus de centrals utilitzen milers de petits miralls anomenats heliòstats per concentrar l'energia al capdamunt d'un torre fixa. El fluid calorífic circula des de la torre fins el cycle de potència, passant pel punt de concentració dels rajos solars. Aquests sistemes s'utilitzen per elevades radiacions incidents.

Els ratis de concentració se situen entre els 300 i 1500, permetent aconseguir altes temperatures que poden arribar als 1500°C. Habitualment les temperatures a les que s'arriba estan al voltant dels 1000°C. D'aquesta forma s'incrementa l'eficiència de la conversió d'energia tèrmica en energia elèctrica i es redueix el cost d'emmagatzematge

tèrmic.

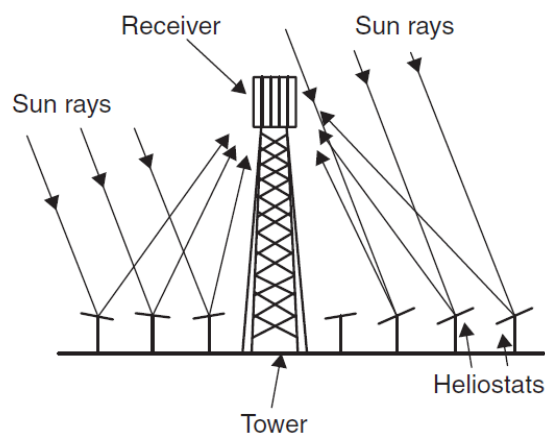


Figura 5.17. Esquema del funcionament d'una central amb torre central. Font pròpia

La instal·lació d'una central solar de torre central es divideix en el camp d'heliostats i la torre. Cada heliostat té una superfície que pot variar d'uns 50 m² fins a 150 m² segons el disseny i factors de cost de l'energia produïda. Aquests heliostats estan compostos per miralls més petits que faciliten el seu muntatge, operació i moviment.

La col·locació dels miralls es determina de manera que existeixi un compromís entre el rendiment energètic i l'econòmic. Energèticament, caldria col·locar-los en forma de cercles concèntrics de manera que l'extensió ocupada per tot el camp de heliostats sigui la mateixa que la dels miralls. En la realitat, els heliostats es col·loquen a una distància fixada per un factor de rendiment especular i d'utilització de camp. L'inconvenient d'aquesta col·locació és l'aparició d'ombres provocades per uns panells sobre els altres. Així doncs, no s'utilitza de forma eficient tota la superfície de l'heliostat, apareixent un factor d'ombres. Per pal·liar aquest efecte s'ha de col·locar el receptor el més alt possible.

Els heliostats han d'estar orientats en una direcció concreta, seguint el moviment aparent del Sol. La visió conjunta de el camp solar es pot considerar com un paraboloide en què cada element que el compon té una orientació diferent a qualsevol altre. Els mecanismes necessaris per al correcte posicionament dels miralls es componen de dos eixos que són controlats de forma ininterrompuda per un ordinador. D'aquesta manera, els heliostats varien la seva posició de forma continuada al llarg del dia.

La radiació que arriba als heliostats és enviada a la torre on se situa el receptor pel qual

circula el fluid calorífic. En el receptor es tenen en compte les propietats d'absorció i reflexió, així com les pèrdues per convecció i radiació. Des del receptor el fluid circula per una sèrie de canonades, bombes i vàlvules fins arribar al bloc de potència.

Per augmentar les hores de producció es pot acoblar un sistema d'emmagatzematge d'energia en forma de calor latent que es fa servir durant la nit o dies ennuvolats. Els tancs d'emmagatzematge es componen de dos tancs de sals foses, un fred i un altre calent. Aquesta tecnologia de sals foses és la més estesa i la que s'està posant en pràctica en l'actualitat per als sistemes d'emmagatzematge. Aquest sistema auxiliar, juntament amb les altes temperatures assolides en el receptor, permet treballar la meitat de l'any a potència nominal.

Els cicles de potència amb què operen les centrals comercials són principalment cicles de vapor, encara que també es poden acoblar cicles de gas com els cicles Brayton o Stirling. Aquests últims cicles necessiten majors temperatures i tenen certes limitacions en el disseny per requerir receptors de cavitat.

Els fluids de treball són típicament vapor d'aigua o aire pressuritzat. Aquesta última opció podria obrir les portes a la utilització de cicles combinats de turbina de gas i turbina de vapor. L'aire calent passaria a una turbina de gas i la calor a la seva sortida es recuperaria per a ser usat en una turbina de vapor.

5.3.1.4. Discs parabòlics

Els discs parabòlics concentren els raigs procedents del Sol en el focus del disc situat just en la línia normal des del centre del disc. En aquest punt se situa un motor Stirling que transforma l'energia tèrmica en electricitat. Aquest sistema evita la necessitat de disposar d'un fluid de transport de l'energia des del punt de concentració fins al bloc de potència i la necessitat d'un sistema de refrigeració.



Figura 5.18. Exemple real d'un disc parabòlic.[19]

La relació de concentració se situa entre 600 i 2000. Es tracta de la tecnologia que major concentració aconseguix i la que també majors temperatures obté, podent superar els 1500°C.

Conté un sistema de seguiment de dos eixos que permet al disc tenir un òptim posicionament respecte el Sol en tot moment, cosa que els fa els sistemes més eficients de tots.

Els sistemes de generació es dimensionen per unes potències no gaire elevades, d'unes desenes de quilowatts, cosa que es veu reflectida en la grandària de les estructures. Habitualment la seva utilitat se centra en la generació d'electricitat de forma individual, encara que els discs parabòlics també admeten configuracions conjuntes. Es pot prescindir del motor Stirling i conduir el fluid de transferència de tots els discs cap a un sistema de conversió de potència, tot i que aquestes plantes requereixen d'un disseny més complex a causa del sistema de transport, bombes i pèrdues tèrmiques. Per aconseguir una central a gran escala serien necessaris centenars de milers de discos, com passa amb centrals de cilindres parabòlics o heliòstats.

5.3.1.5. Taula Resum

	CILINDRES PARABÒLICS	CONCENTRADORS FRESNEL	TORRE CENTRAL	DISCS PARABÒLICS
Generació elèctrica	<ul style="list-style-type: none"> - Miralls parabòlics cilíndrics per transferir la radiació al fluid tèrmic. -Normalment s'utilitza com a fluid olis o sals foses. -A través d'un intercanviador es genera vapor que fa moure una turbina per generar electricitat. -Connectada a la xarxa elèctrica -Potències de fins a 100MW 	<ul style="list-style-type: none"> -Reflectors plans o lleugerament corbats per transferir la radiació al seu fluid tèrmic. -Normalment s'utilitza com a fluid olis o sals foses -A través d'un intercanviador es genera vapor que fa moure una turbina per generar electricitat. -Connectada a la xarxa elèctrica -Potències menors als 10 MW 	<ul style="list-style-type: none"> -Milers de heliòstats enfocats a una torre central per transferir l'energia tèrmica al fluid. -Normalment s'utilitza com a fluid sals foses -A través d'un intercanviador es genera vapor que fa moure una turbina per generar electricitat. -Connectada a la xarxa elèctrica -Potències de fins a 200MW 	<ul style="list-style-type: none"> -Disc parabòlic amb forma de concentrador i receptor al focus. -La conversió d'energia tèrmica a elèctrica es fa a través d'un motor Stirling. -No connectada a la xarxa elèctrica -Potències d'uns 150 kW/unitat
Avantatges	<ul style="list-style-type: none"> -Instal·lacions funcionant ja en el mercat elèctric -15% d'eficiència neta -Modular -Sistema híbrid provat -Capacitat d'emmagatzematge 	<ul style="list-style-type: none"> -Modular -Capacitat d'emmagatzematge -Costos de fabricació menors 	<ul style="list-style-type: none"> -Possibilitat de ser ubicada en terreny no pla -Permeten molt altes temperatures i així major rendiments -Seguiment solar a dos eixos 	<ul style="list-style-type: none"> -Eficiència solar molt alta (30%) -Modular -Fàcil fabricació -No necessita d'aigua pel sistema de refrigeració -Seguiment solar a dos eixos
Inconvenients	<ul style="list-style-type: none"> -Un sol eix de seguiment 	<ul style="list-style-type: none"> -Entre 8 i 10,5% d'eficiència -Un sol eix de seguiment 	<ul style="list-style-type: none"> -Els alts preus, les eficiències i la operativitat necessiten d'un desenvolupament major per a operar a escala comercial 	<ul style="list-style-type: none"> -No hi ha instal·lacions a gran escala -Els costos de producció en cadena no estan provats

Figura 5.19. Resum de les principals tecnologies de concentració.

6. Estudi previ

6.1. Requisits i consideracions del projecte

Per tal de dur a terme l'estudi comparatiu entre les dues centrals solars, s'han fixat els següents requisits:

1. Les dues instal·lacions han de situar-se al mateix emplaçament per tal de disposar de la mateixa superfície construïble.
2. L'emplaçament ha de ser en una de les zones destinades pel Govern d'Andorra a camps d'energia solar (PSIEd'A).
3. Es procurarà aprofitar el màxim de superfície del terreny seleccionat per tal de maximitzar la generació d'energia elèctrica.
4. Es busca la màxima rendibilitat per a cadascuna de les dues centrals solars. Això suposa prescindir d'emmagatzematge elèctric en el cas de la fotovoltaica i per contra, emmagatzemar l'energia tèrmica en el de la central solar tèrmica.
5. La distribuïdora elèctrica del país (FEDA) imposa comprar l'energia elèctrica produïda per ambdues centrals a un preu de 90€/MWh.
6. Ambdós projectes hauran de fer el disseny de la planta fins a l'estació transformadora. Aquesta última no forma part de l'abast d'aquest projecte ja que es deixa per a futures investigacions.

6.2. Emplaçament

Com s'ha comentat en l'apartat 4.4.1, el Pla Sectorial de Infraestructures Energètiques del BOPA defineix tot de superfícies les quals poden ser explotades per tal de construir centrals de generació amb energia renovable [19].

A l'Annex 7 del Decret [26], Mapes de compatibilitat d'usos d'energia solar, es presenten totes les superfícies validades per a ubicar-hi instal·lacions solars. Els mapes de superfície que hi apareixen s'han realitzat tenint en compte els criteris tècnics següents:

- Radiació solar global mínima de 1 MWh/m²/any
- Pendent del terreny inferior o igual al 40%
- Exclusió de les distàncies inferiors a 100 m de les carreteres generals i de les carreteres secundàries per temes de seguretat als vials i de seguretat de la mateixa infraestructura.
- Exclusió dels terrenys ubicats a menys de 25 m d'edificacions, pistes d'esquí i 50 m a remuntadors.

Hi ha multitud d'emplaçaments que compleixen aquets requisits repartits per tot el país, destacant les zones de les parròquies de Sant Julià de Lòria, Encamp i Canillo. Totes tres parròquies contenen zones amb una irradiació solar força favorable superiors a 1,3 MWh/m²/any.

Després de parlar amb el Director d'Enginyeria de FEDA es va optar per ubicar la central a la zona de la Rabassa, parròquia de Sant Julià de Lòria, o a la zona del pic del Maià, parròquia de Canillo. Totes dues opcions compleixen els requisits necessaris per a les centrals solars: bona irradiació solar i grans superfícies edificables.



Figura 6.1 A l'esquerra Parc de la Rabassa i a la dreta Pic del Maià [32].

De les dues opcions esmentades, finalment s'ha decidit per ubicar la central solar a la Rabassa. El principal factor que ha portat a aquesta decisió ha estat el desnivell de la zona del Maià i les inclemències meteorològiques que pateix. Les centrals CPS necessiten d'unes superfícies el més planes i menys irregulars possible, ja que sinó els concentradors solars, al ocupar distàncies molt grans, poden tenir dificultats en el transport del fluid tèrmic. Per altre banda, la zona del Maià al ser una zona més elevada, presenta al llarg de l'any vents més forts i nevades més abundants que han decantat l'elecció a la zona de la Rabassa.

Les coordenades de l'emplaçament són les següents [7]:

- Latitud: 42,434°
- Longitud: 1,551 °

La superfície de l'emplaçament escollit consta de 60 hectàrees i presenta una inclinació constant de 15°. Per una distància d'uns 880 metres es passa d'una altura de 2.175 a 2.400 metres. A la següent Figura 6.2 es poden veure les corbes de nivell de l'emplaçament.

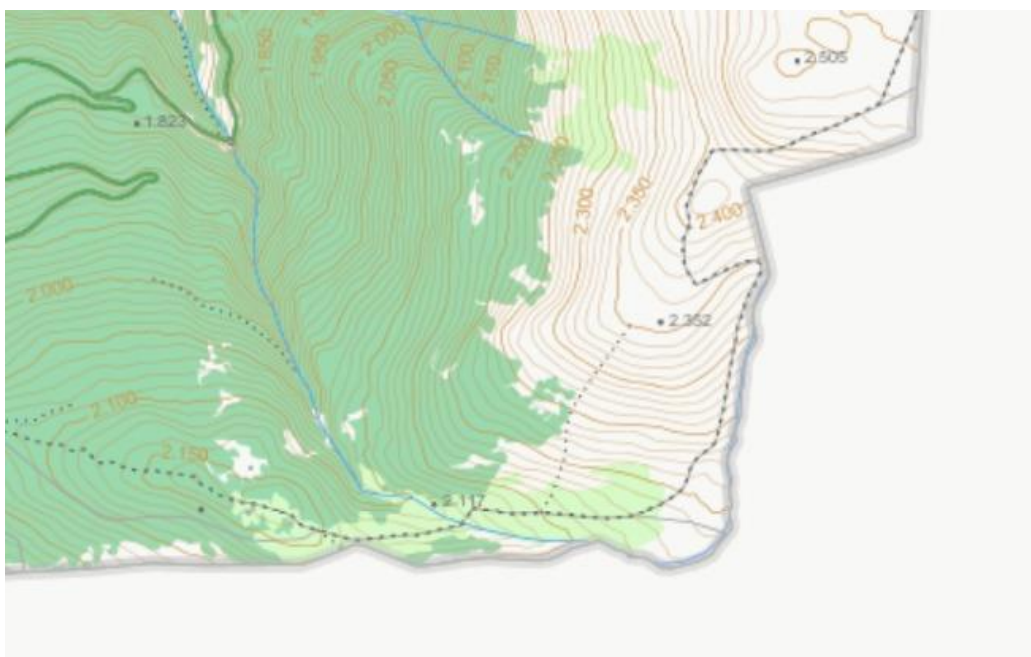


Figura 6.2 Corbes de nivell de la zona del Parc de la Rabassa [32].

A continuació a la Figura 6.3 es pot veure, segons els plànols de l'Annex 7 del Decret, el mapa sencer del país amb les superfícies de les instal·lacions solars previstes. S'ha encerclat amb un requadre vermell la zona de la Rebassa.

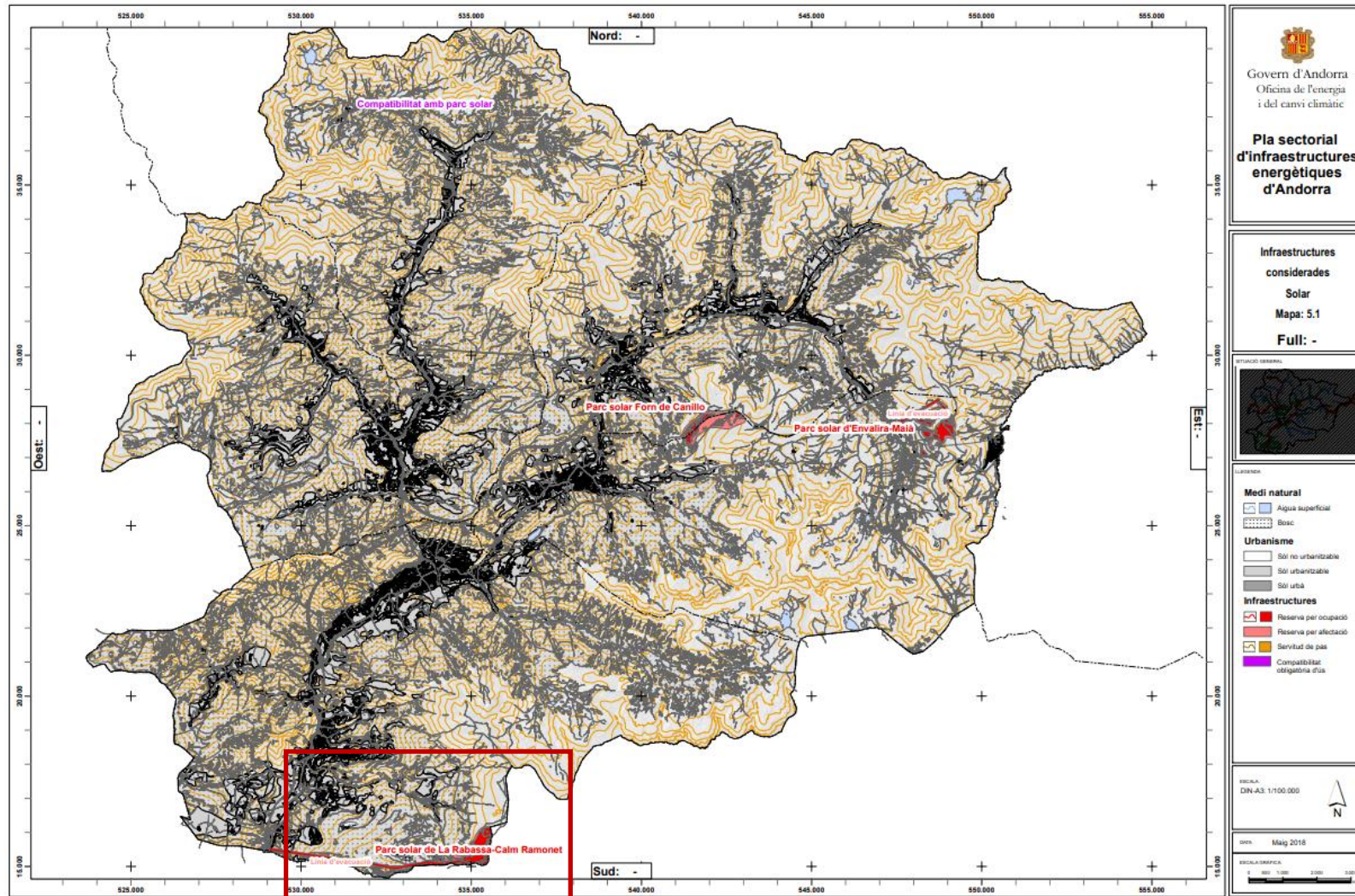


Figura 6.3. Emplaçament de la plantes termosolar i fotovoltaica a La Rabassa [19].

6.3. Condicions meteorològiques

6.3.1. Programes utilitzats

6.3.1.1. Meteonorm

El Meteonorm és un software de dades i càlculs. La seva base de dades conté informació de més de 6.200 ciutats, 7.300 estacions meteorològiques i 1.200 DRY (disseny d'anys de referència). Si el lloc més proper a la ubicació seleccionada està a més de 20 km de distància, utilitza una combinació d'informació terrestre i de satèl·lits per generar les dades. Les dades satel·litzades són emprades per a la interpolació en àrees remotes.

Per a la ubicació del projecte, Meteonorm 7.3 ha emprat dades corresponents al període entre 1991 a 2010 per a obtenir les dades d'irradiació per a l'any meteorològic típic (TMY). Les dades de temperatura i vent per al TMY corresponen a dades preses en un període comprès entre 2000 i 2009. Les diferents estacions emprades per Meteonorm per aquest projecte en concret són les següents:

- Llocs de radiació interpolats: dades de satèl·lit (Part de les dades de satèl·lit: 100%).
- Temperatura interpolacions (localització): MOUNT AIGOUAL (AUT) (250 km), Burgos/Villafria (423 km), Logrono/Agoncillo (316 km), PAMPLONA/NOAIN (261 km), LEON/VIRGEN CAMINO (588 km), CAPE BEAR (132 km).

A l'Annex I, s'ha adjuntat més informació sobre les dades obtingudes amb el programa Meteonorm. Aquestes dades s'han utilitzat en el programa de simulació de la central fotovoltaica.

6.3.1.2. PVGIS

PVGIS és un sistema d'informació geogràfica desenvolupada per la Comissió Europea. Aquest programa, està disponible en anglès, francès, italià i espanyol per a qualsevol ubicació d'Europa i Àfrica, així com per a bona part d'Àsia i Amèrica. PVGIS proporciona accés gratuït a:

- Potencial fotovoltaic per a diferents tecnologies i configuracions de sistemes connectats a la xarxa i aïllats.
- Radiació solar i temperatura, com a mitjanes mensuals o diàries.
- Valors horaris tant de la radiació solar com del rendiment fotovoltaic.

- Dades típiques meteorològiques anuals de nou variables climàtiques.
- Mapes, per país o regió, del recurs solar i del potencial fotovoltaic per imprimir.

Pel present projecte, s'ha fet ús d'aquest software per tal d'extreure dades meteorològiques i utilitzar-les per la central termosolar amb el programa SAM.

6.3.2. Irradiació

Les dades de la irradiació horitzontal global i difusa de l'emplaçament de La Rabassa, s'han trobat mitjançant l'eina Meteororm 7.3. Pera altra banda, les dades de la radiació directa normal, s'han trobat a partir del software PVGIS, calculant la mitjana mensual per a cada any des del 2005 al 2016.

	Irradiació horitzontal global (kWh/m ² /mes)	Irradiació difusa horitzontal (kWh/m ² /mes)	Irradiació normal directa (kWh/m ² /mes)
Gener	67,5	24,54	129,3
Febrer	85,3	27,90	124,9
Març	130,9	46,88	145,9
Abril	152,6	73,00	139,3
Maig	181,8	73,28	156,6
Juny	206,4	72,85	172,6
Juliol	231,8	73,06	212,9
Agost	200,0	65,39	206,8
Setembre	150,7	51,07	159,1
Octubre	106,3	42,69	142,9
Novembre	73,6	25,82	119,7
Desembre	59,5	21,30	131,2
ANUAL	1646,3	597,76	1841,2

Figura 6.4. Irradiació de l'emplaçament.

6.3.3. Temperatura

A més de la radiació, cal conèixer la temperatura de l'emplaçament. A continuació, s'ha calculat la mitjana mensual de les temperatures del període de 2005 a 2016 a partir de les dades extretes del PVGIS. Per altra banda, s'ha indicat la temperatura ambient mensual durant les hores de sol a partir de les dades proporcionades pel Meteonorm.

	Temperatura emplaçament (°C)	Temperatura ambient hores de sol (°C)
Gener	-3,5	6,4
Febrer	-2,9	6,5
Març	-0,3	6,6
Abril	1,9	13,6
Maig	6,2	17,51
Juny	11,1	21,67
Juliol	12,5	24,01
Agost	12,4	23,89
Setembre	8,8	19,96
Octubre	5,1	16,98
Novembre	-0,3	11,86
Desembre	-3,1	9,03
ANUAL	4,0	15,68

Taula 6.5. Temperatura de l'emplaçament.

6.3.4. Vent

És necessari estudiar també la velocitat del vent d'aquest emplaçament. Les dades mensuals s'han extret del programa Meteonorm i s'han adjuntat a continuació.

Velocitat del vent (m/s)	
Gener	6,4
Febrer	6,5
Març	6,6
Abril	6,3
Maig	5,6
Juny	5,5
Juliol	5,5
Agost	5,4
Setembre	5,3
Octubre	5,7
Novembre	6,4
Desembre	6,3
ANUAL	6,0

Figura 6.6. Velocitat del vent.

També s'ha calculat la velocitat màxima del vent a partir de les dades extretes de l'estació meteorològica més propera, la de Caborreu. La velocitat del vent màxima durant els últims 5 anys ha estat de 24,2 m/s, és a dir, 87,12km/h. També s'ha cregut oportú saber el gruix de neu màxim que ha sofert aquest emplaçament durant els últims 5 anys que és de 50 cm.

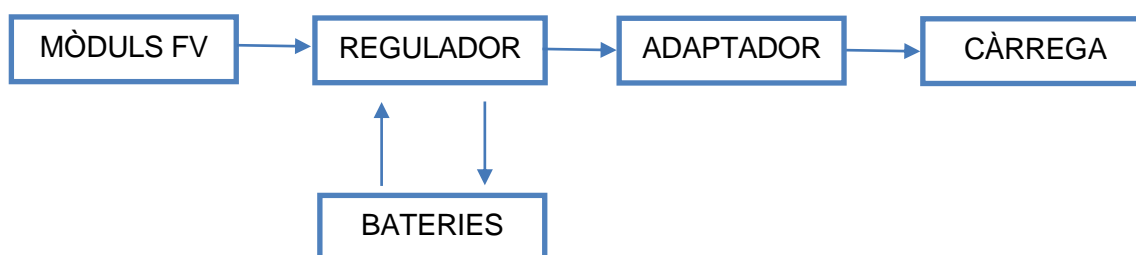
Aquets dos valors s'han de tenir en compte a l'hora de dimensionar i estudiar les estructures de suport de les instal·lacions ja que determinaran les seves càrregues mecàniques.

7. Central solar fotovoltaica

A continuació s'explica més detalladament els elements que formen la central fotovoltaica i posteriorment, amb el software PVSystem es fa el dimensionament i simulació de la planta, se'n extreuen els resultats, es fa l'anàlisi econòmic i finalment es calcula l'impacte ambiental.

7.1. Components d'una planta solar fotovoltaica

En general, l'esquema de connexió d'un sistema FV és el següent:



- MÒDULS: encarregats de transformar l'energia solar en energia elèctrica.
- BATERIES: garanteixen la font d'energia elèctrica per un període de temps concret.
- REGULADOR: controla el flux d'energia elèctrica dels mòduls a les bateries i a la càrrega connectada.
- ADAPTADOR: condiciona el senyal a les necessitats de la càrrega connectada.

7.1.1. Mòduls fotovoltaics

Una instal·lació fotovoltaica està formada per diferents conjunts de plaques solars, és a dir, molts mòduls fotovoltaics que a la vegada aquests, estan formats per una gran quantitat de cèl·lules fotovoltaiques tal i com s'ha vist a l'apartat 5.2.2.

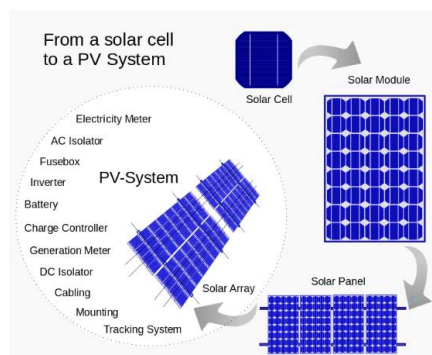


Figura 7.1. D'una cèl·lula fotovoltaica a un sistema FV.

Quan una cèl·lula solar fotovoltaica es connecta a una càrrega o consum i, alhora, és il·luminada pel Sol, genera una diferència de potencial entre els seus contactes que provoca la circulació dels electrons a través de la càrrega.

7.1.1.1. Corba Tensió - Intensitat

Així doncs, la cèl·lula solar és un generador de corrent i no pas de voltatge. Aquest principi és molt important a l'hora d'entendre com es comporta la cèl·lula davant les variacions dels principals paràmetres que l'afecten: radiació solar incident, voltatge de treball i temperatura de treball.

L'expressió més habitual i clara per mostrar el comportament de la cèl·lula solar és expressant el corrent que pot generar a una radiació solar determinada, en funció del voltatge al qual permet treballar la càrrega, és a dir, en funció de la impedància que hagi d'alimentar. Aquesta corba permet descriure alguns punts característics per catalogar, definir i comparar cèl·lules de diferents materials i/o fabricants.

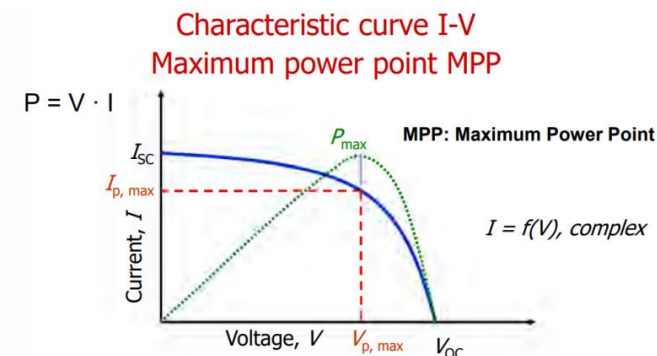


Figura 7.2. Gràfic representatiu dels paràmetres elèctrics d'una cèl·lula fotovoltaica.

On:

- **I_{sc}, Corrent de curtcircuit:** Quan el circuit està tancat i rep la irradiació del sol, apareix un corrent (I_{sc}), i la tensió és nul·la. Aquest valor correspon al tall de la corba I-V amb l'eix de les ordenades, és a dir, la intensitat quan el voltatge és 0.
- **V_{oc}, Voltatge de circuit obert:** quan la cèl·lula solar no té cap càrrega connectada i roman il·luminada, aleshores no hi ha circulació de corrent cap a l'exterior d'aquesta cèl·lula, és a dir, el voltatge quan la intensitat és 0.
- **MPP:** és el punt de màxima potència i té associats uns valors d'intensitat i de voltatge específics que es designen com a: I_{mpp} (intensitat del punt de màxima potència) i V_{mpp} (voltatge del punt de màxima potència). Aquest valor de potència,

igual que la corba I-V, varia a mesura que ho fa la radiació incident i la temperatura a la cèl·lula. Aquest punt també s'anomena potència pic o nominal quan fa referència a una radiació incident de 1.000 W/m^2 .

7.1.1.2. Factors que afecten a les característiques del conjunt FV

- Variacions amb la radiació incident:** el corrent i el MPP augmenten amb la irradiància.

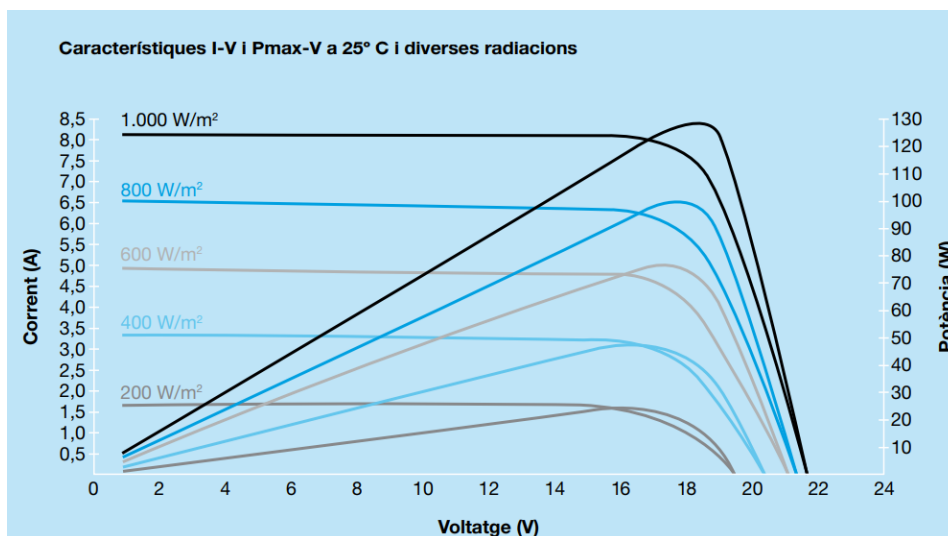


Figura 7.3. Gràfic representatiu dels paràmetres elèctrics d'un panell fotovoltaic en funció de la radiació incident [30].

- Variacions amb la temperatura de la cèl·lula:** l'escalfament de les cèl·lules per exposició a la radiació solar redueix el voltatge generat

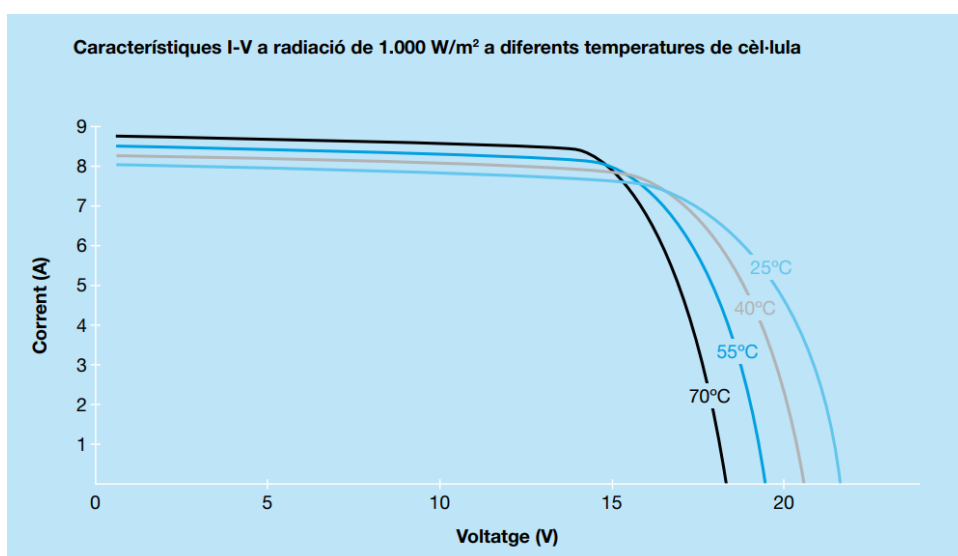


Figura 7.4. Gràfic representatiu dels paràmetres elèctrics d'un panell fotovoltaic en funció de la temperatura [30].

3. Potència pic o nominal (*Peak Power*): Si la corba característica depèn de la irradiació i de la temperatura, la potència generada pels panells també en dependrà. Per avaluar o comparar un mòdul fotovoltaic, els fabricants donen el valor de l'anomenada potència nominal que consisteix en la producció elèctrica generada (Wp) en condicions STC:

- ✓ Irradiància = 1000 W/m²
- ✓ T = 25°C
- ✓ Massa de l'aire: 1,5

7.1.2. Regulador i Bateries

El regulador és l'encarregat d'adaptar la tensió de sortida dels mòduls per tal de carregar la bateria a la intensitat òptima. A més a més, té les funcions d'aturar la càrrega de la bateria una vegada s'ha assolit el seu màxim i també, evitar que la bateria es descarregui cap als mòduls en hores sense llum.

Si no es posés un regulador entre les plaques i la bateria, la tensió de sortida dels mòduls s'adaptaria a la de la bateria, fent que treballés en un punt de la corba I-V qualsevol. Gràcies al regulador, es pot carregar la bateria de tal manera que les plaques estiguin treballant en el punt MPP, i així augmentar la seva eficiència.

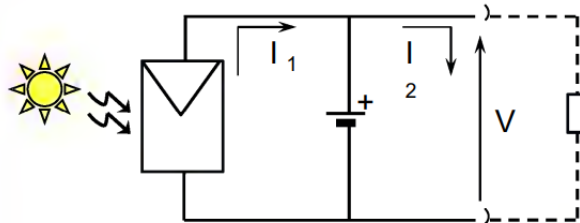


Figura 7.5. Funcionament normal de les bateries.

Per altra banda, la bateria o l'acumulador és un element opcional al circuit, pel fet que no és necessari per a la generació d'energia. Aquesta, és molt útil si el que volem és emmagatzemar l'energia per usar-la en un altre moment. Per a sistemes aïllats és molt interessant, ja que els permet guardar l'energia i utilitzar-la en moments quan no hi ha sol.

En aquest projecte però, aquesta funció no té sentit ja que l'energia generada s'injecta directament a la xarxa. Tindria sentit acumular l'energia, per exemple, en una casa aïllada amb plaques fotovoltaïques ja que es podria disposar d'aquesta a les hores que no hi

hagués sol. A més a més, és important tenir en compte que les bateries són un component molt car i amb una vida útil molt reduïda que suposaria un gran increment de la inversió inicial.

En conclusió, en aquest projecte, s'ha decidit no posar bateries i en conseqüència, no es necessita la implementació de reguladors.

7.1.3. Inversor

La funció d'un inversor és adaptar un voltatge d'entrada de corrent continu a un voltatge simètric de sortida de corrent altern, amb la magnitud i freqüència desitjada per l'usuari. Els inversors s'utilitzen en una gran varietat d'aplicacions, des de petites fonts d'alimentació per a ordinadors, fins a aplicacions industrials per controlar alta potència. Els inversors també s'utilitzen per convertir el corrent continu generat pels panells solars fotovoltaics en corrent altern i d'aquesta manera poder ser injectats a la xarxa elèctrica (com és el cas d'en el present projecte) o usats en instal·lacions elèctriques aïllades.

Es pot prescindir d'aquest aparell quan els equips a connectar puguin ser alimentats per corrent continu. Com és el cas d'alguns tipus d'il·luminació, motors i equips dissenyats per treballar amb energia solar.



Figura 7.6. Inversor d'una planta fotovoltaica

7.2. Disseny de la configuració tècnica

7.2.1. Panells fotovoltaics

Actualment, el mercat de les plaques solars fotovoltaïques està en ple creixement, el que implica que sigui molt volàtil. En un sol mes les millors opcions per a una mateixa aplicació poden canviar de manera radical a causa de la constant millora de models que ofereixen les diferents marques. A més a més, existeix un gran ventall de models de panells solars que aposten fortament per la recerca i el desenvolupament de nous models amb alts rendiments, eficiències i qualitats.

En primer lloc, s'expliquen alguns conceptes bàsics importants en relació als tipus de tecnologies que existeixen sobre els mòduls solars i que han servit d'ajuda per escollir quin és el millor panell per aquest emplaçament.

Com s'ha explicat en apartats anteriors, actualment, existeixen tres tipus principals de panells solars fotovoltaics segons la tecnologia de les cèl·lules: monocristal·lins, policristal·lins i amorfs. En general, la tecnologia monocristal·lina acostuma a ser més eficient que les altres dos però és menys econòmica.

Per altra banda, la potència que tenen les plaques és una característica molt important a tenir en compte quan es calcula la quantitat d'energia que es vol generar. Actualment, existeix una gran varietat de tipologies de mòduls fotovoltaics i, s'ha arribat a generar més de 400W per una sola placa.

Un altre paràmetre molt important és la potència per metre quadrat. Es tracta de la unitat de mesura que es troba a partir de la relació existent entre la potència generada per la placa i la seva superfície útil. L'alta eficiència, avui en dia, es considera un panell fotovoltaic que estigui per sobre del 19%, és a dir, 190W per cada metre quadrat instal·lat.

Existeixen moltes llistes de selecció de les millors plaques solars del mercat que s'actualitzen cada trimestre de l'any. Per tal d'escollir quins són els panells usats en el present projecte, s'ha utilitzat l'estudi realitzat per la OCU (Organització de Consumidors i Usuaris) l'any 2019-20. En aquest estudi, es van presentar moltes empreses amb les seves tecnologies d'última generació, i de totes aquestes, després de realitzar unes proves molt estrictes sobre el funcionament de les plaques, l'OCU les va puntuar en un *ranking* (Figura 7.7.) segons els paràmetres explicats anteriorment i els resultats dels tests establerts.

TOP 5 PANELLS SOLARS DEL RANKING DE LA OCU						
FABRICANT	MODEL	POTÈNCIA [W]	[W/m ²]	Puntuació OCU	Tec. Cel	Núm. Cèl·lules
SunPower	SPR-X21-345	345	214	97/100	Mono	96
Panasonic	VBHN325SJ47	325	194	94/100	Mono	96
Aleo	Aleo X59	310	184	86/100	Mono	60
QCells	Q.Peak-G4.1 305	305	176	77/100	Mono	60
REC	REC 280TP	280	171	94/100	Poli	120

Figura 7.7. Puntuació dels panells solars fotovoltaics del mercat actual [31].

En primer lloc, cal dir que qualsevol d'aquestes plaques anunciades a la Figura 7.7. per la OCU seria una bona inversió.

Els fabricants de plaques solars amb major eficiència són els de major qualitat. Tot i ser més cars, el rendiment a llarg termini compensa la inversió. Per exemple, un panell solar SunPower, als 25 anys està produint més d'un 90% de la seva potència nominal, quan un panell solar estàndard estaria al voltant del 80%. Segurament, la inversió inicial és més elevada però, també el rendiment i l'energia que generaran al llarg de la seva vida útil serà molt superior, fins i tot pot arribar a un 40-50% més de producció al llarg de la vida de la instal·lació. Així doncs, el preu no serà un condicionant en l'elecció de la placa, s'han d'analitzar molts més factors que, a la llarga, són molt més importants.

Per l'elecció definitiva de la placa, primer de tot, s'ha descartat el model del fabricant REC al no ser monocristal·lina tot i l'alta puntuació que ha rebut de l'OCU. D'altra banda, s'han descartat totes aquelles plaques que no superen els 190 W/m², és a dir, les que no tenen una eficiència alta, superior al 19%. Per tant, les clares guanyadores són les de la marca Panasonic i SunPower.

Tenint en compte tots els tests realitzats, s'ha escollit el panell solar més ben valorat per l'OCU, SunPower SPR-X21-345. El motiu d'aquesta elecció és degut també a que és un dels únics panells que no va perdre ni una mica de potència al realitzar els tests de tractaments tèrmics i mecànics. Davant d'una climatologia tan adversa com és l'alta

muntaña andorrana, és molt important que respongui bé davant aquestes condicions adverses. Aquest panell solar escollit, li han estat atorgats diversos premis, com el de màxima eficiència. A més, la marca ofereix 25 anys de garantia per a cadascuna de les seves plaques.

A l'Annex II, s'ha adjuntat la fitxa tècnica de la placa escollida. Tot i així, a continuació, s'ha explicat detalladament quines són les característiques d'aquesta placa:

SunPower SPR-X21-345	
Potència nominal (Pnom)	345 W
Tolerància	+5/-0 %
Eficiència del panell	21,5 %
Tensió al punt de màxima potència (Vmpp)	57,3 V
Corrent al punt de màxima potència (Impp)	6,02 A
Tensió de circuit obert (Voc)	68,2 V
Corrent de curtcircuit	6,39 A
Interval de temperatura de funcionament	-40°C a +85°C
Carrega màxima	Vent: 2400 Pa, 245 kg/m2 frontal i posterior. Neu: 5400 Pa, 550 kg/m2 frontal.
Cèl·lules solars	96 cèl·lules monocristal·lines Maxeon Gen III
Pes	18,6 kg

Figura 7.8. Dades elèctriques i condicions de funcionament del panell SUNPOWER SPR-X21-345 2020.

Les característiques que es mostren a la Figura 7.8 fan d'aquest disseny de mòdul solar un dels millors del mercat. Admet un gran marge de temperatures, de -40°C a +85°C i es tracta d'un panell molt lleuger, el que fa més fàcil la seva instal·lació.

A continuació, s'ha afegit un esquema de la placa solar per tal d'observar les seves mides,

per així poder realitzar els càlculs de disseny.

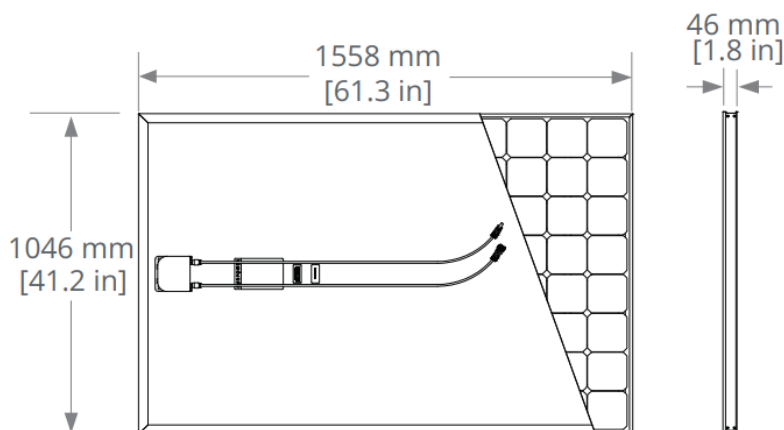


Figura 7.9. Mesures del panell SUNPOWER SPR-X21-345 2020.

7.2.2. Ubicació i ancoratge dels panells

Qualsevol implantació de sistemes sostenibles porta implícita l'optimització dels recursos que cal utilitzar. Aquesta és la base del disseny i del muntatge de les instal·lacions solars. Per aconseguir, de manera senzilla, l'aprofitament del Sol com a recurs energètic, és imprescindible el coneixement de la trajectòria solar, el perfil de les necessitats i dels condicionants de la ubicació.

Tot això comporta determinar l'orientació i la inclinació dels panells en instal·lacions fixes per tal d'aconseguir el mínim cost del quillowatt hora solar.

7.2.2.1. Orientació i inclinació

En primer lloc, cal definir quins són els principals paràmetres per a l'estructura dels panells:

- **Azimut:** L'azimut consisteix en l'orientació dels panells. A l'hemisferi nord, els panells miren cap al sud, mentre que a l'hemisferi sud passa el contrari i miren cap al nord.

- **Inclinació de mòduls fotovoltaics:** Aquest valor es calcula per optimitzar la irradiació rebuda pel panell i així decidir la inclinació més idònia.

Per tal de determinar quin és el valor òptim per aquests dos paràmetres, s'ha fet ús de la eina PVsyst. Prèviament, s'han entrat les dades meteorològiques del programa Meteonorm per tal de que el PCSyst pogués disposar de les coordenades geogràfiques del terreny i de l'altitud en la que es troba.

Per a les coordenades de l'emplaçament, l'orientació òptima dels panells és direcció sud

(Azimut=0°). Pel que fa a la inclinació òptima dels mòduls durant tot l'any, s'ha consultat al software i s'ha vist que és equivalent a 40°, amb aquesta disposició s'optimitza la relació entre producció i potència instal·lada, tot i que, per qüestions de disponibilitat d'espai o costos d'implantació, poden seleccionar-se altres disposicions.

Tenint en compte que el desnivell de la superfície del terreny de la instal·lació és d'uns 15 graus, caldrà que els panells tinguin una inclinació d'uns 25 graus més respecte la superfície de la muntanya.

A l'apartat 7.3.2. del present treball s'ha fet una petita explicació de com s'han obtingut aquests valors amb el programa PVsyst.

7.2.2.2. Estructura d'ancoratge i col·locació dels panells

L'estructura d'ancoratge dels panells és un dels elements de la instal·lació que està sotmès a esforços mecànics importants i a un alt grau d'agressió ambiental. Per això, cal que aquests factors es considerin en el disseny i en el muntatge d'una instal·lació solar fotovoltaica a fi de reduir la fatiga mecànica i la degradació de l'estructura. A l'hora d'establir el tipus d'ancoratge dels panells, també cal avaluar els condicionants imposats per a la ubicació de la instal·lació. Aquest factor delimita les característiques de l'estructura, especialment pel que fa a les condicions de fixació.

Els mòduls fotovoltaics van suportats per rengles d'estructures metàl·liques d'alumini planes ancorades al terra de la parcel·la.

La col·locació dels mòduls es realitza en posició horitzontal, ja que és el més òptim per minimitzar les pèrdues per ombrejat entre plaques de files consecutives. Això, és degut a la configuració elèctrica de les cèl·lules dels mòduls. Els díodes de bypass estan col·locats de tal manera que, si es posiciona de forma vertical, les ombres de les cèl·lules inferiors poden impedir el funcionament del panell per complet, és a dir, no produeixen energia. En canvi, si la posició es modifica, situat de forma horitzontal, tan sols s'inactiven aquelles files afectades per l'ombra, mentre que la resta del mòdul continua funcionant i produint energia, tal i com es mostra a la Figura 7.10 a continuació.

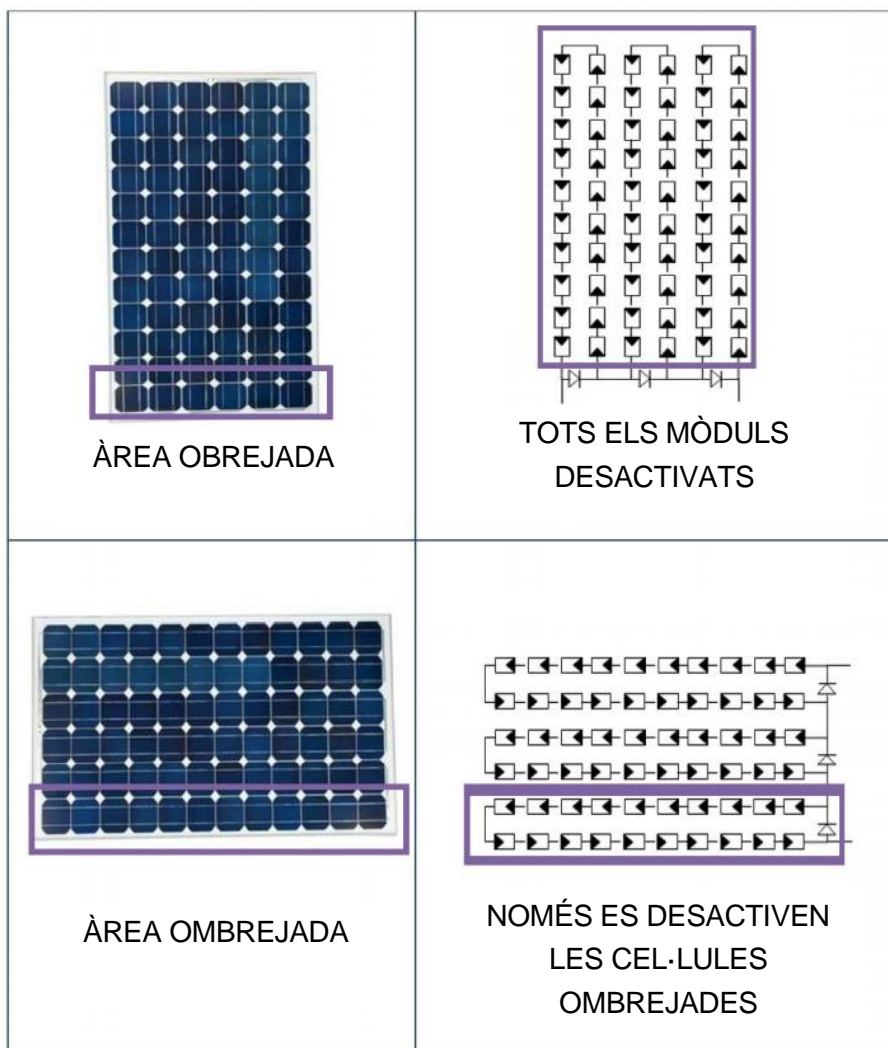


Figura 7.10. Diferència dels efectes d'ombreat dels mòduls connectats en vertical o horitzontal.

Per tal de no augmentar en excés la inversió econòmica del Parc Solar, s'ha implementat una estructura que és capaç d'integrar 3 plaques en paral·lel, tal i com es mostra a la Figura 7.11. en posició horitzontal.



Figura 7.11. Disseny de l'estructura de 3 plaques d'alumini.

7.2.2.3. Incidència d'ombres

Per assolir el màxim aprofitament d'un sistema d'energia solar, s'ha de tenir cura de la incidència de possibles ombres sobre els panells, tant les ombres properes (objectes que tapen momentàniament la radiació directa del Sol) com les llunyanes (elements de l'orografia i/o paisatge que oculten el Sol de la zona on se situa la instal·lació solar). L'efecte de les ombres s'ha d'avaluar amb força cura a l'hora de determinar la ubicació dels panells, ja que les ombres als panells produeixen una minva important de la producció, sobretot si es produeixen a les hores centrals del dia (màxima insolació).

7.2.2.3.1 Ombres properes

Per tal d'avaluar la incidència d'ombres d'obstacles pròxims, cal observar l'entorn pròxim comprès en la franja est-oest, en què no hi ha d'haver cap obstacle que pugui produir ombres sobre els panells solars per un període mínim de quatre hores de sol entorn del migdia del solstici d'hivern. Per garantir-ho, els panells s'han d'instal·lar a una distància mínima dels obstacles propers.

En l'objecte d'estudi, només s'han tingut en compte les ombres properes pel càlcul de la distància entre les diferents files de panells i les llunyanes causades per la orografia de l'emplaçament.

7.2.2.3.2 Ombres llunyanes

El fet de conèixer com pot afectar el relleu del paisatge una instal·lació solar pot ser clau a l'hora de decidir aspectes tan importants com el muntatge o la inclinació dels panells per tal d'aprofitar els mesos d'insolació directa o la mateixa ubicació en solars amb diferents possibilitats.

Per tal de conèixer si durant l'any algun element de l'entorn més o menys llunyà afectarà la insolació del camp de captació, cal conèixer l'evolució de les trajectòries que descriu el Sol al llarg dels diferents mesos de l'any. Aquestes trajectòries es poden consultar en diferents documents de referència. En aquest cas s'ha fet ús de la eina Meteororm.

En aquest gràfic hi ha representades les alçades solars (expressades com a angles d'elevació) en l'eix vertical i l'azimut en l'eix horitzontal. Si s'observa el paisatge des de la futura ubicació dels panells, es pot identificar els elements més importants, determinar el seu azimut i la seva alçada.

La comparació del perfil d'obstacles amb el diagrama de trajectòries del Sol permet calcular les pèrdues per ombres de la irradiació solar global que incideix sobre la superfície dels

panells en el decurs de l'any. En el cas que se situï algun obstacle en aquesta franja, s'ha de fer un estudi d'ombres i avaluar-ne la incidència sobre els panells.

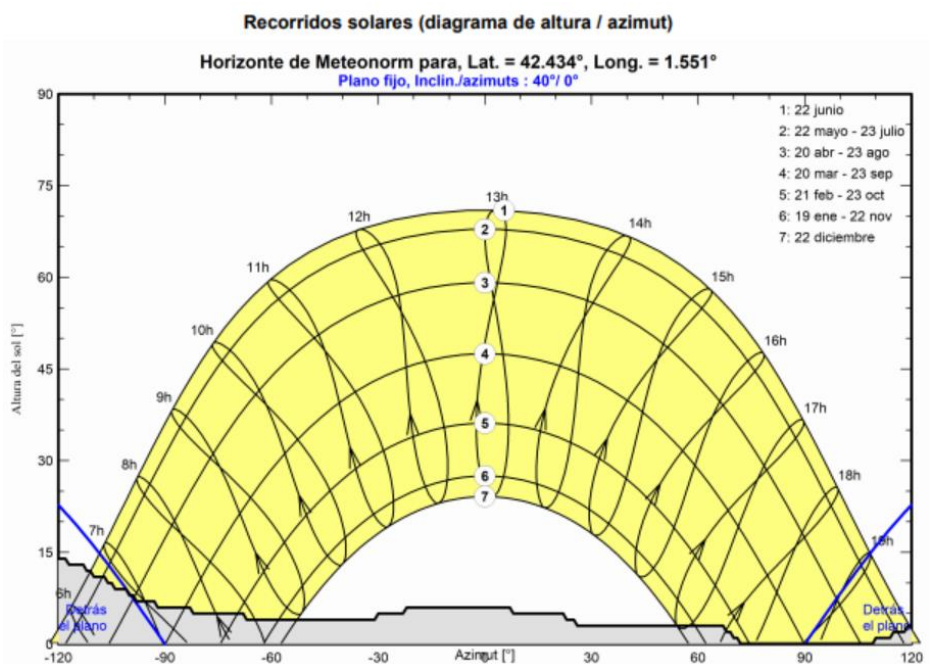


Figura 7.12. Horitzó del conjunt de plaques.

Així doncs, en aquest projecte s'ha fet el dibuix del diagrama del recorregut del sol i de l'horitzó mitjançant el programa Meteonorm i l'eina del PVSyst, Horitzó. D'aquesta manera, es tindrà en compte les ombres alhora de fer els càlculs de producció de la instal·lació.

7.2.2.3.3 Separació entre fileres de panells

La separació entre fileres de panells ha de garantir la no-superposició d'ombres entre les fileres els mesos del solstici d'hivern (21 de desembre, elevació de 25°).

En cas que la ubicació dels panells sigui sobre una superfície inclinada, per determinar la longitud de l'ombra, s'ha de sumar l'angle d'inclinació del pendent de la muntanya amb el de l'alçada solar, tal com s'indica a la Figura 7.13.

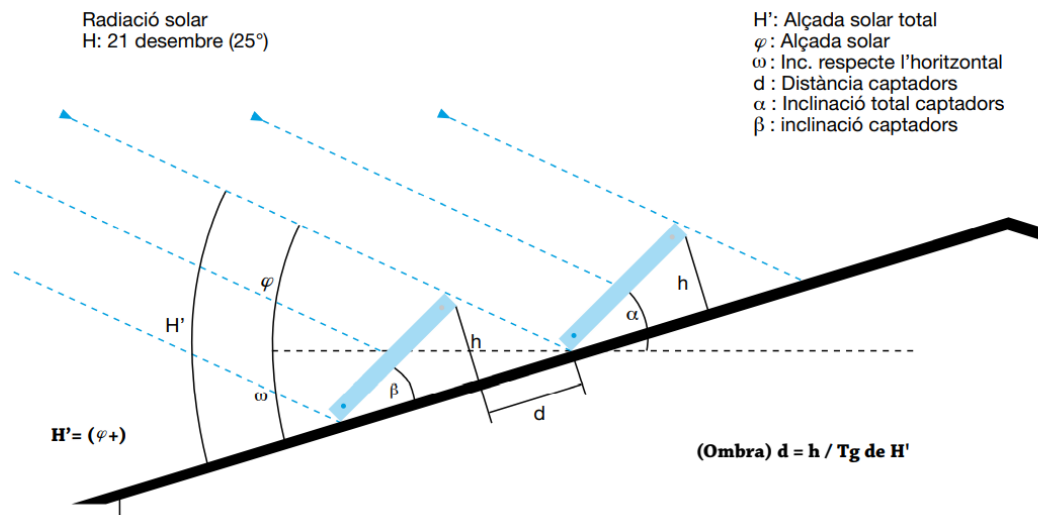


Figura 7.13. Representació gràfica dels paràmetres de càlcul de la distància entre línies de panells en una superfície inclinada [30].

L'alçada, h , s'ha calculat fent servir la següent expressió trigonomètrica:

$$h = \sin(\beta) \cdot l_{\text{panell}} \cdot n_{\text{plaques_estructura}} \quad (7.1)$$

On:

h és l'alçada total de l'estructura (m)

β és la inclinió del panell respecte la superfície del terreny ($^{\circ}$)

l_{panell} és l'alçada del panell fotovoltaic (m)

$n_{\text{plaques_estructura}}$ són el número de plaques consecutives muntades sobre la vertical de l'estructura

La distància mínima entre panells s'ha calculat de la següent forma:

$$d = \frac{h}{\tan(\varphi + \omega)} \quad (7.2)$$

On:

ω és l'angle que forma la superfície del terreny amb la horitzontal ($^{\circ}$)

φ és l'angle de l'alçada solar al solstici d'hivern respecte la horitzontal ($^{\circ}$)

La distància resultant obtinguda ha estat de 1,58 metres.

Es pot observar com el pendent del propi terreny provoca que la distància mínima entre plaques per a que no es facin ombra les unes amb les altres sigui molt petita. Tot i això, s'ha

decidit que la distància d'1,6m no és suficient per tal de tenir accés pel muntatge i manteniment dels mòduls ja que normalment s'hi ha d'accedir en tractor o en una mini-grua per tal de dur a terme aquestes tasques i per tant, es necessita que hi pugui passar.

La distancia total considerada és de 2,5m que és més restrictiva que la calculada anteriorment. A continuació, s'ha fet un esquema del posicionament de les estructures de les plaques solars.

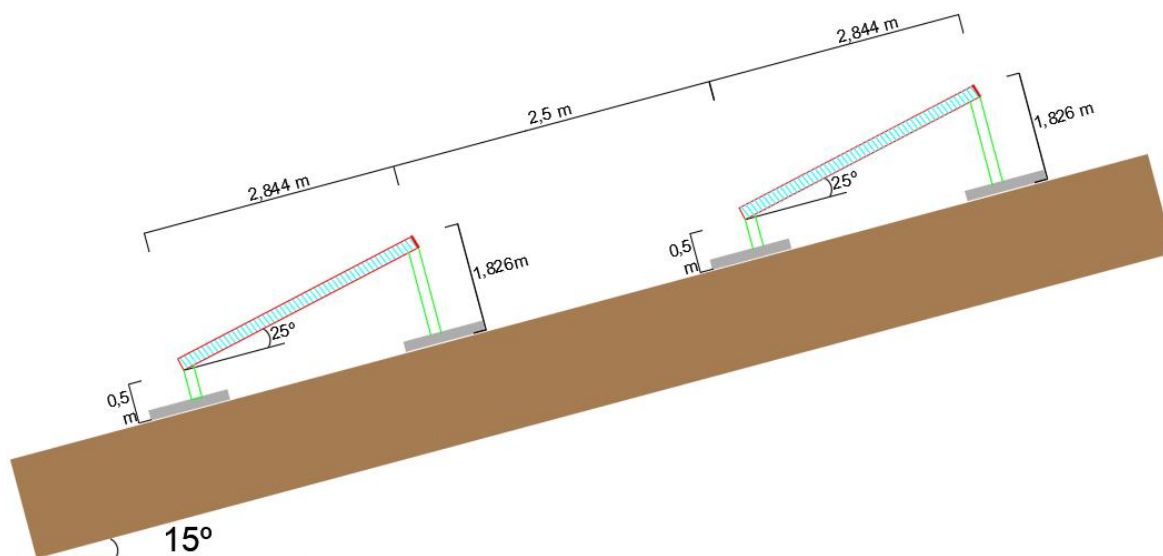


Figura 7.14. Detall de la disposició de les plaques fotovoltaïques. Font pròpia

7.2.3. Número de panells

Un cop definida l'orientació i la inclinació dels mòduls que formen part del parc fotovoltaic s'ha analitzat la superfície disponible per poder instal·lar el camp solar maximitzant la producció fotovoltaica, és a dir, el número de plaques solars per una concreta.

Es proposa distribuir les plaques dins de la parcel·la aprofitant al màxim la superfície disponible (60ha), tenint en compte les següents consideracions:

- S'ha de deixar una superfície destinada a les instal·lacions de serveis de l'hort, és a dir, als quadres elèctrics, inversors, estacions transformadores, etc.
- S'ha de deixar un perímetre de circulació d'amplada mínima de 4m.
- S'ha de deixar uns accessos centrals pels serveis de manteniment de mínim 2,6 m.
- Per evitar que les fileres de plaques fotovoltaïques es facin ombra entre elles, d'acord amb la latitud i amb l'azimut es deixarà una distància de 2,5 m.

- A la zona propera al riu o a la carretera tampoc s'hi podrà construir i s'haurà de deixar una distància mínima de 4m.

Així doncs, a partir de totes aquestes premisses, s'ha calculat que el número de mòduls fotovoltaics totals disponible per aquesta superfície és d'unes 150.000 plaques que correspon a una superfície útil disponible pels mòduls d'unes 24,5 ha. Sumant els espais lliures, la superfície del camp passa a un total de 42 ha.

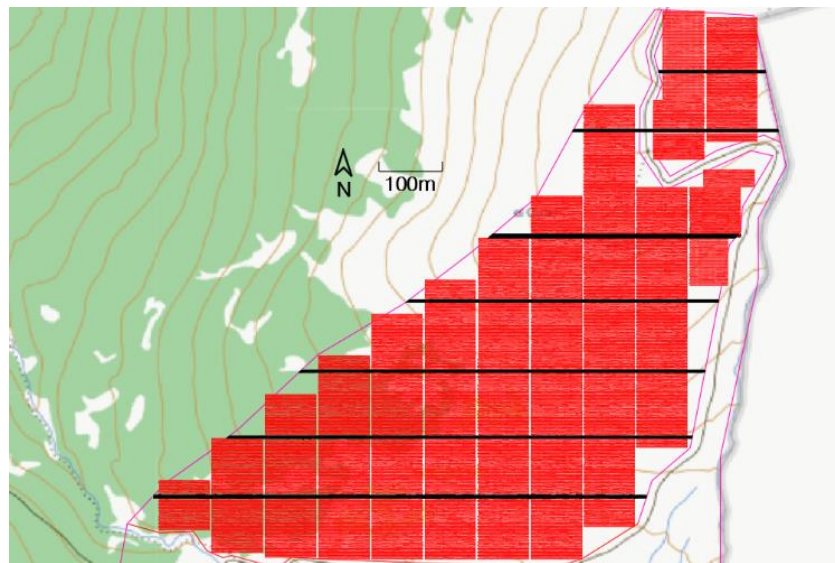


Figura 7.15. Disposició aproximada dels panells i els camins. Font pròpia

7.2.4. Inversor

Els inversors es poden classificar principalment en dos tipus: monofàsics i trifàsics. En el cas d'estudi, s'ha et ús d'inversors trifàsics ja que la potència del sistema és molt elevada.

En la central fotovoltaica, els inversors van connectats sota de les plaques solars tal i com es mostra a la Figura 7.16.



Figura 7.16. Posicionament dels inversors sota les plaques [30].

Per a l'elecció de l'inversor, s'ha consultat la biblioteca del programa PVsyst. Les condicions que s'han introduït han estat: el tipus de fabricant Genèric i que estiguin disponibles actualment. La llista que mostra el programa amb aquests filtres és la que s'observa a la Figura 7.17.

Fabricante		Generic			Disponibilidad	
					Disponible ahora	
Pnom	Rango MPP	transl	Frec.	Modelo	Disponibilidad	Especificaciones
3.0 kW	125 - 440 V	TL	50/60 Hz	3 kWac inverter	Desde 2012	Generic device
4.2 kW	125 - 500 V	TL	50/60 Hz	4.2 kWac inverter with 2 MPPT	Desde 2012	Generic device
4.2 kW	125 - 500 V	TL	50/60 Hz	4.2 kWac inverter	Desde 2012	Generic device
7.5 kW	150 - 750 V	TL	50/60 Hz	7.5 kWac inverter	Desde 2020	Generic device
9.0 kW	150 - 750 V	TL	50/60 Hz	9 kWac inverter	Desde 2020	Generic device
12 kW	350 - 600 V	TL	50/60 Hz	12 kWac, 2 unbalanced MPPT	Desde 2012	Generic device
12 kW	350 - 600 V	TL	50/60 Hz	12 kWac inverter with 2 MPPT	Desde 2012	Generic device
12 kW	350 - 600 V	TL	50/60 Hz	12 kWac inverter	Desde 2012	Generic device
30 kW	450 - 700 V	LF Tr	50 Hz	30 kWac inverter	Desde 2012	Generic device
60 kW	500 - 1450 V	VTL	50/60 Hz	60 kWac string inverter	Desde 2020	Generic device
500 kW	320 - 700 V	LF Tr	50 Hz	500 kWac inverter	Desde 2012	Generic device
1000 kW	700 - 1500 V	VTL	50/60 Hz	1000 kWac central inverter	Desde 2020	Generic device
2000 kW	800 - 1500 V	VTL	50/60 Hz	2000 kWac central inverter	Desde 2020	Generic device

Figura 7.17. Tipologies d'inversors.

Dins d'aquesta llista, s'ha volgut elegir un inversor amb una potència elevada per tal de tenir el menor nombre d'inversors possible. Els inversors més potents (2000kW i 1000kW) s'han descartat, ja que tenen un rang de tensió de funcionament poc ampli, que provoca que no es pugui produir energia en tot l'interval de voltatge que ofereixen les plaques seleccionades. Així doncs, s'ha elegit directament el següent inversor, el de 500 kW, ja que el rang de voltatge en el que treballa és prou ampli per a les plaques seleccionades.

7.2.5. Dimensionament del conjunt FV

7.2.5.1. Càlculs del conjunt

Per tal de calcular la quantitat de plaques que van connectades en sèrie, cal conèixer els voltatges mínims i màxims que és capaç de suportar l'inversor en les condicions funcionament. Aquest aparell treballa amb un rang de tensió entre 320V i 700V.

Per altra banda, el rang de voltatges de dimensionament de les plaques són: a 60°C de 52,5V i a -10°C de 75,9V.

Així doncs, amb aquests dos valors, s'ha trobat el número de mòduls que van connectats en sèrie.

$$\frac{V_{inv,min}}{V_{mpp=60^{\circ}C}} < N^{\circ} \text{ Panells en sèrie} < \frac{V_{inv,màx}}{V_{oc=-10^{\circ}C}} \quad (7.3)$$

On:

$V_{inv,min}$ és la tensió mínima de l'inversor (V)

$V_{inv,màx}$ és la tensió màxima de l'inversor (V)

$V_{mpp=60^{\circ}C}$ és la tensió que dóna el panell a 60 °C (V)

$V_{oc=-10^{\circ}C}$ és la tensió que dóna el panell a -10 °C (V)

El valor dels panells s'ha de trobar entre 6,095 i 9,2, valors extrets de l'equació (7.3).

Com que es pretén maximitzar el nombre de plaques en sèrie per tal de treballar a la màxima tensió que l'inversor pot admetre, l'elecció final són 9 plaques en sèrie. Per a una mateixa potència, si s'augmenta la tensió, la intensitat es redueix. Així doncs, si es limita a posar només 7 plaques en sèrie, per a una mateixa potència a produir, la intensitat seria més gran i per tant es necessitarien més inversors.

A continuació, s'ha procedit a calcular la quantitat de mòduls que van connectats en paral·lel a partir del número aproximat de panells totals que caben en aquest emplaçament i el número de panells en sèrie calculat anteriorment.

$$N^{\circ} \text{ de panells en paral} \cdot \text{lel} = \frac{N_{Total,panells}}{N^{\circ} \text{ panells en sèrie}} \quad (7.4)$$

El número de panells en paral·lel és de 16.667 cadenes.

Així doncs, amb aquests dos valors calculats, s'ha trobat la quantitat de panells totals de la planta sola FV.

$$N^{\circ} \text{ panells totals} = N^{\circ} \text{ Panells en sèrie} \times N^{\circ} \text{ de panells en paral} \cdot \text{lel} \quad (7.5)$$

Per tant, el número de plaques totals que es contempen pel camp solar és de 150.003 panells.

Per saber la quantitat de cadenes que té cada inversor s'ha fet servir la potència d'aquest i la potència generada per una cadena de 9 plaques col·locades en sèrie.

$$N^{\circ} \text{ de cadenes per inversor} = \frac{P_{\text{inversor}}}{P_{\text{panells en sèrie}}} \quad (7.6)$$

On:

P_{inversor} és la potència de l'inversor (kW)

P_{cadena} és la potència de la sèrie resultant de la multiplicació de les 9 unitats per sèrie i la potència del panell escollit (kW)

El número de cadenes en paral·lel per cada inversor són 161.

Finalment, s'ha procedit a calcular el nombre d'inversors que cal implementar en aquesta instal·lació fotovoltaica a partir del número de plaques totals i la quantitat de panells per cada inversor.

$$N^{\circ} \text{ inversors} = \frac{N^{\circ} \text{ panells totals}}{N^{\circ} \text{ panells per inversor}} \quad (7.7)$$

On:

$N^{\circ} \text{ panells totals}$ és el número total de panells solars de la central

$N^{\circ} \text{ panells per inversor}$ és el número de panells obtingut de la multiplicació del número de cadenes de panells per inversor i el número de panells en sèrie.

El número d'inversors que es necessiten és de 103 unitats.

A continuació, es mostra esquema explicatiu dels valors calculats en aquest apartat.



Figura 7.18. Esquema simplificat de la disposició del conjunt plaques-inversors.

7.2.5.2. Característiques del conjunt

En la corba tensió-intensitat del dimensionament del conjunt (veure Figura 7.19) és on es poden veure tots els valors explicats anteriorment. Per exemple, s'ha indicat de color lila el rang de tensió de funcionament de l'inversor. Per altra banda, en verd, la corba de dues temperatures de treball de les plaques (a 20° i 60°).

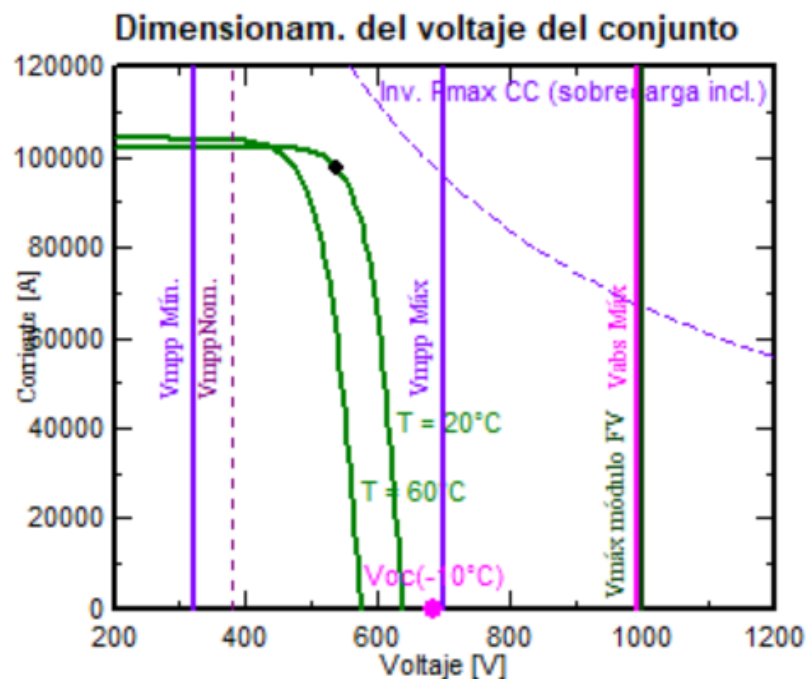


Figura 7.19. Corba I-V del conjunt FV.

Finalment, s'ha calculat la proporció de potència nominal, amb la següent expressió:

$$Prop.Pnom = \frac{Pnom_{placa}}{Pnom_{inversor}} \quad (7.8)$$

On:

$Pnom_{placa}$ és la potència nominal del mòdul fotovoltaic.

$Pnom_{inversor}$ és la potència nominal de l'inversor.

Molts proveïdors d'inversors recomanen una relació fixa de $Prop.Pnom$ (conjunt de mòduls FV/inversor), normalment de l'ordre d'1,0 a 1,1. En aquest projecte, el valor obtingut d'aquest rati ha estat de 1,005, dins dels valors requerits.

7.3. Modelització de la instal·lació FV

7.3.1. PVsyst

El PVsyst està dissenyat per ser utilitzat per arquitectes, enginyers i investigadors. A més, és una eina educativa molt útil. Aquest programari és un dels més antics i es va desenvolupar a Ginebra per la Universitat d'aquesta mateixa ciutat.

Aquest software permet a l'usuari realitzar el disseny, simulació i anàlisi d'una instal·lació fotovoltaica qualsevol, i ha estat l'utilitzat pel dimensionament fotovoltaic

7.3.2. Simulació del disseny del projecte

En aquest apartat s'han explicat tots els passos a seguir per tal de dur a terme la simulació de la central solar fotovoltaica a La Rabassa, Andorra.

En primer lloc, en obrir el programa, ha aparegut aquesta finestra on s'ha indicat el tipus d'instal·lació fotovoltaica a dissenyar. S'ha escollit la opció de disseny connectat a la xarxa.

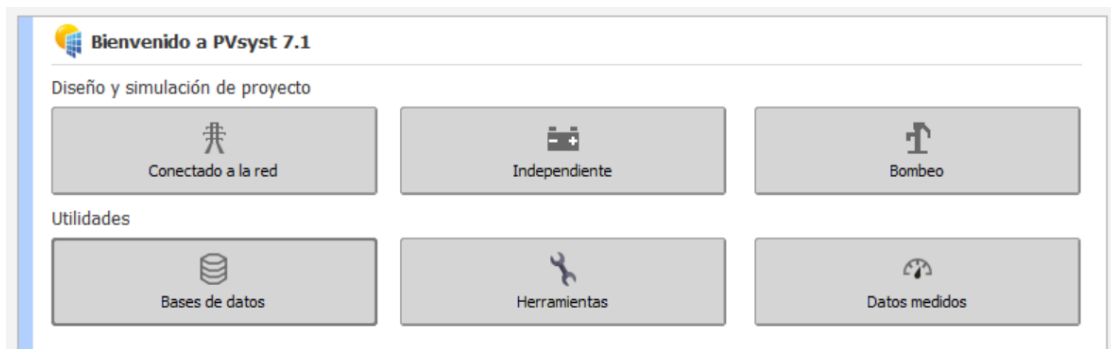


Figura 7.20. Elecció del tipus d'instal·lació.

A continuació, s'ha omplert el camp de les dades meteorològiques i s'ha importat el fitxer descarregat prèviament amb el programa Meteonrom.

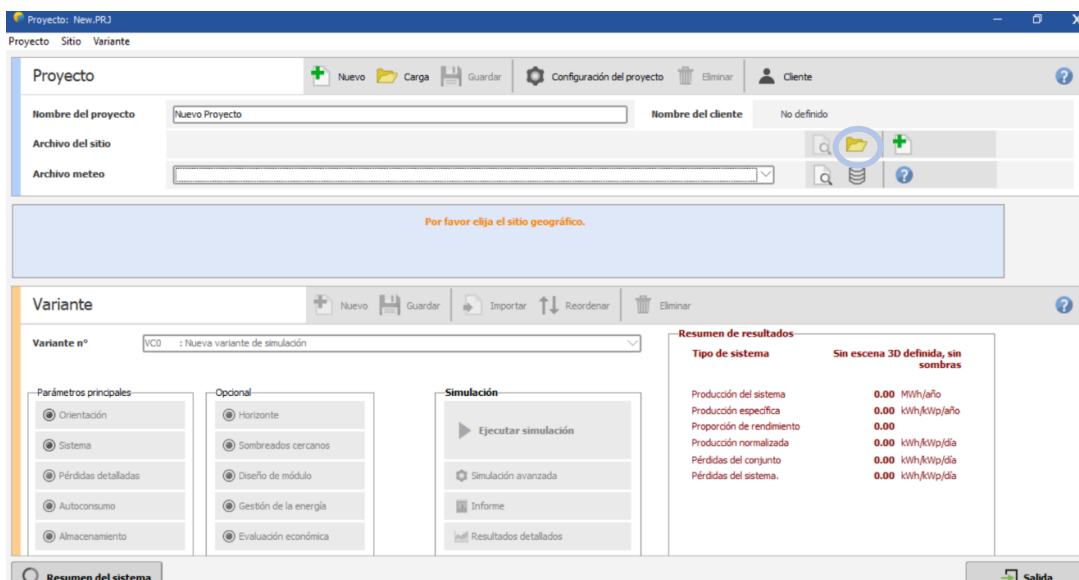


Figura 7.21. Pestanya general.

Tot seguit, s'ha procedit a inserir la orientació i inclinació de les plaques. S'ha introduït la inclinació dels panells a 40° i l'Azimut a 0° , sent aquests els valors òptims per a cada paràmetre optimitzant el rendiment anual de la instal·lació fotovoltaica (veure Figura 7.22).

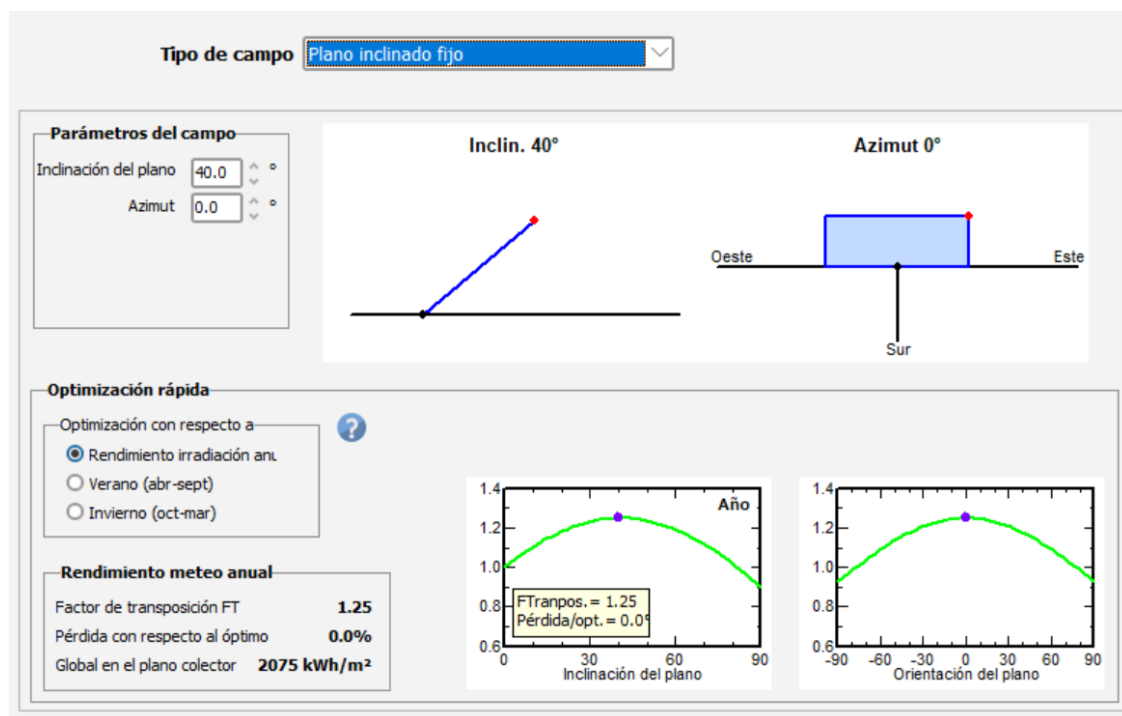


Figura 7.22. Orientació i inclinació dels panells.

A la Figura 7.22 s'observa com amb aquesta disposició s'aconsegueix que no hi hagi pèrdues en relació a l'òptim i un factor de transposició màxim d'1,25. Aquest factor, és la

relació entre la irradiació incident en el pla del panell i la irradiació horitzontal. És a dir, el que guanyes (o perds) en inclinar el pla del col·lector solar. D'aquesta manera, la orientació ja apareix de color verd, això vol dir que és correcte i que no queda cap paràmetre a definir.

Més tard, s'ha introduït el fitxer l'Horitzó al PVsyst de manera que les pèrdues per ombres llunyanes queden ben identificades per a la simulació posterior.

A continuació, s'ha entrat a la part del Sistema, on s'ha definit el tipus de mòdul fotovoltaic, el tipus d'inversor i la seva quantitat i el nombre de files i les cadenes de plaques.

Per tal d'arribar a un màxim de plaques disponible per a la superfície útil, s'ha decidit posar 103 inversors, 9 plaques en sèrie i 16.667 cadenes fent un total de 150.003 plaques amb una superfície útil de 24,5 ha. Així, a la Figura 7.23 següent es mostren tots els paràmetres establerts.

Subconjunto

Nombre y orientación del subconjunto
 Nombre: Conjunto FV
 Oriente: Plano inclinado fijo
 Inclinación: 40°
 Azmut: 0°

Ayuda de pre-dimensionamiento
 Sin dimensionamiento
 Ingrese potencia planeada: 0.0 kWp
 ... o área disponible(módulos): 0 m²

Selección del módulo FV
 Disponible ahora: Filtro: Todos los módulos F
 SunPower 345 Wp 50V Si-mono SPR-X21-345 Desde 2012 Manufacturer, Sanc
 Usar optimizador
 Voltajes de dimensionamiento: Vmpp (60°C) 52.5 V
 Voc (-10°C) 75.9 V

Selección del inversor
 Disponible ahora: Voltaje de salida 400 V Tri 50Hz
 Generic 500 kW 320 - 700 V LF Tr 50 Hz 500 kWac inverter Desde 2012
 50 Hz
 60 Hz
 Núm. de inversores: 103
 Voltaje de funcionamiento: 320-700 V Poder global inversor 51500 kWca
 Voltaje máximo de entrada: 1000 V

Diseño el conjunto

Núm. de módulos y cadenas
 Mód. en serie: 9 entre 7 y 11
 Núm. de cadenas: 16667
 Pérdida sobrecarga 0.1 %
 Proporción Pnom 1.00
 Núm. de módulos: 50003 Área: 244612 m²

Condiciones de operación
 Vmpp (60°C) 472 V
 Vmpp (20°C) 538 V
 Voc (-10°C) 683 V
 Irradia. plano 1000 W/m²
 Imp (STC) 97993 A
 Isc (STC) 102669 A
 Isc (en STC) 102669 A

Resumen sistema global
 Núm. de módulos 150003
 Área del módulo 244612 m²
 Núm. de inversores 103
 Potencia FV nominal 51751 kWp
 Potencia FV máxima 54274 kWCC
 Potencia de CA nominal 51500 kWCA
 Proporción Pnom 1.005

Potencia nom. conjunto (STC) 51751 kWp

Figura 7.23. Sistema definit.

Finalment, s'ha obtingut l'esquema elèctric simplificat de la instal·lació FV (Figura 7.24.). Al tractar-se d'una instal·lació amb connexió a la xarxa, es diferencien tres zones principals: PV Array, System i User. La primera, fa referència a la planta fotovoltaica instal·lada. Aquesta, es troba connectada al Sistema, que és on hi ha l'inversor, responsable de convertir l'energia elèctrica de corrent continu a corrent altern. L'Usuari fa referència a la utilització d'aquesta energia enlloc de la seva venda. Per exemple, si es volgués certa quantitat d'energia directament a una estació d'esquí, es derivaria directament i l'excedent aniria connectat a la xarxa. En el cas d'estudi, s'ha considerat que tota l'energia elèctrica produïda es ven directament a FEDA.

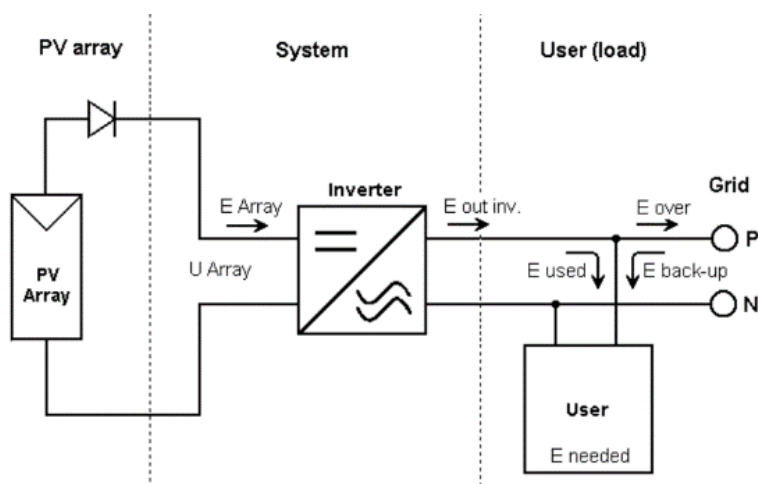


Figura 7.24. Esquema simplificat.

7.4. Resultats

En aquest apartat, s'expliquen els resultats obtinguts després d'haver realitzat la simulació del sistema fotovoltaic amb èxit.

7.4.1. Resum del Parc Solar

Primer de tot, s'ha fet una taula resum de la instal·lació fotovoltaica dividida en tres espais diferents (Figura 7.25, 7.26 i 7.27).

El primer fa referència al resum del projecte, és a dir, quines són les coordenades de l'emplaçament i la font de les dades meteorològiques emprades.

En segon lloc, s'ha fet un resum dels paràmetres del sistema, és a dir, s'ha indicat que les plaques tenen una estructura fixa amb una inclinació i azimuth de 40° i 0° respectivament, amb l'horitzó introduït prèviament. A part, s'ha indicat que la producció elèctrica és il·limitada ja que, el camp solar està connectat a la xarxa i per tant, es busca maximitzar-la. Per altra banda, el número de plaques que es preveu instal·lar a l'emplaçament de 60ha a La Rabassa és de 150.003 unitats amb una potència nominal de 51,75 MWp. A més, es vol col·locar 103 inversors amb una potència nominal total de 51,5 MWca i una proporció de potència nominal entre ambdós elements del sistema de 1,005.

Finalment, pel que fa als resultats de la configuració escollida, s'ha calculat la producció energètica anual que és de 92.388 MWh/any amb una producció específica de 1.785 kWh/kWp/any i una proporció de rendiment de 89,49%.

A continuació, es poden veure els valors obtinguts en aquest resum.

RESUM DE L'EMPLAÇAMENT		
Lloc geogràfic	La Rabassa, Andorra	
Situació	<i>Latitud</i>	42,434 °N
	<i>Longitud</i>	1,55 °E
	<i>Altitud</i>	2189 m
	<i>Zona horària</i>	UTC+1
Dades meteo	MeteoNorm File	100% satèl·lit

Figura 7.25. Emplaçament.

RESUM DEL CAMP SOLAR		
Tipus de sistema	Connectat a la xarxa	Càrrega il·limitada
Orientació del camp FV	Pla fix	
	<i>Inclinació</i>	40°
	<i>Azimut</i>	0°
Informació del sistema	Número de mòduls FV	150.003 unitats
	Potència nominal total mòduls FV [Pnom_panells]	51.75 MWp
	Número d'inversors	103 unitats
	Potència nominal total inversors [Pnom_inv]	51,5 MWca
	Proporció Pnom	1,005

Figura 7.26. Resum del camp solar.

RESUM RESULTATS		
Energia produïda total	92.388	MWh / any
Producció específica	1.785	kWh / kWp / any
Proporció rendiment PR	89,49	%

Figura 7.27. Resum dels resultats principals de la instal·lació dissenyada.

7.4.2. Resum de les característiques del conjunt FV

Pel que fa al conjunt FV, és a dir, als mòduls i inversors, s'ha adjuntat la Figura 7.28. on s'hi observen les diferents característiques d'aquests.

Així doncs, s'han elegit 150.003 mòduls FV de la marca SunPower de model SPR-X21-345 generant una potència nominal del conjunt de 51,751 MWp amb 9 mòduls en sèrie i 16.667 cadenes en paral·lel. La superfície útil total necessària pel camp solar és de 24,5 ha.

Per altra banda, s'han escollit 103 inversors amb una potència total del conjunt de 51,5 MW i amb voltatge de funcionament d'entre 320V a 700V.

CARACTERÍSTIQUES DEL CONJUNT FV		
Mòdul FV	Fabricant	SunPower
	Model	SPR-X21-345
	Potència nominal per unitat	345 W
	Número de mòduls FV	150.003 unitats
	Potència nominal total mòduls FV [Pnom_panells]	51.75 MWp
	Mòduls	16.667 Cadenes x 9 files
	Àrea cèl·lules	220.756 m ²
	Àrea mòduls	244.612 m ²
Inversor	Fabricant	Genèric
	Model	500 kWac inverter
	Potència nominal per unitat	500 kW
	Número d'inversors	103 unitats
	Voltatge de funcionament	320-700 V
	Potència nominal total inversors [Pnom_inv]	51,5 MWca

Figura 7.28. Característiques del conjunt FV.

7.4.3. Resultats principals

A la Figura 7.29., s'han indicat els balanços i els resultats principals de la simulació. En total es preveu una producció anual d'energia elèctrica injectada a la xarxa de 92.388 MWh/any.

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	MWh	MWh	proporció
Enero	67.5	24.54	-3.55	127.9	126.6	6368	6174	0.933
Febrero	85.3	27.90	-2.98	138.9	137.1	6831	6621	0.921
Marzo	130.9	46.88	-0.27	171.8	168.9	8294	8033	0.904
Abril	152.6	73.00	1.88	164.4	160.2	7914	7668	0.901
Mayo	181.8	73.28	6.26	174.9	170.2	8262	7994	0.883
Junio	206.4	72.85	10.95	187.8	182.8	8734	8459	0.870
Julio	231.8	73.06	12.60	218.1	212.8	10110	9802	0.868
Agosto	200.0	65.39	12.44	210.2	205.7	9762	9461	0.870
Septiembre	150.7	51.07	8.68	184.0	180.6	8664	8400	0.882
Octubre	106.3	42.69	5.12	156.6	154.1	7497	7266	0.897
Noviembre	73.6	25.82	-0.31	137.0	135.4	6767	6566	0.926
Diciembre	59.5	21.30	-3.09	123.3	121.8	6128	5942	0.931
Año	1646.3	597.76	4.02	1995.0	1956.1	95330	92388	0.895

Figura 7.29. Balanços i resultats principals.

On:

GlobHor és la Irradiació horitzontal global.

DiffHor és la Irradiació difusa horitzontal.

T_Amb és la Temperatura ambient.

GlobInc és la Irradiació global incident al pla receptor, és a dir, als mòduls.

GlobEff és la Irradiació global efectiva corregida

EArray és l'Energia efectiva a la sortida del conjunt de mòduls FV.

E_Grid és l'Energia injectada a la xarxa.

PR és la proporció de rendiment.

La última columna de la Figura 7.29., indica la proporció de rendiment mensual i anual de la planta que és del 89,5%, un valor considerablement elevat. Com més s'acosta al 100%, més eficaç és el funcionament de la planta fotovoltaica. De fet, mai es pot aconseguir aquest màxim ja que sempre es produeixen pèrdues inevitables en el funcionament. No obstant això, les plantes fotovoltaiques que tenen un PR superior al 80% es consideren d'alt rendiment.

La PR és la relació entre l'energia útil de la planta, respecte a l'energia que s'hauria produït si el sistema estigues contínuament treballant amb valors nominals STC (1000 W/m², 25°C). En aquest cas, l'energia disponible és *E_Grid*. L'energia produïda en condicions STC és igual a *GlobInc* multiplicat per $P_{nom_{placa}}$.

La fórmula usada per trobar el PR és:

$$PR = \frac{E_{Grid}}{GlobInc \cdot Pnom_{placa}} \quad (7.9)$$

El PR inclou les pèrdues òptiques (ombres, embrutiment), les pèrdues del camp solar (conversió fotovoltaica, envelliment, qualitat del mòdul, cablejat, etc...) i les pèrdues del sistema (eficiència de l'inversor connectat a la xarxa). Aquest indicador permet comparar la qualitat del sistema entre instal·lacions en diferents ubicacions i orientacions.

Pel que fa als resultats principals obtinguts (Figura 7.27.), s'ha indicat el valor de la producció específica de 1.785 kWh/kWp/any, és a dir, l'energia útil produïda pel sistema fotovoltaic per cada kWp instal·lat. En les diferents simulacions realitzades s'ha procurat sempre maximitzar aquest paràmetre ja que indica quina és la producció anual per kWp instal·lat a l'emplaçament i per tant, s'optimitza la superfície útil.

$$Producció\ específica = \frac{E_{Grid}}{Pnom_{placa}} \quad (7.10)$$

A continuació, es mostra un gràfic mensual de la producció energètica de la instal·lació. A més, s'han indicat les pèrdues dels captadors i les del sistema.

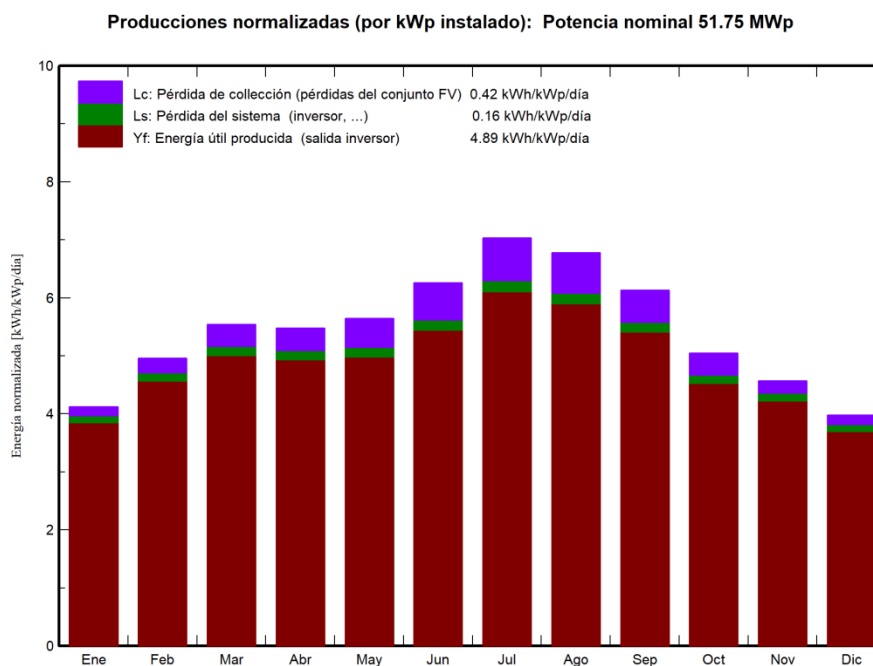


Figura 7.30. Producciones normalizadas.

On:

- Y_f = Producció específica per la instal·lació FV: és l'energia útil diària del sistema, referida a la potència nominal [kWh / KWp / dia].
- Y_a = Producció a la sortida dels mòduls: és l'energia de sortida diària del camp de col·lectors solars, en relació a la potència nominal [kWh / KWp / dia].
- L_s = Pèrdues del sistema = $Y_a - Y_f$, inclou la pèrdua d'inversors en sistemes connectats a la xarxa.
- Y_r = Producció del sistema de referència: és la producció ideal del conjunt segons la potència nominal definida pel fabricant, sense pèrdues. Cada kWh incident hauria de produir idealment la potència nominal dels mòduls durant una hora, expressada en [kWh / m² / dia].
- L_c = Pèrdues en els col·lectors = $Y_r - Y_a$, són les pèrdues del camp solar, incloses les pèrdues tèrmiques, les del cablejat, la qualitat del mòdul, etc...

Així doncs, $PR = Y_f / Y_r$, és l'eficiència global del sistema respecte a la potència nominal instal·lada i l'energia incident.

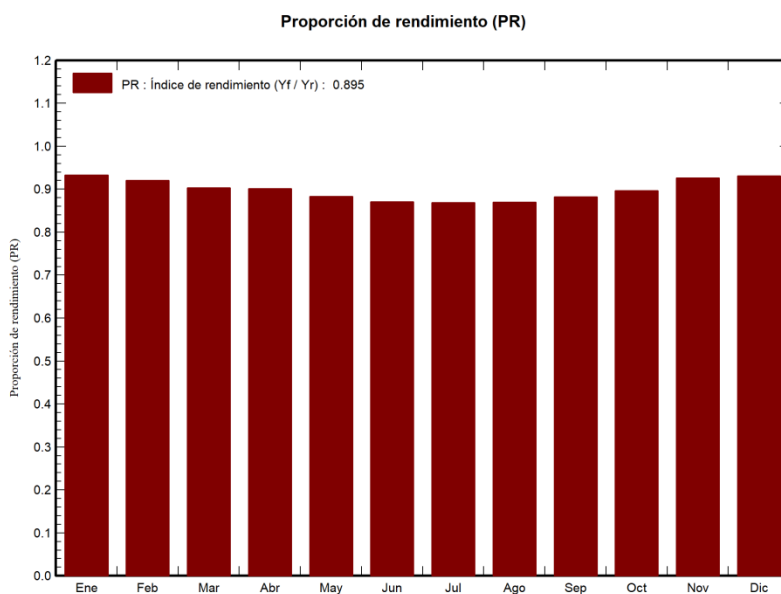


Figura 7.31. Evolució mensual del PR.

En definitiva, el PR i la producció específica són uns paràmetres importants en la indústria fotovoltaica que, sovint s'utilitzen com a condició contractual/garantia quan es posa en marxa un sistema fotovoltaic o per a la verificació del rendiment i la producció anual ja que aquests indicadors permeten comparar la qualitat del sistema entre diferents instal·lacions.

7.4.4. Diagrama de pèrdues

El diagrama de pèrdues proporciona una visió detallada de les principals fonts de pèrdues existents des que es rep l'energia provinent del sol fins que es converteix i es produeix l'energia elèctrica final de la instal·lació fotovoltaica. Aquest diagrama, permet avaluar l'impacte de les pèrdues sobre la producció global del sistema.

En primer lloc, a partir de la Irradiació Horitzontal Global anual de l'emplaçament (1646 kWh/m²), s'ha obtingut la Irradiació Efectiva incident en els col·lectors solars (1956 kWh/m²), corregint-la amb els ombrejats i el factor IAM (pèrdua de reflexió). Aquest últim, és un efecte òptic corresponent al debilitament de la irradiació que realment arriba a la superfície de les cèl·lules fotovoltaïques, respecte a la irradiació amb incidència normal.

Arribats a aquest punt, s'ha multiplicat la Irradiació Efectiva als col·lectors per la superfície que ocupen. D'aquesta manera, s'ha obtingut l'energia solar que arriba al panell que correspon a uns 478.461,07 MWh. Més tard, s'ha multiplicat per l'eficiència del panell (21,18%) en condicions STC i, s'ha obtingut l'energia nominal d'entrada al conjunt FV. El rendiment d'una placa fotovoltaica es calcula de la següent manera:

$$\eta_{placa} = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{P_{solar_{in}}} = \frac{P_{nom_{placa}}}{G \cdot S} \quad (7.11)$$

Aquí, s'ha hagut de restar les pèrdues degudes al nivell d'irradiància, a la temperatura de funcionament del panell, cables, etc. per tal d'obtenir l'energia que li arriba a l'inversor que és de 95.413 MWh. Finalment, tenint en compte les pèrdues degut a l'eficiència de l'inversor, s'ha trobat el valor de la producció energètica anual de la instal·lació fotovoltaica que és de 92.388 MWh/any.

Amb totes aquestes dades i usant la fórmula següent, s'ha pogut calcular el rendiment total de la instal·lació fotovoltaica que és del 19%.

$$\eta_{instal·lació_{FV}} = \frac{E_{Grid}}{GlobEff \cdot Àrea_{Mòduls}} \quad (7.12)$$

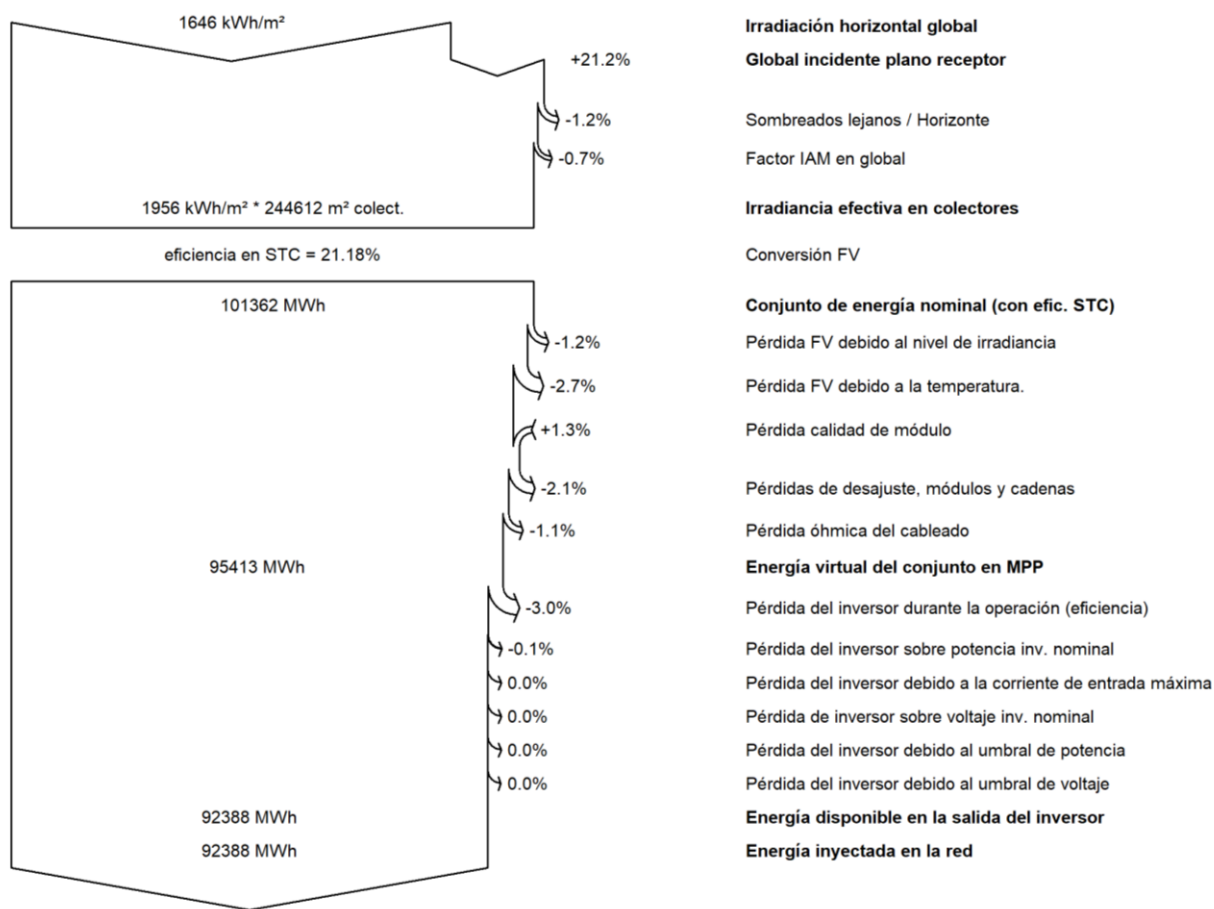


Figura 7.32. Diagrama de pèrdues.

7.5. Anàlisi econòmic

El cost total de la inversió és de 46.010.251€ amb un cost específic de 0,89 €/Wp. El funcionament anual de la central suposa un cost de 148.753,8€/any. Aquesta inversió es recuperarà amb un *pay back* de 5,5 anys. Així doncs, el LCOE (Levelized Cost Of Energy) té un valor de 22 cèntims el kWh (que s'igual a 22 €/MWh). A la Figura 7.33., s'han mostrat les dades econòmiques més rellevants d'aquest projecte.

AVALUACIÓ ECONÒMICA		
Inversió	Global	46.010.251 €
	Específic	0,89 €/Wp
Cost anual	Cost de funcionament	148.753,8 €/any
	Període de recuperació	5,5 anys
LCOE	Cost energètic	0,022 €/kWh

Figura 7.33. Avaluació econòmica de la central fotovoltaica.

Seguidament a la Figura 7.34. s'han mostrat els costos totals de sistema fotovoltaic. Tenint en compte que l'energia injectada a la xarxa anual és de 92.388 MWh/any i que la vida útil de la instal·lació és de 25 anys, s'ha trobat el valor del LCOE. També, cal dir que existeix una taxa d'interès del 3% anual que s'ha tingut en compte per tal de realitzar el càlcul.

El LCOE representa el preu de cada kWh d'energia calculat de la següent forma:

$$LCOE = \frac{\text{Suma de costos durant la vida útil}}{\text{Suma de l'energia elèctrica produïda durant la vida útil}} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (7.13)$$

On:

I_t és el cost de la inversió a l'any t (€)

M_t és el cost de manteniment i operació a l'any t (€)

F_t és el cost del combustible a l'any t (€)

E_t és l'energia generada a l'any t (kWh)

r és la taxa d'interès (%)

n és el la vida útil esperada de la instal·lació

El valor del LCOE és exactament de 21,53 €/MWh, un valor dins dels rangs esperats per aquest tipus de centrals.

COST DE LA INSTAL·LACIÓ				
	Article	Quantitat	Cost	Total [€]
Mòduls FV	SPR-X21-345	150.003 ut.	280 €/ut.	42.000.840
	Estructura suport pels mòduls	50.001 ut.	52 €/ut.	2.600.052
Inversors	500 kWac inverter	103 ut.	3.900 €/ut	401.700
Estudis i anàlisi	Enginyeria	810 h	8 €/h	6.480
	Meteonorm	1 ut.	623 €/ut	623
	PVsyst	1 ut.	556 €/ut	556
Instal·lació	-	-	-	1.000.000
Total				46.010.251 €

COST D'OPERACIÓ		
	Concepte	Total [€]
Manteniment	Salaris	75.000
	Reparació	15.000
	Neteja	12.000
TOTAL		102.000 €
Incloent inflació del 3%		148.753,8 €

Figura 7.34. Cost del sistema FV.

Per altra banda, l'anàlisi financer de la instal·lació fotovoltaica s'ha adjuntat a continuació:

ANÀLISI FINANCER		
Període de simulació	Vida del projecte	25 anys
	Any d'inici productiu	2023
Variació de l'ingrés al llarg del temps	Inflació	3%
Finançament	Fons propis	46.010.251 €
Venda de l'electricitat	Tarifa d'alimentació	0,09 €/kWh
	Duració de la tarifa	25 anys
	Variació de la tarifa anual	1 %/any
Retorn de la inversió	Període de recuperació	5,5 anys
	Valor actual net (VAN)	183.088.076,73 €

Figura 7.35. Anàlisi financer.

Així doncs, al final de la vida útil del projecte s'haurà extret un benefici net de la instal·lació de 183,09 M€ i s'haurà recuperat la inversió al cap de 5,5 anys.

També s'ha adjuntat el gràfic de la Figura 7.36. on s'aprecia de forma visual el flux de caixa acumulatiu en funció dels anys.

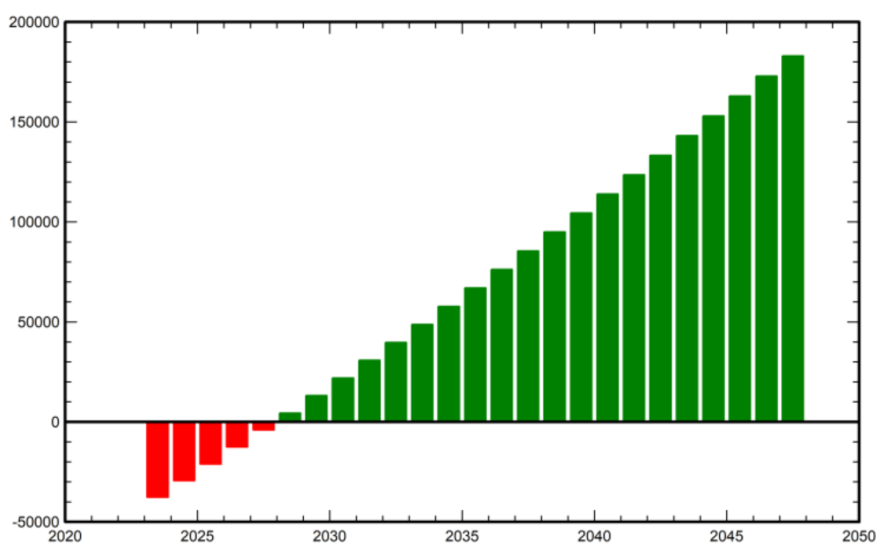


Figura 7.36. Flux de caixa acumulatiu.

7.6. Estudi ambiental

En aquest apartat, s'ha estimat l'estalvi d'emissions de CO₂ esperat per a la instal·lació fotovoltaica. La base d'aquest càlcul són les anomenades Emissions del Cicle de Vida (LCE), que representen les emissions de CO₂ associades a un determinat component o a una quantitat d'energia. Els diferents valors d'emissions associats inclouen el cicle de vida total, és a dir, la producció, el funcionament, el manteniment, etc.

La premissa que s'ha considerat per al balanç de carboni és que l'electricitat produïda per a la instal·lació fotovoltaica substituirà la mateixa quantitat d'electricitat a la xarxa existent. Si la petjada de carboni de la instal·lació fotovoltaica per kWh és menor que la de la producció d'electricitat a la xarxa, es produirà un estalvi net d'emissions de diòxid de carboni.

Dit això, a continuació es presenten quatre factors claus per tal de calcular el balanç total d'emissions de la instal·lació fotovoltaica:

1. **Energia de la xarxa (E Red):** la producció elèctrica del sistema FV durant un any (92.388 MWh/any). A més, s'ha definit una degradació anual d'aquest valor, que es defineix per defecte de l'1%, i que representa una disminució anual del rendiment energètic a causa de l'envelliment dels components fotovoltaics.
2. **Vida del projecte:** és la vida útil de la instal·lació fotovoltaica en anys. Determina, juntament amb el valor de E Red, la quantitat total d'energia que serà substituïda per la instal·lació fotovoltaica. En aquest cas, s'ha pres un valor de vida útil de 25 anys.
3. **LCE de la xarxa (LCE Red):** es dóna en gCO₂ / kWh i representa la quantitat mitjana d'emissions de CO₂ per unitat d'energia que genera l'electricitat produïda per la xarxa. En aquest projecte s'ha pres el valor de 182 gCO₂/kWh ja que s'ha fet la mitjana ponderada entre el valor produït a França (77 gCO₂/kWh) i a Espanya (287 gCO₂/kWh), procedències de l'energia de la xarxa andorrana.
4. **LCE de la instal·lació FV (Sistema LCE):** es dóna en tCO₂ i representa la quantitat total d'emissions de CO₂ causades per la construcció i el funcionament de la present instal·lació fotovoltaica estudiada. Tenint en compte el lloc de fabricació de cada element, s'ha trobat un valor estimat de 63.535,6 tCO₂.

A continuació, s'ha adjuntat la Figura 7.37, on es poden observar els valors i els càlculs fets per aquest projecte en concret, resultant un estalvi d'emissions de 310.048,318 tCO₂.

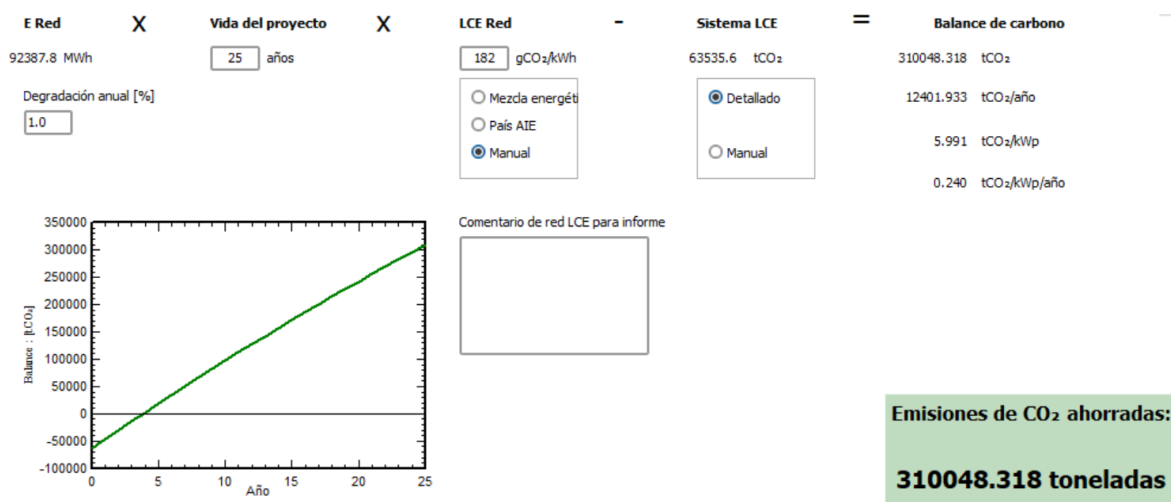


Figura 7.37. Càlcul del balanç de CO₂.

La dificultat del càlcul rau en la recerca de valors adequats per a la LCE de les diferents contribucions. Sovint aquestes dades es coneixen amb poca precisió. L'eina PVsyst proposa valors per a les emissions del cicle de vida que seran les usades per la instal·lació fotovoltaica. Aquests valors es basen en dades disponibles públicament de diverses institucions.

Així doncs, després d'haver realitzat aquest estudi s'ha arribat als següents resultats d'emissions de CO₂:

- Les emissions de CO₂ totals estalviades al llarg de la vida útil prevista de la instal·lació són de 310.048,318 tCO₂.
- L'estalvi anual d'emissions de CO₂ és de 12.401,93 tCO₂/any.
- L'estalvi d'emissions de CO₂ per potència instal·lada és de 5,991 t CO₂/kWp
- L'estalvi anual d'emissions de CO₂ per potència instal·lada és de 0,24 tCO₂/kWp/any

Els valors anuals obtinguts s'han calculat al llarg de tota la vida, tenint en compte la degradació anual. A continuació, s'ha fet una taula resum amb tots els valors explicats anteriorment.

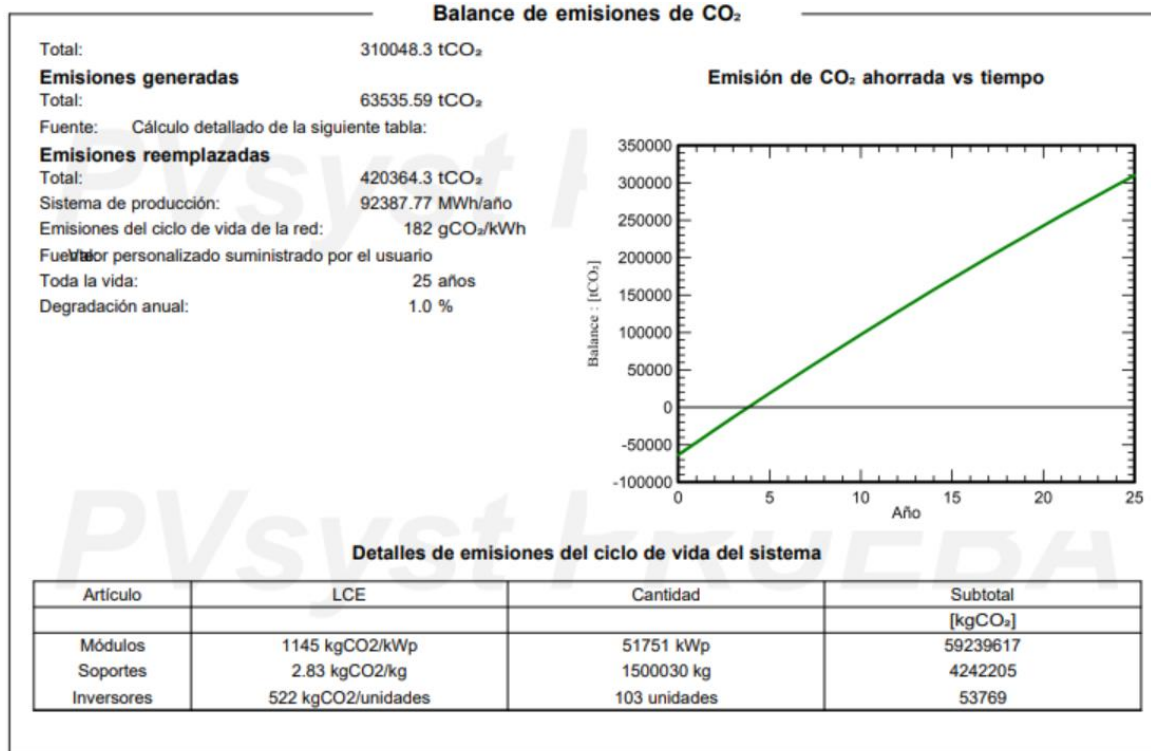


Figura 7.38. Balanç d'emissions de CO₂.

8. Central termosolar amb concentradors cilíndrics parabòlics

En aquest primer apartat del capítol 8 s'explica amb més profunditat el funcionament de les plantes termosolars amb concentradors cilíndrics parabòlics, posteriorment mitjançant el software SAM es fa el dimensionament i simulació de la planta, se'n extreuen els resultats, es fa l'anàlisi econòmic i finalment es calcula l'impacte ambiental.

8.1. Parts més importants de la central termosolar

8.1.1. Camp solar

Els components més importants del camp solar són els col·lectors cilíndrics parabòlics, els tubs receptors i el sistema d'emmagatzematge. L'elecció d'aquests elements ha estat en base a les característiques requerides per la planta.

8.1.1.1. Col·lector solar

Des de la implementació de les primeres centrals termosolars a finals dels anys 70 i principis dels 80 als Estats Units, els col·lectors cilíndrics parabòlics han tingut una gran evolució, i gràcies a nombrosos projectes d'investigació, actualment el mercat disposa de models molt eficaços amb alts rendiments òptics i tèrmics.

L'objectiu dels col·lectors és concentrar la radiació solar al tub receptor. Per aconseguir això, el col·lector té una forma còncaua de manera que dirigeix els rajos solars directes que li arriben a un mateix punt, anomenat focus. Pot arribar a temperatures força altes depenent del fluid treball, des de 400°C treballant amb olis tèrmics, fins a 550°C amb sals foses. Els col·lectors consten d'uns miralls reflectants capaços de treballar a aquestes altes temperatures gràcies a les pel·lícules que els recobreixen, normalment de plata o d'alumini. Aquests es troben situats sobre l'estructura que els suporta donant-los estabilitat.

Els col·lectors solen estar formats per 8 o 12 mòduls de 12 metres de longitud i 6 metres d'amplada. Cada mòdul té tres tubs receptors units de 4 metres. El conjunt de col·lectors s'agrupen en llaços, connectant 4 o 6 col·lectors en sèrie. L'elecció exacte d'aquestes números es fa en funció de diferents paràmetres com la irradiació, la velocitat del fluid tèrmic

en els tubs receptors i el seu flux màssic.

Cada llaç individualment eleva la temperatura del fluid a la temperatura requerida pel sistema, ajuntant el cabal de tots els llaços a un col·lector principal cap a on el fluid es dirigeix als intercanviadors del sistema d'emmagatzematge i del cycle de potència.

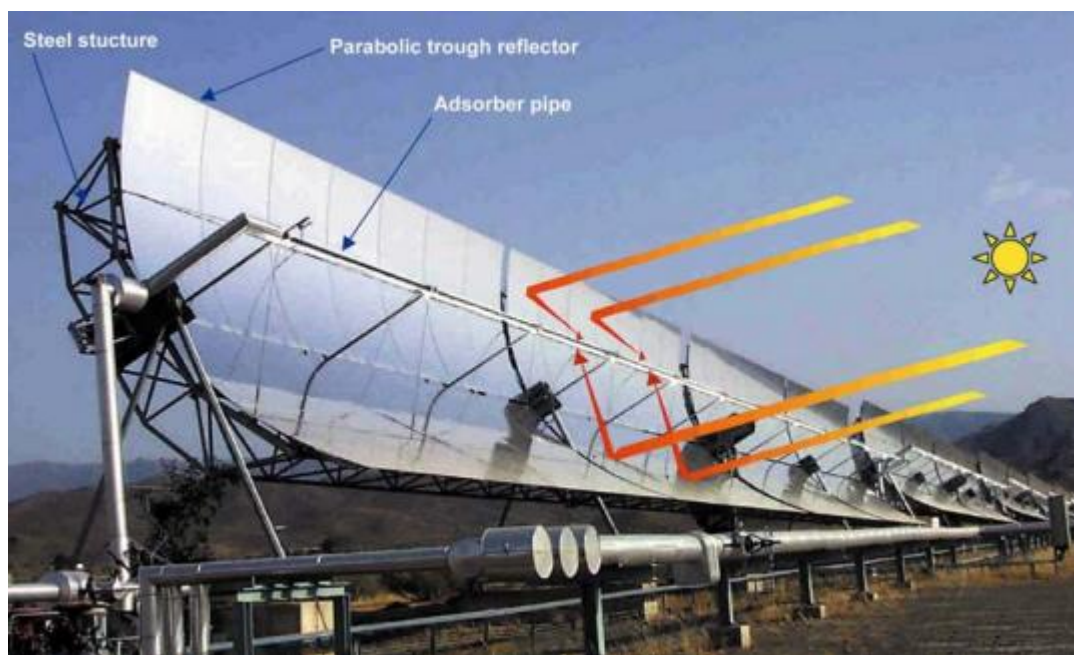


Figura 8.1. Parts dels concentradors cilíndrics parabòlics [24].

En la Figura 8.1 es poden apreciar els mòduls que formen els col·lectors i les canonades per on circula el fluid caloportador del camp solar.

L'estructura és d'alumini o acer i es fa conjunta per a cada col·lector, limitant a 12 mòduls i fent un límit de 150 metres lineals per col·lector. El límit ve marcat pel sistema mecànic o hidràulic que orienta l'eix parabòlic i per les càrregues meteorològiques i estructurals que ha d'aguantar.

L'eix de seguiment és el que li dóna la capacitat de modificar la seva direcció, adequar-se al moviment dels rajos del sol durant el dia, i a adoptar posicions més segures en cas de produir-se vents forts o nevades abundants. La posició que adopta en els dos casos és la que es mostra en la Figura 8.2 següent, una posició que li permet disminuir l'efecte vela o que la neu caigui pel seu propi pes.



Figura 8.2. Posició de seguretat dels concentradors solars en condicions de vent elevades [24].

Tot i això, és important realitzar un estudi de les característiques geològiques del terreny i determinar les càrregues degudes al pes propi dels col·lectors, al pes de la neu i a les degudes a la velocitat del vent. Aquestes càrregues s'hauran de traduir en una bona cimentació i estructura capaç de suportar-les.

S'utilitzen dos sistemes de seguiment com s'ha explicat a l'apartat 5.3.1.1, direcció nord-sud i direcció est-oest. Cada orientació té unes característiques diferents i la seva elecció depèn de l'aplicació i de l'època de l'any en la que es necessita més energia. El seguiment nord-sud és idoni per plantes que el que volen és potenciar la generació durant tot l'any, i sol ser empleada per ubicacions entre latituds de 30° i 45° . Al només poder-se moure en aquest eix, no pot adequar la seva inclinació a la inclinació del Sol durant l'any, de manera que durant alguns mesos no està en una posició òptima i conseqüentment no és tan eficient. Tot i això, tenint en compte que a Andorra a l'hivern hi ha temperatures força baixes amb fins i tot nevades, algunes d'elles abundants, l'orientació nord-sud esdevé la idònia per aquesta instal·lació.

Com a referència, a Espanya totes les centrals termosolars que hi ha tenen una orientació nord-sud. La central d'Andasol, tal i com es pot veure a la Figura 5.8 de l'apartat 5.3.1.1, fa un seguiment anual nord-sud en les seves tres plantes de generació.

8.1.1.2. Tub Receptor

En la línia focal dels reflectors cilíndrics parabòlics, se situa el tub receptor. És l'encarregat de transmetre la radiació solar al fluid de treball aconseguint un augment de temperatura.

Aquest element consta d'un tub metàl·lic i una carcassa de vidre concèntrica al anterior. Entre els dos tubs es fa el buit per tal de reduir les pèrdues tèrmiques per convecció i l'aparició d'oxidació.

El fluid de treball passa per dins del tub metàl·lic. Aquest és d'uns 70 mm de diàmetre tot i que el model, i conseqüentment el diàmetre, depenen del cabal i velocitat del fluid necessari per refrigerar el tub receptor. El recobriment està fet de capes metàl·liques i de cermet. El problema d'aquest recobriment és que a altes temperatures (per sobre els 400°C) i en contacte amb aire fa aparèixer oxidació i degradació. Per disminuir aquest fenomen s'aïlla el tub metàl·lic fent el buit entre ells com s'ha esmentat.

Un altre problemàtica que s'ha d'evitar en el tub de vidre és el vinclament degut a un gradient de temperatura elevat. Això passa quan la velocitat del fluid per dins el tub no és suficient, de manera que la part inferior del tub s'escalfa molt més que la part superior, i el fa deteriorar fins al punt que pot arribar a trencar-se. Per pal·liar aquesta dilatació, se solda a un extrem del tub una molla metàl·lica per intentar absorbir aquestes variacions de longitud.

Per mantenir el buit s'utilitzen uns elements anomenats *getters* col·locats sobre el tub metàl·lic. Aquest element absorbeix els gasos que poden aparèixer entre els dos tubs. En la següent Figura 8.3 es pot apreciar aquest sistema.

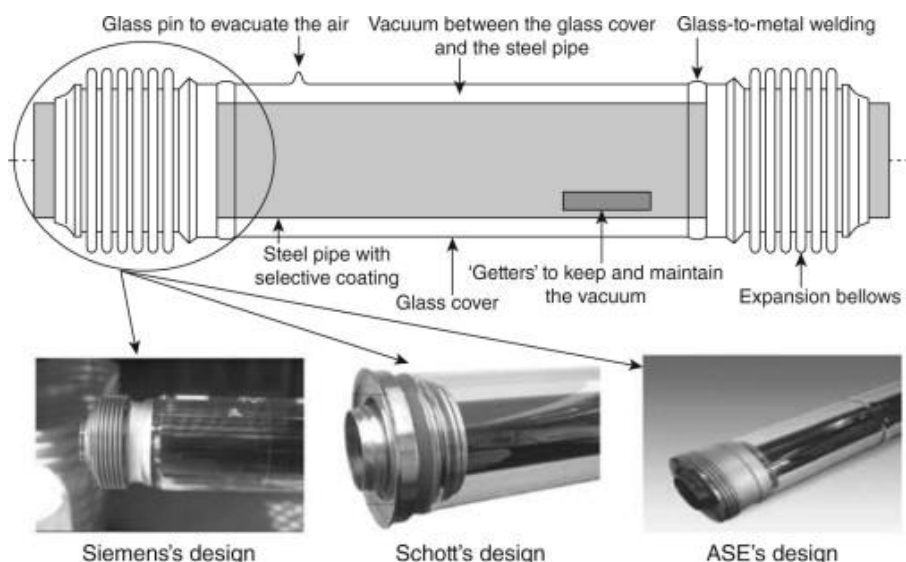


Figura 8.3. Parts dels tubs receptors [24].

8.1.1.3. Sistema d'emmagatzematge

El sistema d'emmagatzematge és opcional, encara que avui dia s'està instal·lant en totes les centrals pels grans avantatges que comporta. Amb un sistema d'emmagatzematge s'augmenta el número d'hores d'utilització del cycle de potència i producció de la central. Això s'aconsegueix emmagatzemant energia sobrant durant el dia i utilitzant-la en hores de poca radiació. A més a més, també ajuda a reduir els transitoris de la mateixa manera que el número de parades i engegades de la central.

El funcionament de la central amb sistema d'emmagatzematge és el següent: l'oli arriba al intercanviador del cycle de potència que genera vapor per moure la turbina. Quan la turbina arriba al seu màxim i no necessita més cabal de vapor, l'oli sobrant s'envia al intercanviador de l'emmagatzematge. Un cop allà intercanvia la seva energia amb un altre fluid. És important que l'oli quan surti de l'emmagatzematge i del intercanviador del cycle de potència ho faci a la temperatura d'entrada del camp solar.

El sistema més utilitzat fa servir sals foses com a fluid de treball, un intercanviador de calor i tancs d'emmagatzematge. Per una major simplicitat en el seu control se sol utilitzar un sistema indirecte amb dos tancs d'acumulació, un de fred i un altre calent.

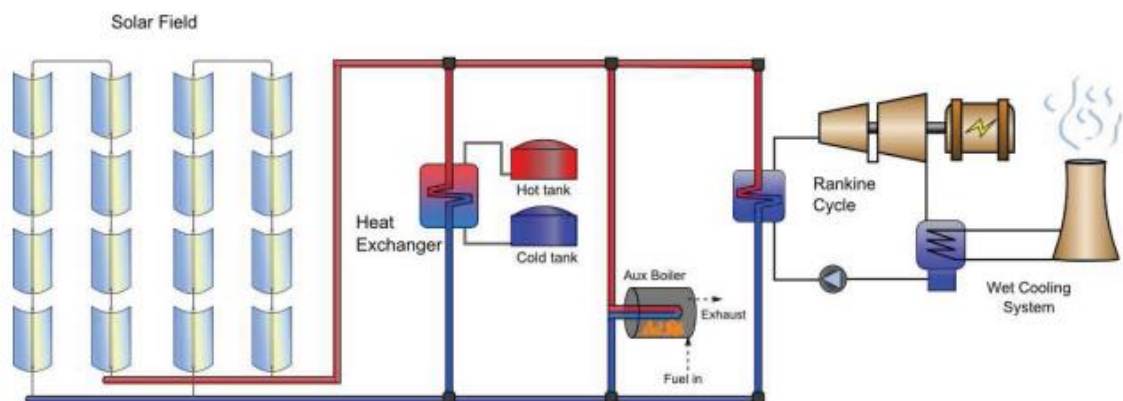


Figura 8.4. Esquema d'una central termosolar amb concentradors solars, emmagatzematge i generació auxiliar [21]

En la Figura 8.4 es pot veure la representació del cycle d'emmagatzematge, col·locat en sèrie amb el camp solar. Quan s'utilitza oli com a fluid de treball en el camp solar se solen emprar temperatures d'entrada i sortida de camp de 293 °C i 393 °C. Per això el tanc fred té una temperatura de 293 °C (temperatura d'entrada) i el calent de 393 °C (en el següent

apartat 8.2 es detallen aquestes temperatures).

El funcionament de l'emmagatzematge es realitza de la següent manera: el cabal d'oli sobrant arriba al tren d'intercanviadors a 393°C fent passar la sal de 293 °C a 393 °C i enviant l'oli de tornada al camp solar a 293°C, aquesta fase és l'anomenada de càrrega.

A la nit o quan no es disposa de radiació suficient es realitza la fase de descàrrega. El tren d'intercanviadors funciona de manera inversa, ara la sal escalfa a l'oli per enviar-lo al cycle de potència. L'oli passa de 293 °C a 393 °C mentre que la sal passa del tanc calent de 393°C als 293 °C del tanc fred.

Els tancs d'emmagatzematge compten amb un gran aïllament per impedir la pèrdua de potència. Tot i això, els tancs disposen d'un sistema de resistències elèctriques a la zona central i al terra per poder mantenir les sals a la temperatura adequada en cas que fos necessari.

El volum interior dels tancs no ocupat per les sals és emplenat amb nitrogen per mantenir la pressió constant i la impulsió de les sals des dels tancs als col·lectors o cap al intercanviador es realitzar per mitjà de bombes.

Pel càlcul del volum dels tancs acumuladors s'ha de garantir sempre una alçada mínima de 1 metre. Aquesta és necessària per tal de donar pressió suficient a les bombes d'impulsió de les sals tèrmiques. La resta de paràmetres dels tancs, com són l'altura i el diàmetre, s'adeqüen en funció del volum total a emmagatzemar i a obtenir unes dimensions lògiques. Pel cas de que el volum a emmagatzemar fos molt gran, es recomana posar més d'un tanc fred i calent per les sals.

Pel present projecte, tal i com s'ha marcat en els requisits, es considera imprescindible l'emmagatzematge per tal de que la central sigui competent respecte la fotovoltaica.

8.1.2. Bloc de potència

El bloc de potència és l'encarregat de transforma l'energia tèrmica en electricitat. Per això consta d'una sèrie d'elements com el generador de vapor, la turbina de vapor, el condensador, el rescalfador, el preescalfador i el el desgasificador. El tipus de cycle que s'utilitza és el de Rankine, representat a la Figura 8.5.

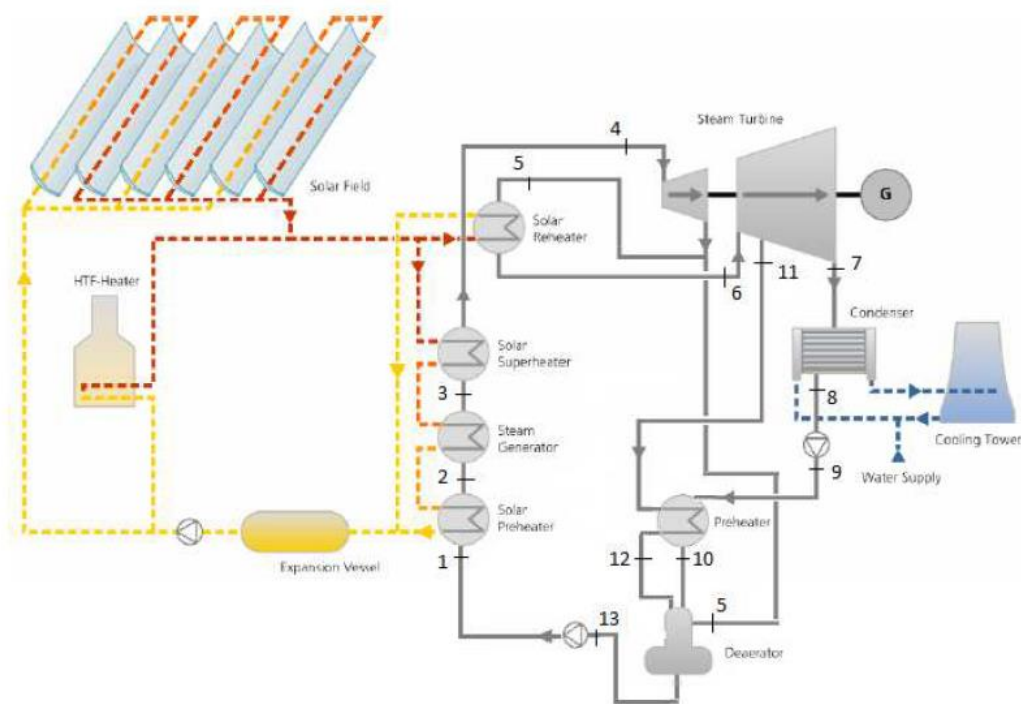


Figura 8.5. Esquema detallat del cicle de potència de la central termosolar [22]

El fluid procedent del camp solar o del sistema d'emmagatzematge tèrmic passa a través de diferents intercanviador de calor anomenats generador de vapor, preescalfador, superescalfador i reescalfador. Aquí transfereix l'energia que porta l'oli a l'aigua que circula pel cicle de potència. L'aigua, provinent del preescalfador, es va escalfant arribant a vapor sobreescalfat a la sortida del superescalfador per expandir-se a la turbina d'alta pressió. Una part del vapor resultant, es reescalfa per tornar-lo a enviar a la turbina de baixa pressió. L'altre part s'envia al desgasificador per aprofitar el calor restant.

De la turbina d'alta pressió el vapor es condueix cap al condensador per refredar-lo i tornar a començar el cicle. Apart hi ha una part d'aquest que s'envia directament al desgasificador.

L'aigua és impulsada en tot el seu recorregut per dues bombes. Una es connecta a la sortida del condensador enviant l'aigua al desgasificador i l'altra es troba just a la seva sortida per garantir la pressió ens els intercanviadors.

8.1.2.1. Generador de vapor

El generador de vapor és un intercanviador de calor de carcassa que transmet l'energia tèrmica del fluid tèrmic a l'aigua del cicle de vapor aconseguint la seva evaporació. Aquest vapor està sobreescalfat a les condicions requerides de l'entrada de la turbina. El vapor surt

del intercanviador a 373 °C i a la pressió de la turbina d'alta.

8.1.2.2. Turbina de vapor

La turbina de vapor és l'element encarregat de produir el treball per moure el generador elèctric. Consta d'un conjunt d'àleps que expandeix el vapor sobreescalfat convertint l'energia tèrmica en energia mecànica en un eix. Solen constar de diferents mòduls: turbina d'alta, turbina intermitja i turbina de baixa.

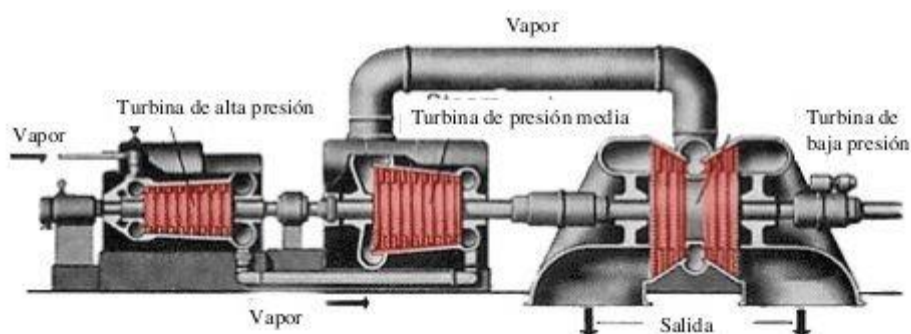


Figura 8.6. Esquema de les turbines i les seves diferents etapes [29]

8.1.2.3. Condensador

El condensador és un intercanviador d'energia que es troba a la sortida de la turbina de baixa pressió. S'encarrega d'extreure el calor de vaporització de la mescla de líquid i vapor i obtenir aigua líquida. El líquid condensat s'envia cap als preescalfadors i el desairejador. A més a més, elimina gasos que no es poden condensar i són nocius per la instal·lació, com per exemple l'oxigen.

El condensador utilitza aigua per l'intercanvi energètic, procedent d'una torre de refrigeració o altres sistemes de refrigeració.

8.1.2.4. Reescalfador

El reescalfador és un intercanviador que rep la mescla de líquid i vapor procedent de l'etapa d'alta pressió de la turbina i la transforma en vapor sobreescalfat per l'etapa de baixa pressió.

8.1.2.5. Desgasificador

El desgasificador és un intercanviador obert al que li arriba el condensat de l'etapa de baixa pressió i les extraccions de la turbina d'alta. S'encarrega d'eliminar els gasos que no ha estat possible extreure en el condensador com l'oxigen i el diòxid de carboni. Aquests gasos provoquen corrosió a l'acer i a altres metalls podent provocar averies a la instal·lació.

Aquest element també serveix com a tanc d'emmagatzematge d'aigua per l'alimentació del generador de vapor.

8.1.2.6. Preescalfador

Els preescalfadors són intercanviadors carcassa-tub, en forma de U. S'utilitzen per escalfar l'aigua d'alimentació.

Hi ha dos tipus de preescalfadors, d'alta i de baixa pressió. El d'alta pressió recull les extraccions de la turbina i preescalfa l'aigua procedent del desgasificador. El de baixa pressió preescalfa l'aigua que ve del condensador.

8.2. Dimensionament de la planta

En aquest subapartat es comença explicant el programa SAM amb tots els mòduls que el conformen. Seguidament es procedeix a justificar tots els elements triats i a realitzar els càlculs necessaris.

Al tractar-se d'un estudi preliminar, queda fora del seu abast el disseny detallat dels càlculs de pèrdues tèrmiques i càrregues mecàniques al col·lector i tub receptor, així com el cicle de potència de la central termosolar.

8.2.1. System Advisor Model (SAM)

El programa SAM és una eina de simulació creada per el National Renewable Energy Laboratory dels Estats Units molt utilitzada per estudis acadèmics i de recerca [21].

Per la tecnologia de cilindres parabòlics es posen a la disposició de l'usuari dues opcions: *Physical model* i *Empirical model*. El model físic es caracteritza pel seu ús de principis termodinàmics i de transferència de calor per simular el funcionament de la central. Per altre

banda, el model empíric utilitza una sèrie de relacions matemàtiques basades en l'anàlisi empíric de les dades que s'han registrat a les plantes termosolars de Califòrnia.

Dins de cada central el programa permet configurar la planta en base al seu model econòmic a seguir. Per exemple si la central es dissenya per finalitats comercials i ven l'energia segons demanda o si es fixa un preu de venda, entre d'altres.

Per la realització d'aquest projecte s'ha elegit el model físic amb la configuració comercial.

8.2.1.1. Mòdul del camp solar

El programa presenta dues maneres diferents de fer el dimensionament del camp: determinant el múltiple solar òptim o determinant la superfície disponible. Com és evident i tal i com s'ha anat explicant durant tot el treball, la opció escollida és la segona, dimensionament a través de la superfície disponible.

Tot i això cal explicar el concepte de múltiple solar (MS) ja que és un terme important de la central. El múltiple solar es defineix com el rati entre la potència tèrmica produïda pel camp solar en el punt de disseny i la potència tèrmica requerida pel bloc de potència en condicions nominals.

El múltiple solar per a centrals termosolars és sempre major que un per tal d'aconseguir un major temps les condicions nominals del bloc de potència. Això vol dir també, una major inversió i que en el cas de no haver-hi emmagatzematge es produeix una sobreproducció d'energia tèrmica que no es pot fer servir per produir electricitat. En la següent Figura 8.7 es pot observar la diferència entre el múltiple solar igual o superior a un [20].

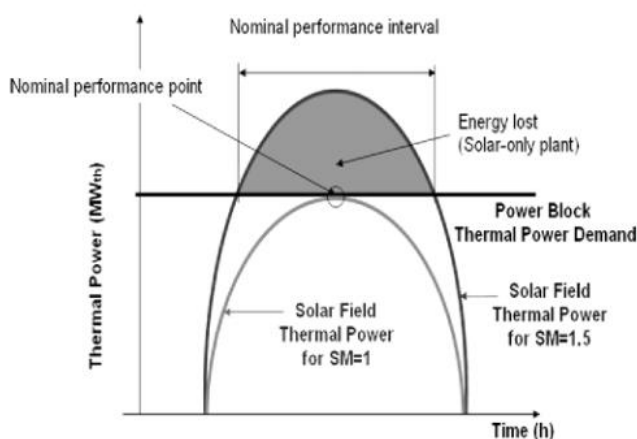


Figura 8.7. Producció de potència diària per diferents múltiples solars [20].

Pel que correspon a aquest projecte, interessa que el múltiple solar sigui major que un, ja que l'emmagatzematge és imprescindible com s'ha dit anteriorment.

En aquest mòdul també es determina el nombre de col·lectors per llaç i el nombre de llaços totals. Aquests valors venen determinats pel flux màssic i la velocitat del fluid tèrmic per tal d'obtenir un correcte funcionament.

Finalment es determina el fluid caloportador que es vol utilitzar en el camp solar. El software ofereix una sèrie de fluids utilitzats en centrals termosolars amb totes les seves propietats. A la següent Figura 8.8 donada pel programa es poden observar les diferències de temperatura entre cadascun.

Heat transfer fluids on the Field HTF Fluid list.

Name	Type	Min Optimal Operating Temp °C	Max Optimal Operating Temp* °C	Freeze Point °C	Comments
Hitec Solar Salt	Nitrate Salt	238	593	238	
Hitec	Nitrate Salt	142	538	142	
Hitec XL	Nitrate Salt	120	500	120	
Caloria HT 43	Mineral Hydrocarbon	-12	315	-12 (pour point)	used in first Luz trough plant, SEGS I
Therminol VP-1	Mixture of Biphenyl and Diphenyl Oxide	12	400	12 (crystallization point)	Standard for current generation oil HTF systems
Therminol 59	Synthetic HTF	-45	315	-68 (pour point)	
Therminol 66	?	0	345	-25 (pour point)	
Dowtherm Q	Synthetic Oil	-35	330	n/a	
Dowtherm RP	Synthetic Oil	n/a	330	n/a	

*The maximum optimal operating temperature is the value reported as "maximum bulk temperature" on the product data sheets.

Figura 8.8 Llista de fluids tèrmics de SAM [21].

El fluid utilitzat en la majoria de centrals termosolars és l'oli tèrmic. De tota la gama d'olis disponibles, els més emprats a nivell mundial en centrals de col·lectors cilíndrics parabòlics són el Therminol VP-1, el Dowtherm (Q, RP) i el Syltherm 800.

La seva elecció depèn de les condicions de treball que tingui la planta, principalment per la temperatura d'entrada al bloc de potència, així com pels punts de fusió i ebullició.

8.2.1.2. Mòdul del col·lector solar

Es posa a disposició de l'usuari una llibreria amb diferents tipus de col·lector amb totes les seves característiques com pel cas dels fluids tèrmics. A continuació a la Figura 8.9 es poden veure els diferents models a elegir.

COL·LECTORS
EuroTrough ET150
Luz LS-2
Luz LS-3
Solargenix SGX-1
AlbiosaTrough AT150
Siemens Sunfield 6
SkyFuel SkyTrough (80 mm)
FLAGBEG Ultimate Trough RP6 (89 mm)
FLAGBEG Ultimate Trough RP6 (70 mm)

Figura 8.9 Models de col·lectors de SAM [21].

En el cas de que els models de col·lectors disponibles no s'ajustin als requeriments de disseny de la planta, poden editar-se les seves dimensions i paràmetres òptics.

El programa dóna per a cada col·lector i en funció de l'emplaçament triat, totes les pèrdues òptiques i geomètriques així com la seva eficiència.

8.2.1.3. Mòdul del tub receptor

Aquest mòdul és molt similar a l'anterior sobre els col·lectors. També disposa d'una llibreria de diferents tubs receptors amb les propietats i característiques de cadascú. Els model més destacats i utilitzats són els de la Figura 8.10 següent.

TUBS RECEPTORS
Schott PTR70
Schott PTR70 2008
Schott PTR80
Solel UVAC 3
Siemens UVAC 2010
Royal Tech CSP RTUVR 70M4
TRX-Solar TRX70-125

Figura 8.10 Models de tubs receptors de SAM [21].

El programa permet determinar a la simulació un nombre de tubs que estan fora de funcionament, per exemple per haver-hi un vidre trencat. S'ha de tenir en compte que cada mòdul consta de 3 trams de tub de 4 metres.

En aquest cas el programa també dóna les pèrdues tèrmiques al punt de disseny del tub escollit.

8.2.1.4. Mòdul del cicle de potència

És un dels mòduls més amplis. Per la determinació del bloc de potència de la planta es disposa de dos mètodes de configuració diferents: cicle de potència definit per l'usuari o cicle de Rankine predefinit. En el primer, l'usuari és l'encarregat de determinar tots els paràmetres del bloc de potència, així com les característiques de treball del fluid caloportador en funció de la seva temperatura, el seu flux màssic o la temperatura ambient. En el segon mètode, existeixen una sèrie de característiques del bloc de potència que es donen per assumides com a paràmetres d'entrada, basant-se en simulacions d'altres centrals.

El paràmetre més important d'aquest mòdul és la potència elèctrica. Està directament relacionada amb el Múltiple Solar, com més potència es vulgui, més petit serà el múltiple solar. Pel que al projecte refereix, s'ha de trobar un equilibri entre la potència i el múltiple solar de forma que aquest últim sigui més gran que un i que la potència elèctrica no sigui exageradament petita.

També hi ha paràmetres de control, com són el temps d'arrencada, fracció de potència tèrmica mínima necessària, màxims i mínims d'operació de funcionament de la turbina entre d'altres.

8.2.1.5. Mòdul d'emmagatzematge tèrmic

En aquest mòdul es pot configurar tant el bloc d'emmagatzematge tèrmic com la utilització de combustibles fòssils per tenir un sistema d'escalfament auxiliar. Els fluids tèrmics que el programa subministra pel sistema d'emmagatzematge són els mateixos que per el mòdul del camp solar 8.2.1.1.

Les dimensions del sistema d'acumulació estan condicionades per les hores d'emmagatzematge que venen donades com a requisit del projecte. El programa permet escollir quantes parelles de tancs es volen utilitzar i les seves dimensions.

Per la determinació de l'ús de la caldera auxiliar de combustible fòssil, es pot determinar segons les franges horàries i per a cada més de l'any. El programa fa una distinció entre els dies entre setmana i els de cap de setmana, tot i que pel present projecte no se n'ha fet cap diferència. Hi ha un total de 9 períodes possibles, veure Figura 8.11, en els quals es pot determinar la fracció equivalent de combustible fòssil que s'utilitza respecte l'energia tèrmica que entra al bloc de potència.

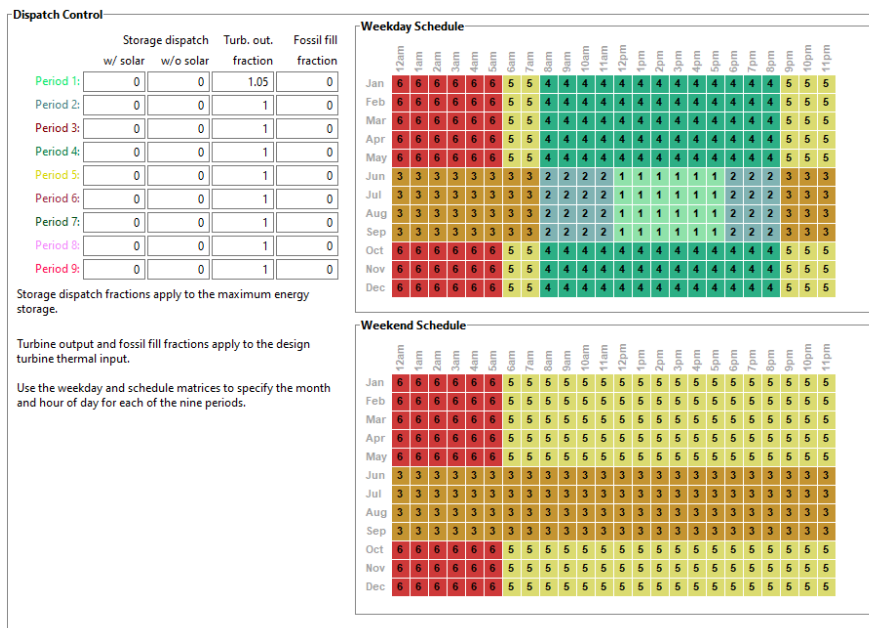


Figura 8.11 Períodes d'acumulació i utilització d'energia auxiliar de SAM [21].

8.2.1.6. Mòdul de costos

En aquest mòdul es determinen els costos directes i indirectes de la central i els costos d'operació i manteniment.

Dins dels costos directes es consideren els costos de les millores necessàries en el terreny per metre quadrat, el cost del camp solar també per metre quadrat, així com el preu per metre quadrat del sistema de transport del fluid tèrmic. Pel cas d'emmagatzematge, caldera auxiliar i bloc de potència, els costos s'expressen en relació als kW instal·lats.

Pel que fa als costos indirectes, el software considera els costos de la enginyeria i els costos del terreny (en el cas que s'estudia no existeixen). Aquests dependran directament de la mida de la planta i de la potència instal·lada.

Per últim, poden configurar-se els costos d'operació, manteniment i del gas natural, ja siguin costos fixes anuals o costos associat a la capacitat de la planta.

8.2.2. Elecció i justificació dels paràmetres de la central

En una central termosolar de col·lectors cilíndrics parabòlics és clau el bon funcionament del camp solar. El sistema es regula per a que la temperatura d'entrada i sortida del fluid de treball siguin sempre fixes per poder controlar de manera eficient els intercanviadors de calor i el cicle de potència.

8.2.2.1. Fluids caloportadors

Per l'elecció dels fluids caloportadors del camp solar i del sistema d'emmagatzematge s'ha buscat que complissin amb les propietats tèrmiques requerides per cada cas.

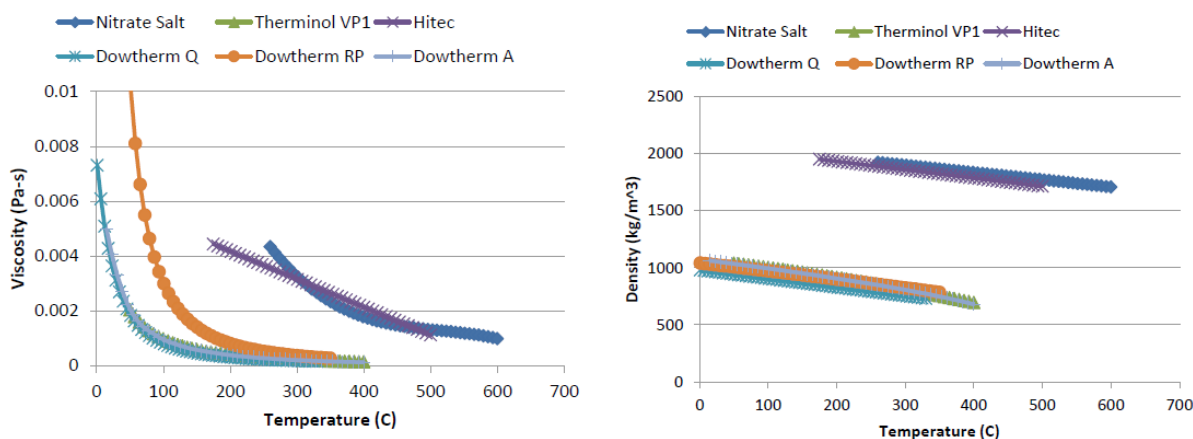


Figura 8.12 Viscositat i densitat en funció de la temperatura dels diferents fluids que dona SAM [21].

En la Figura 8.12 es poden veure les gràfiques representades de viscositat i densitat en funció de la temperatura de diferents fluids que dona el SAM com a opcions pel dimensionament. Es veu clarament la diferència de comportament entre els olis i les sals foses. Els olis a partir dels 300°C la seva viscositat es manté constant fins els 400°C. En les sals la viscositat també disminueix en funció de la temperatura però sense estabilitzar-se. Pel cas de la densitat, el seu comportament al llarg de la temperatura és pràcticament igual, amb la diferència que les sals són força més pesades.

Pel que fa al calor específic, a la Figura 8.13 s'observa com en els olis segueix un creixement continu a mesura que s'augmenta la temperatura fins a valors molt elevats als 400°C. En canvi, per les sals, el calor específic es manté en un línia molt més constant al llarg de la temperatura. Aquesta propietat indica que les sals són els fluids indicats per l'acumulació d'energia tèrmica.

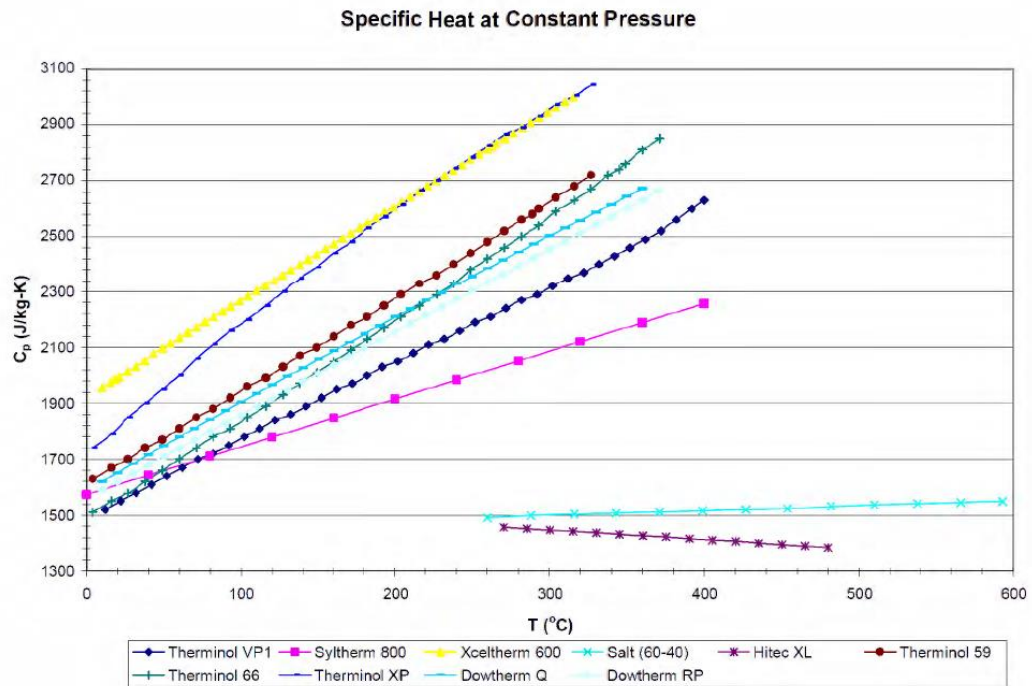


Figura 8.13 Calor específica en funció de la temperatura dels diferents fluids [16].

En aquest projecte s'ha decidit utilitzar com a fluid tèrmic pel camp solar l'oli Therminol VP-1. És un fluid que té una temperatura mínima relativament baixa (12°C) i que a més a més permet arribar fins els 400°C. Les seves propietats (densitat, viscositat i calor específica) a alta temperatura són les que millor resposta han presentat en les centrals que s'han utilitzat. Actualment és el fluid més utilitzat en les centrals de cilindres parabòlics.

Aquest oli limita a 400 °C la temperatura màxima de treball, ja que per sobre d'aquest valor es comença a degradar tèrmicament. Per això, s'ha escollit 393 °C com a temperatura de sortida del camp solar. Com a temperatura d'entrada s'ha escollit 293 °C, a aquesta temperatura l'oli gairebé no canvi la seva viscositat (veure Figura8.12), i això ajuda a conservar l'estat turbulent que ha de tenir al llarg del seu camí fins als intercanviadors. Amb aquestes dues temperatures s'obté un salt tèrmic en el camp solar de 100 °C.

Un punt que cal tenir en compte és la seva temperatura mínima de 12°C. Andorra com s'ha explicat a l'apartat 6.3.2 presenta mínimes per sota dels zero graus durant l'hivern, de manera que és necessari disposar d'un sistema d'escalfament auxiliar per mantenir el fluid per sobre d'aquesta temperatura.

A continuació es mostren les equacions de calor específica, densitat i viscositat del Therminol VP-1 [22]:

$$C_p = 2,82T + 716 \quad (8.1)$$

$$\rho = -7,61 \times 10^{-4}T^2 - 2,24 \times 10^{-1}T + 1191 \quad (8.2)$$

$$\mu = (-23 \times 10^{-5}T^3 + 5,61 \times 10^{-3}T^2 - 19,89T + 1822)^{-1} \quad (8.3)$$

On:

C_p és el calor específic ($J/kg/K$)

ρ és la densitat (kg/m^3)

μ és viscositat dinàmica ($Pa \cdot s$)

T és la temperatura (K)

Aquestes equacions es compleixen pel rang de temperatures que va des de 285 a 673 kelvins.

Pel que fa al sistema d'emmagatzematge, com a fluid de treball s'han escollit sals foses Hitec Solar Salt, principalment pel seu baix cost i bones propietats tèrmiques (C_p constant). Aquestes sals treballen al mateix rang de temperatura que l'oli ja que és aquest el que li dona la calor del camp solar.

El gran inconvenient que presenten les sals, i concretament aquest compost, és que solidifica a $120^\circ C$. Aquest fet provoca que s'hagin d'instal·lar resistències elèctriques als tancs tèrmics com a sistema de seguretat.

A continuació s'expressen les equacions de les seves propietats [22]:

$$C_p = 1,56 \times 10^{-3} \quad (8.4)$$

$$\rho = -0,411 \times (T - 273,15) + 208 \quad (8.5)$$

$$\mu = 10^{2,7374} \times (T - 273,15)^{-2,104} \quad (8.6)$$

Aquestes equacions es compleixen pel rang de temperatures que va des de 415 a 808 kelvins.

8.2.2.2. Elecció i paràmetres del Col·lector solar

Després de parlar amb el Doctor en Energia Solar Tèrmica Juan José Serrano, autor de la tesi doctoral: *Thermal Hydraulic and optical modeling of solar Direct Steam Generation system based on Parabolic-Trough Collectors*, i gran coneixedor d'aquestes centrals, s'ha decidit utilitzar el model EuroTrough ET150. A continuació a la Figura 8.14 es mostren les seves característiques i a la 8.15 un exemple instal·lat a la planta solar d'Almeria.

EUROTROUGH ET 150	
Longitud	150 m
Obertura	5,75 m
Àrea reflectida	817,5 m ²
Longitud focal mitjana	2,11 m
Eficiència de seguiment	99%
Precisió geomètrica	98%
Reflectància	93,5%
Factor d'embrutiment mitjà	3%
Errors òptic genèric	99%
Eficiència òptica	87%
Pes	18,5 kg/m ²

Figura 8.14 Característiques del col·lector EuroTrough ET 150 [21].



Figura 8.15 Col·lector EuroTrough ET150 en operació a Almeria [23].

La distància focal mitjana entre el col·lector i el focus de la paràbola es calcula a partir de la distància focal i l'amplada de l'obertura, amb la següent expressió [25] :

$$F_{mitj} = w \cdot \sqrt{\frac{\left(4 \cdot a^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2\right)^2}{a^2}} \cdot \frac{12 \cdot a^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2}{12 \cdot w \cdot \left(4 \cdot a^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2\right)} \quad (8.7)$$

On:

a és la longitud focal al vèrtex (m)

w és l'amplada d'obertura (m)

L'eficiència de seguiment indica errors en el seguiment del Sol. Pot venir donat per mala alineació del sensor solar, errors en l'algorisme de seguiment, errors causats per la taxa d'actualització de la unitat de rastrejament i errors en la torsió de l'extrem del col·lector a la ubicació de muntatge del sensor solar en relació amb l'extrem de la unitat de seguiment.

La precisió geomètrica indica possibles errors en el posicionament dels miralls, en el contorn d'aquests degut a l'estructura de suport, errors de forma del mirall en comparació amb una paràbola ideal, i receptor desalineat o distorsionat.

La reflectància indica la fracció de la radiació solar incident reflectida en un angle sòlid donat al voltant de la direcció de reflexió especular. L'elecció adequada per a l'angle sòlid és el subtendit pel receptor tal com es veu des del punt de la superfície del mirall, des d'on es reflecteix el raig. Per als concentradors parabòlics, els valors típics dels miralls solars són 0,923 (vidre de 4 mm), 0,945 (vidre d'1 mm o laminat), 0,906 (polímer platejat), 0,836 (alumini anoditzat millorat) i 0,957 (superfície frontal platejada) [25].

El factor d'embrutiment té en compte la brutícia i pols que pot aparèixer en els miralls. Normalment els miralls es netegen contínuament, però tot i així hi pot aparèixer brutícia.

El valor de l'error òptic genèric té en compte la reducció de la radiació absorbida causada per errors òptics generals o altres fonts d'error no explicades.

L'eficiència òptica s'ha calculat a partir de tots els factors exposats de la següent forma:

$$E_{f\text{òptica}} = E_{\text{seguiment}} \times E_{p,\text{geomètrica}} \times E_{\text{reflectància}} \times (1 - E_{\text{embrutiment}}) \times E_{\text{genèrics}} \quad (8.8)$$

8.2.2.3. Elecció i paràmetres del tub receptor

L'elecció del tub receptor ha estat amb el mateix criteri que pels col·lectors solars. S'ha elegit el model SCHOTT PTR70. Les seves característiques es poden veure a la Figura 8.16 i 8.17 següents:

SCHOTT PTR70	
Longitud del tub	4060 mm
Diàmetre exterior tub interior	70 mm
Tipus d'acer	DIN 1.4541
Absortivitat	$\geq 96\%$
Emissivitat	$\leq 86\%$
Transmissivitat	$\geq 97\%$
Diàmetre exterior tub vidre	115 mm
Pèrdues tèrmiques	205,65 W/m
Eficiència òptica	86,92%
Pressió d'operació	≤ 41 bar

Figura 8.16 Característiques del tub receptor Schott PTR 70 [21].



Figura 8.17 Tub receptor Schott PTR 70 [21].

Per calcular les pèrdues tèrmiques en el tub s'ha fet una breu explicació conceptual del que fa el programa. Serà a l'Annex III on s'hi adjuntarà el desenvolupament matemàtic en qüestió.

Primer de tot s'ha fet el balanç de totes potències que entren i surten del tub, agafant un quart de tub per la simetria. Només s'ha considerat el gradient de temperatura en la direcció radial, veure Figura 8.18, menyspreant l'axial i la circumferencial.

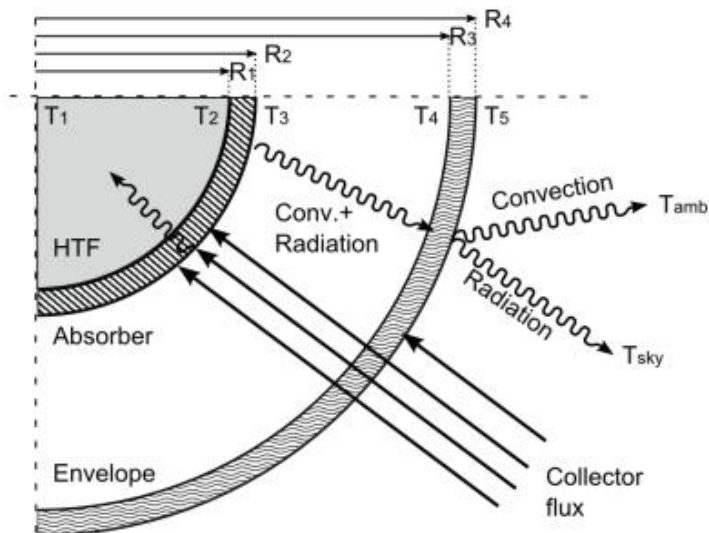


Figura 8.18 Potències tèrmiques que entren i surten del tub receptor [25].

La radiació solar arriba al tub receptor procedent del concentrador. Una petita part de la radiació l'absorbeix la coberta de vidre i l'altre el tub receptor. Aquest flux de calor passant es transmet per conducció pel tub metàl·lic per acabar de transmeteres per convecció al fluid tèrmic. Tota aquesta radiació es la que escalfa l'oli, és a dir, l'útil.

Les pèrdues tèrmiques es produeixen degut a que a la part exterior del tub absorbidor està més calenta que la part interior de la coberta de vidre i que existeix gas entre elles (tot i intentar fer-se el buit hi ha gas a molt baixa pressió). Degut a aquesta diferència de temperatura es produeix una transmissió de calor en forma de radiació i convecció que s'escapa i s'acaba perdent per l'exterior. Tot aquest procés és l'expressat en la Figura 8.18.

Per realitzar de forma més senzilla el balanç en forma d'equacions s'utilitza l'analogia elèctrica representant resistències, Figura 8.19.

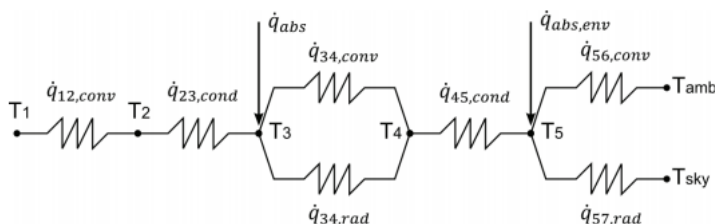


Figura 8.19 Red de resistències tèrmiques pel model del tub receptor [25].

D'aquesta manera les pèrdues tèrmiques queden expressades de la següent forma:

$$\dot{q}_{loss} = \dot{q}_{56,conv} + \dot{q}_{57,rad} \quad (8.9)$$

On la \dot{q}_{loss} és la potència total perduda, resultant de la suma de, $\dot{q}_{56,conv}$, les pèrdues per convecció i, $\dot{q}_{57,rad}$, les pèrdues per radiació. Totes les unitats de les potències em watts.

8.2.2.4. Configuració del camp solar

A l'hora de dimensionar el camp solar hi ha certs aspectes que són crítics pel seu funcionament. El primer de tots és la velocitat del fluid. Del seu valor depenen les temperatures d'entrada i de sortida dels llaços i del camp. Com més baixa és la velocitat del fluid, més s'escalfa el tub receptor.

Tot i interessar el màxim escalfament del fluid per la mínima longitud possible, hi ha certs valors de velocitat que s'han d'evitar. Com s'ha explicat en l'apartat 8.1.1.2, l'oli dins el tub receptor ha d'estar en règim turbulent, ja que a velocitats massa baixes, provoca problemes de vinclament i malmet els tubs receptors.

La velocitat màxima també és un paràmetre de disseny que cal determinar a partir de tenir cabals màssics raonables per a cada llaç.

S'han utilitzat les següents equacions per tal d'acotar les velocitats del fluid del camp solar:

$$Re = \frac{\rho_{oli} \cdot v_{oli} \cdot D_{int,abs}}{\mu_{oli}} \quad (8.10)$$

$$Q = v_{oli} \cdot A_{int,abs} \quad (8.11)$$

$$\frac{\dot{m}_{llaç}}{\rho_{oli}} = v_{oli} \cdot A_{int,abs} \quad (8.12)$$

$$\dot{m}_{llaç} = v_{oli} \cdot A_{int,abs} \cdot \rho_{oli} \quad (8.13)$$

On:

Re és el número de Reynolds del fluid

Q és el cabal del fluid tèrmic (m^3/s)

$\dot{m}_{llaç}$ és el flux màssic del fluid per llaç (kg/s)

v_{oli} és la velocitat del fluid de l'oli (m/s)

$A_{int,abs}$ és l'àrea interior del tub receptor metàl·lic (m^2)

$D_{int,abs}$ és el diàmetre interior del tub metàl·lic (m)

ρ_{oli} és la densitat del fluid de l'oli tèrmic (kg/m^3)

μ_{oli} és la viscositat dinàmica de l'oli ($kg/m/s$)

S'ha fixat el número de Reynolds entre 10^6 i $2 \cdot 10^7$ i el flux màssic per llaç entre 1,1 i 14 kg/s . Aquests valors s'han escollit a partir dels paràmetres recomanables que dona el SAM i que compleixen amb les especificacions marcades.

Amb això, el rang de velocitats que el fluid del camp solar ha de complir és entre 0,36 i 5 m/s .

A la velocitat màxima del fluid hi va associada una radiació màxima a partir de la qual s'excedeix la temperatura màxima de sortida del camp solar. Aquesta radiació màxima depèn del dia de l'any, l'hora, el vent i la temperatura. Perquè no es sobrepassi la temperatura màxima s'han de desenfocar concentradors. Un sol mòdul no es pot desenfocar ja que el motor associat a l'eix de rotació està muntat per cada col·lector. En funció de les necessitats es pot elegir desenfocar un o varis col·lectors per complet o parcialment.

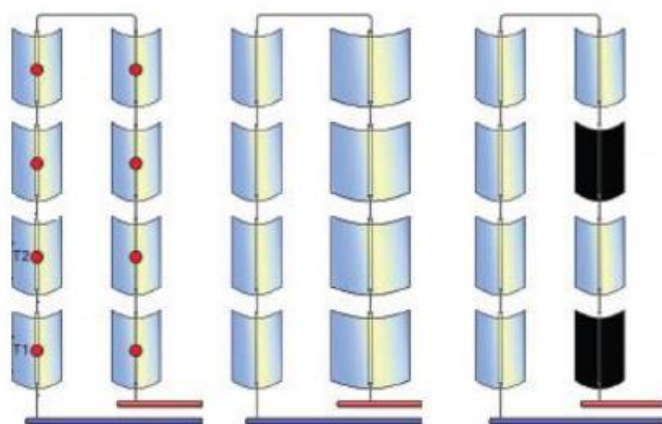


Figura 8.20. A l'esquerra tots els col·lectors desenfocats., al mig col·lectors desenfocats parcialment i a la dreta col·lectors desenfocats totalment [25].

Un altre aspecte important en el dimensionament són el número de col·lectors per llaç. En funció de la irradiància i del rendiment òptic del col·lector s'obté més o menys energia per transferir al fluid tèrmic. Amb aquesta energia i tenint en compte el salt tèrmic que es vol aconseguir en el llaç (100°C) i el flux màssic que passa pel tub receptor, es pot determinar un número òptim de col·lectors per cada llaç. A continuació es poden veure les dues equacions que s'han utilitzat per determinar-los.

$$\dot{q}_{\text{llaç}} = A_{\text{col·lector}} \cdot \eta_{\text{col·lector}} \cdot I \cdot N_{\text{col·lectors}} \quad (8.14)$$

$$\dot{q}_{\text{llaç}} = \dot{m}_{\text{llaç}} \cdot C_{p_{\text{Soli}}} \cdot \Delta T \quad (8.15)$$

On:

$\dot{q}_{\text{llaç}}$ és la potència per cada llaç (W)

$A_{\text{col·lector}}$ és l'àrea de miralls del col·lector (m^2)

$\eta_{\text{col·lector}}$ és el rendiment òptic del col·lector

I és la irradiància màxima de l'emplaçament, DNI, (W/m^2)

$N_{\text{col·lectors}}$ és el número de col·lectors per llaç

$C_{p_{\text{Soli}}}$ és el calor específic de l'oli Therminol VP-1 ($J/kg/K$)

ΔT és el salt tèrmic que es vol aconseguir per llaç (°C)

Amb aquestes dues equacions i complint amb els requisits de velocitat, és a dir, de flux màssic mínim i màxim, ha sortit que el número òptim de col·lectors és el de 6 unitats per cada llaç.

La superfície dels col·lectors solars s'ha limitat a 200.000 m^2 , és a dir, a 20 hectàrees. S'ha agafat una separació entre files de 13 metres per tal de disminuir el màxim possible l'ombra, i conseqüentment la radiació absorbida. Per aquest càlcul el programa té en compte l'amplada de la paràbola i la diferent posició del Sol durant el dia.

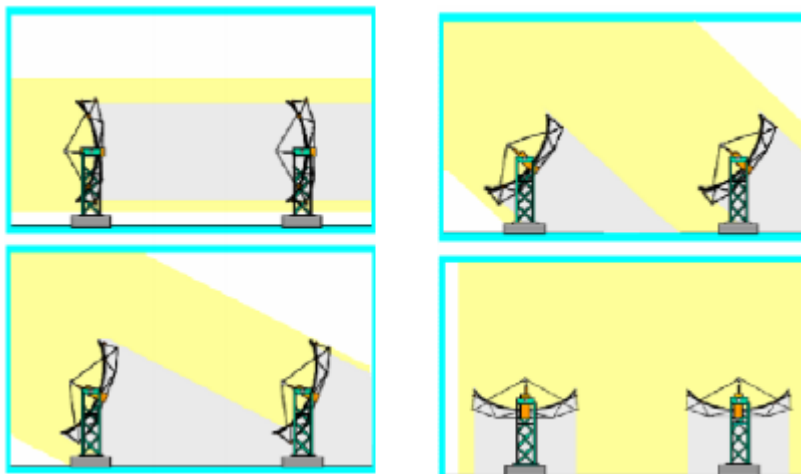


Figura 8.21. Diferents situacions d'ombres en funció de l'hora del dia [25]

El total del camp solar, tenint en compte la separació entre files és de 46,5 hectàrees. La resta de superfície fins a les 60 disponibles, s'hi ubiquen tots els edificis i maquinària del cicle de potència juntament amb els tancs acumuladors.

Tenint en compte aquesta superfície disponible i el nombre de col·lectors per llaç, el total de la planta consta de 41 llaços, arribant a la suma de 246 col·lectors. Amb tot això l'energia tèrmica de la que consta el camp solar és de 100,85 MWt.

L'eficiència òptica total s'ha calculat a partir de les dues eficiències del col·lector i del tub receptor.

A continuació es pot veure una taula resum, Figura 8.21, de tots els paràmetres explicats i del que consta el camp solar.

CAMP SOLAR	
Superfície camp solar	200.000 m ²
Temperatura d'entrada	293°C
Temperatura de sortida	393°C
Cabal màssic mínim per llaç	1 kg/s
Cabal màssic màxim per llaç	13 kg/s
Velocitat mínima	0,36 m/s
Velocitat màxima	5,38 m/s
Número de col·lectors per llaç	6
Número de llaços	41
Número total de col·lectors	246
Potència tèrmica del camp solar	100,85 MWt
Eficiència òptica del llaç total	75,6%

Figura 8.22 Taula resum dels paràmetres del camp solar [21].

8.2.2.5. Múltiple solar òptim

S'ha determinat el múltiple solar òptim a partir d'una sèrie de simulacions que permet el SAM. No es té en compte l'aportació de la caldera auxiliar per la seva determinació, ja que aquesta es determina a posteriori.

Com s'ha explicat a l'apartat 8.2.2.1, el múltiple solar relaciona la potència tèrmica del camp i la potència tèrmica del cicle de potència. Per un sistema amb acumulació com l'elegit, és necessari sobredimensionar el camp solar respecte el cicle de potència per així acumular l'energia sobrant.

S'han elegit un conjunt de múltiples solars respecte els quals es calcula el factor de càrrega o de capacitat de la central, que indica el quocient entre l'energia generada per la central en un any i l'energia generada si la central hagués treballat al màxim punt de disseny durant l'any. En el cas d'aquest tipus de centrals termosolars, el factor de planta sol trobar-se com a màxim entre el 30 i el 40%.

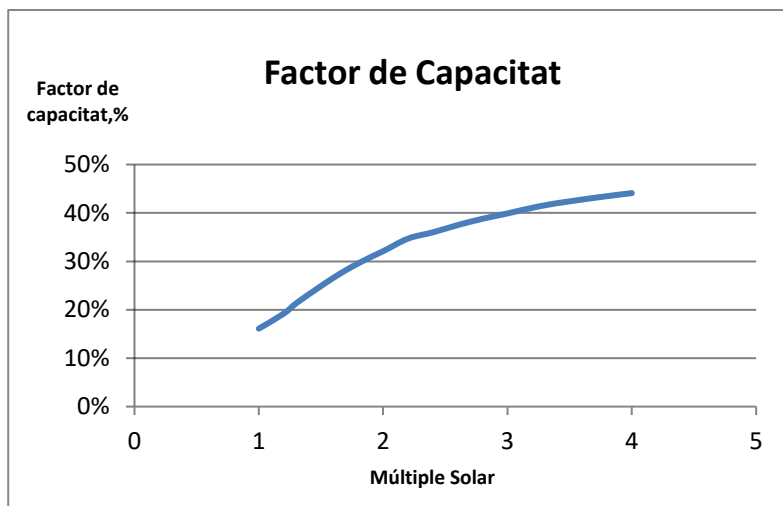


Figura 8.23 Factor de planta en funció del múltiple solar [21].

Com es pot observar a la Figura 8.23, el factor de càrrega d'entre el 30 i el 40% es troba quan el múltiple solar està entre 2 i 3. A mesura que aquest augmenta, el factor de càrrega també ho fa. Però això també implica un augment del cost de la central. Per aquest raó s'ha fet l'anàlisi també en funció de la tendència del LCOE i la producció elèctrica.

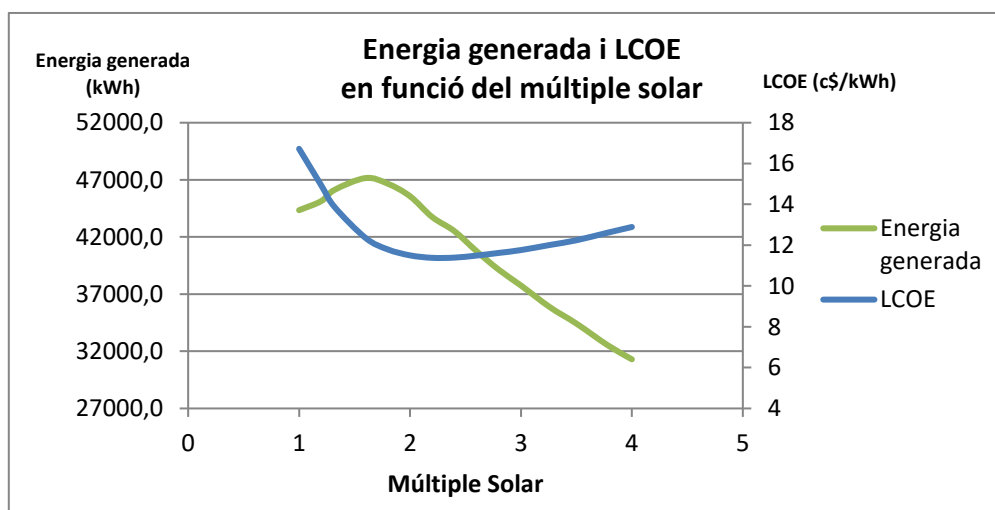


Figura 8.24 Energia generada i LCOE en funció del múltiple solar [21].

En el gràfic de la Figura 8.24 s'observa com pel cas del LCOE, a partir d'un múltiple solar de 2 el seu valor es manté força constant fins arribar a 4, quan torna a pujar. Pel que fa a l'energia generada, presenta el seu màxim per un múltiple solar propera a dos i va en decrement a mesura que aquest augmenta.

Amb aquest anàlisi es conclou que el múltiple solar òptim és el de valor 2. Aquest valor de múltiple solar correspon a una potència elèctrica de la central de 18 MWe.

8.2.2.6. Dimensionament del sistema d'emmagatzematge

El sistema d'acumulació s'ha cregut imprescindible per tal de que la central termosolar pogués ser competitiva envers la central fotovoltaica. Aquest element permet emmagatzemar l'energia tèrmica i transformar-la en electricitat en condicions de demanda elevada o durant la nit, és a dir, es pot gestionar la generació i produir en els moments que més interessa.

S'utilitzen les sals foses Hitec Solar Salt pel sistema d'acumulació tal i com s'ha explicat a l'apartat 8.2.2.1, amb un període d'emmagatzematge de 9 hores tal i com ha demanat FEDA per tal de garantir energia durant la nit.

El sistema d'emmagatzematge consta de dos tancs, fred i calent. La capacitat de cada tanc és igual al volum total del fluid de sals que permet les 9 hores de reserva més el volum necessari pel funcionament de les bombes.

Pel càlcul del volum dels tancs i de les seves dimensions s'ha fet un balanç energètic entre els olis provinents del camp solar i les sales foses dels tancs acumuladors. A continuació es poden veure les equacions utilitzades:

$$\dot{q}_T = \dot{m}_{total,olis} \cdot Cp_{soli} \cdot \Delta T_{oli} \quad (8.16)$$

$$\dot{q}_T = \dot{m}_{sals} \cdot Cp_{sals} \cdot \Delta T_{sal} \quad (8.17)$$

$$\dot{q}_T \cdot t_{emm} = \rho_{sal} \cdot V \cdot Cp_{sals} \cdot \Delta T_{sal} \quad (8.18)$$

On:

\dot{q}_T és la potència tèrmica total provinent del camp solar (W)

$\dot{m}_{total,olis}$ és el flux màssic total de l'oli (kg/s)

\dot{m}_{sals} és el flux màssic de sals (kg/s)

Cps_{oli} és el calor específic de l'oli ($J/kg/K$)

Cps_{sal} és el calor específic de la sal ($J/kg/K$)

ΔT_{oli} és la diferència de temperatura entre l'entrada i la sortida de l'oli (K)

ΔT_{sal} és la diferència de temperatura entre l'entrada i la sortida de la sal (K)

t_{emm} són les hores d'emmagatzematge (s)

ρ_{sal} és la densitat de l'oli (kg/m^3)

V és el volum dels tancs acumuladors (m^3)

A partir d'aquestes equacions s'extreu el volum dels tancs acumuladors.

Pel que fa a les dimensions dels tancs:

$$D_{tanc} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{h_{tanc} \cdot \pi}} \quad (8.19)$$

On:

D_{tanc} és el diàmetre del tanc (m)

h_{tanc} és l'altura del tanc (m)

Com es pot observar el diàmetre del tanc depèn de l'altura que es consideri d'aquest. En el present projecte s'ha buscat una relació d'entre 1,2 i 1,5 cops més diàmetre que alçada.

En la següent Figura 8.25 s'indica el valor de totes les variables explicades.

EMMAGATZEMATGE	
Hores d'emmagatzematge	9 h
Capacitat d'emmagatzematge	455.056 MWh
Volum tancs	8720,44 m ³
Altura del tanc	18 m
Mínima altura requerida pel fluid	1 m
Diàmetre del tanc	25 m
Pèrdues tèrmiques	247,61 kW

Figura 8.25. Taula resum dels paràmetres sistema d'acumulació [21].

Les pèrdues tèrmiques s'han calculat a partir de l'àrea dels tancs, la diferència de temperatura entre el tanc i l'ambient i el coeficient de pèrdues de calor dels materials dels tancs [25].

8.2.2.7. Caldera auxiliar

En molts països, entre ells Espanya, es regula l'aportació d'energia fòssil en centrals de generació elèctrica a partir d'energies renovables. En la majoria d'aquests, la limitació de l'aportació d'energia fòssil es troba entorn el 15% del disseny de la central. Pel que fa a Andorra no existeix legislació respecte aquesta aportació d'energia. Tot i això en aquest projecte s'ha cregut oportú no superar aquest 16% de limitació, ja que l'aportació es fa amb gas natural i el país sí que té plans de futur per reduir les emissions d'efecte hivernacle.

El SAM permet la possibilitat de concretar la quantitat de subministrament de gas en 9 períodes diferents tal i com s'ha explicat a l'apartat 8.2.1.5. D'aquets se n'han configurat 3 amb un 20%, un 30% i un 50% de suport. Aquesta decisió s'ha pres en funció de les corbes de potència tèrmica i energia neta produïdes horàries de cada més. A l'Annex IV es poden veure les gràfiques obtingudes de SAM.

El Mapa horari en el que estan distribuïts els períodes de recolzament es pot veure a continuació a la Figura 8.26.

	12am	1am	2am	3am	4am	5am	6am	7am	8am	9am	10am	11am	12pm	1pm	2pm	3pm	4pm	5pm	6pm	7pm	8pm	9pm	10pm	11pm	
Jan	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	
Feb	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	1	1
Mar	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	1	1
Apr	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	1	
May	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	1	
Jun	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	1	
Jul	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	1	
Aug	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	1	
Sep	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	1	1
Oct	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	1	1
Nov	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1
Dec	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1

Figura 8.26 Mapa horari anual amb la distribució dels períodes de recolzament fòssil [21].

El període 1 no presenta recolzament fòssil. El 2 representa un recolzament del 20%, el 3 del 30% i el període 4 del 50%.

8.2.2.8. Cicle de potència

Per la configuració del bloc de potència s'ha elegit la opció del cicle predefinit de Rankine que ofereix el software. El model que segueix el programa per la determinació del cicle de vapor és el següent de la Figura 8.27.

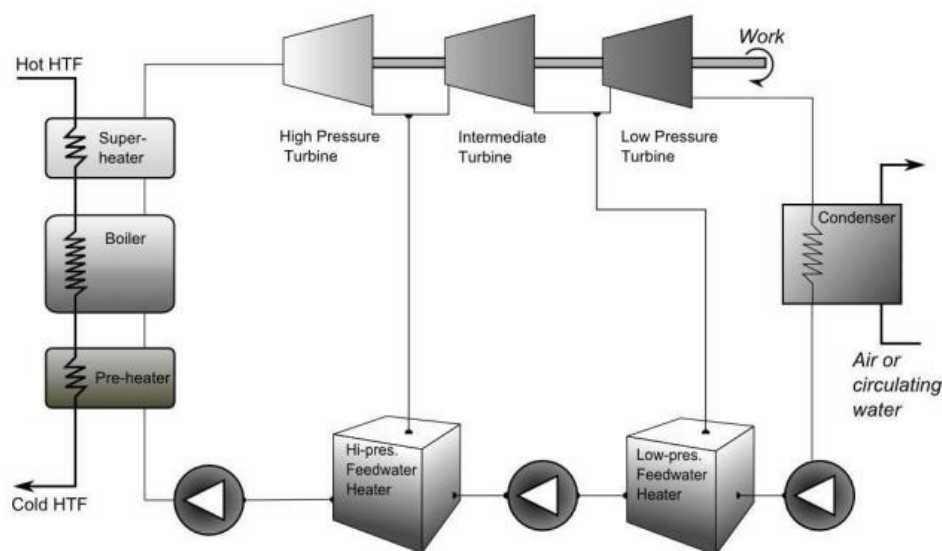


Figura 8.27. Esquema simplificat del model utilitzat de Rankine per SAM [25].

El cicle base és un model detallat d'un cicle representatiu de 10 MWe de Rankine desenvolupat en el programa *Engineering Equation Solver*, els quals els càlculs de punts de disseny simulats i la producció de rendiment constitueixen la base del seu model de regressió. En el cicle modelat, l'aigua d'alimentació s'escalfa en escalfadors d'alimentació oberts amb dues extraccions de turbines intermèdies: una a alta pressió i l'altre a baixa pressió. L'equip de generació de vapor consta d'un preescalfador, una caldera i un superescalfador. El condensador es pot connectar a una torre de refrigeració humida o es pot especificar com a condensador refrigerat per aire. El model s'adapta a la pressió fixa a l'entrada de la turbina o a una pressió variable en funció de la temperatura i la càrrega d'entrada.

Les temperatures i les pressions dels punts de disseny d'aquest model coincideixen amb les condicions representatives de funcionament de la planta parabòlica, tot i que l'escala del sistema modelat (10 MW) és una mica menor a la requerida de 18 MW.

Els paràmetres d'entrada assumits pel cicle de potència són els presentats a la Figura 8.28:

CICLE DE POTÈNCIA	
Potència elèctrica bruta	18 MW
Potència elèctrica neta	16,2 MW
Temperatura d'entrada a la turbina	373 °C
Pressió generador de vapor	90 bar
Pressió en el condensador	0,085 bar
Fracció de vapor extret de la turbina d'alta pressió	0,13
Pressió de vapor extret de la turbina d'alta pressió	23,9 bar
Rendiment isentròpic des les turbines	70%
Rendiment isentròpic de les bombes	69,5%
Eficiència del cicle de potència	35,6%

Figura 8.28. Taula dels paràmetres del cicle de potència empleat per SAM [21].

8.3. Resultats

Després d'entrar tots els paràmetres, a la Figura 8.29 que apareix a continuació es presenten els resultats de la simulació del SAM.

	Central bàsica (MS=1)	Central amb emmagatzematge (MS=2)	Central amb emmagatzematge i caldera auxiliar (MS=2)
Energia tèrmica produïda pel camp solar (MWht)		152.883	
Energia tèrmica utilitzada pel cycle de potència (MWht)	143.867	147.178	169.282
Energia elèctrica produïda (MWh)	42.030	45.558	52.747
Factor de càrrega (%)	14,8	32,10	37,2
LCOE (c€/kWh)	12,00	9,41	10,27
Consum de gas natural (m ³)	-	-	2.213.620
Inversió total (M€)	119,78	125,52	139,54

Figura 8.29 Taula comparativa dels resultats de la central amb emmagatzematge i caldera auxiliar i sense [21].

Els resultats es presenten fent la comparativa entre el que és la central sense emmagatzematge ni caldera auxiliar, la central amb emmagatzematge i la central amb emmagatzematge i caldera auxiliar. Per la central bàsica s'ha cregut oportú fer la comparació amb un MS igual a un, per poder fer la comparació aprofitant el total de l'energia tèrmica generada pel camp solar.

L'energia tèrmica utilitzada en el bloc de potència augmenta tant a l'utilitzar emmagatzematge com quan s'utilitza el sistema auxiliar amb gas natural. Augmenta un 2,3% amb acumulació i un 17,7% amb acumulació i caldera.

L'energia elèctrica, lògicament, segueix la mateixa tendència. També augmenta quan l'energia tèrmica que utilitza el cicle de potència augmenta. S'aconsegueix un 7,7% més d'energia amb acumulació i un 25,5% amb acumulació i caldera auxiliar. L'energia que aporta la caldera elèctrica és un 15,8% respecte la generació amb acumulació tal i com s'ha marcat a l'apartat 8.2.2.7.

El factor de càrrega de la central s'aconsegueix que arribi fins al 37,2%, és a dir que la planta treballi 3258 hores durant l'any. Es troba dins el rang que s'ha indicat a l'apartat 8.2.2.5.

Es pot observar com el LCOE disminueix al afegir el sistema d'emmagatzematge. Per contrari, augmenta al afegir la caldera auxiliar degut al cost del combustible. En termes generals, la instal·lació bàsica és la més barata mentre que com més elements s'hi afegeixen més creix el preu.

Tot i no haver-hi molta diferència amb l'energia produïda i la inversió entre la central bàsica i la central amb emmagatzematge, la principal diferència recau en quan es pot vendre l'energia generada i en la seva flexibilitat. Essent molt millor la central amb acumuladors ja que permet produir energia fins a altes hores de la nit en certes èpoques de l'any tal i com es pot veure a continuació.

La generació mensual es mostra a la següent gràfica de la Figura 8.30. proporcionada per SAM. Es pot observar com en els mesos d'estiu es quan hi ha una generació més gran i en els mesos d'hivern quan hi ha la mínima generació.

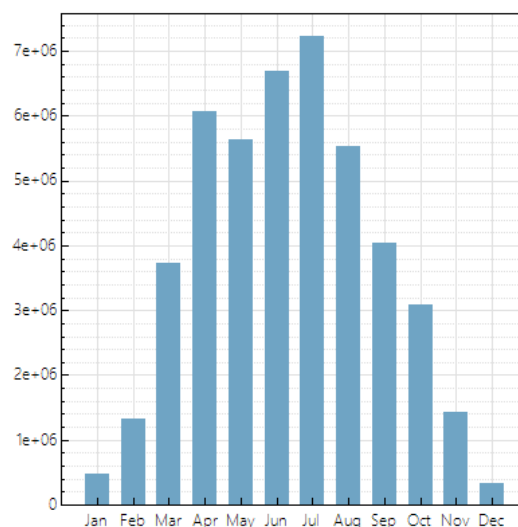


Figura 8.30 Generació mensual elèctrica en MWh [21].

A continuació es mostren diverses gràfiques que mostren l'evolució de les corbes d'energia tèrmica i elèctrica produïdes. S'han escollit dos mesos representatius de l'any, el més de d'agost, i el més de febrer. S'ha de tenir en compte que el programa dóna en diferents escales les dues corbes, cosa que pot dificultar visualment la comprensió dels resultats.

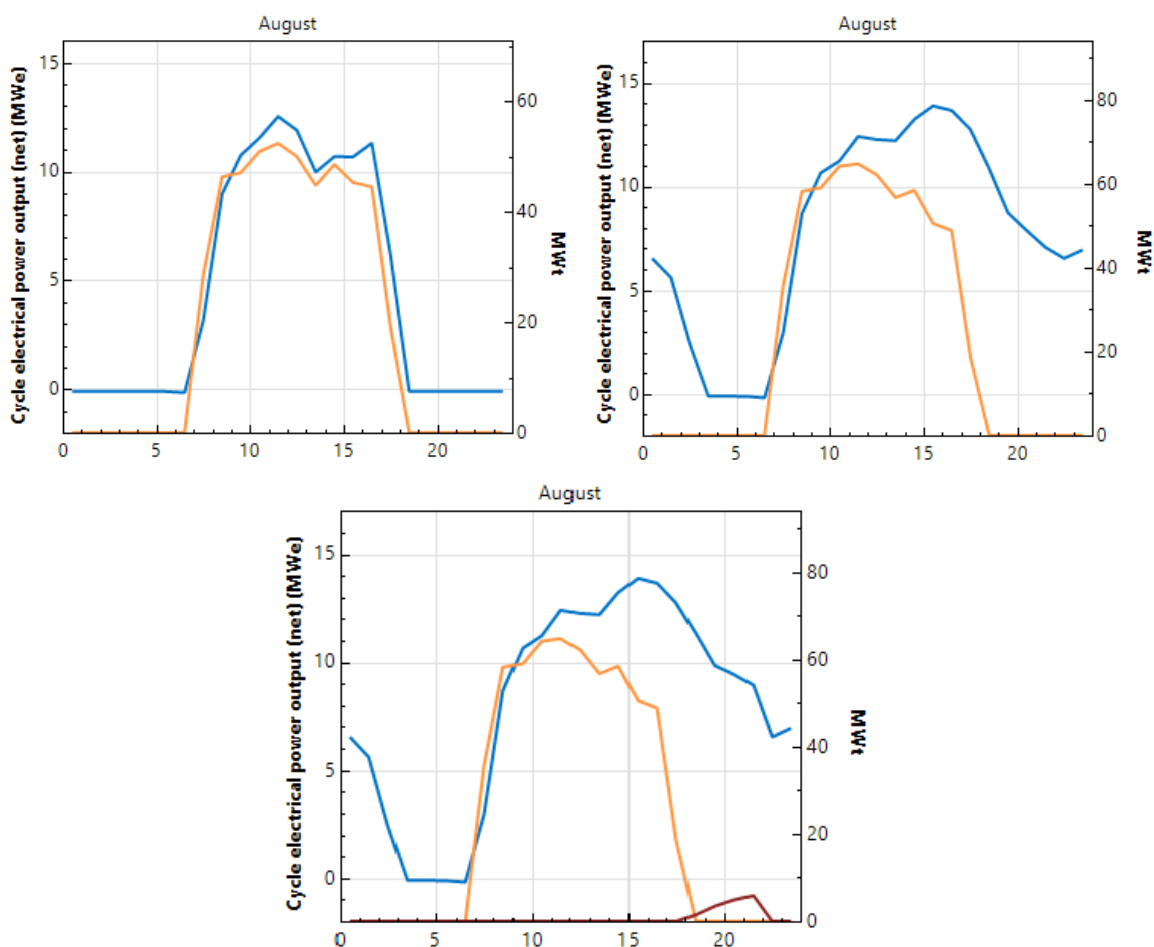


Figura 8.31. Corbes de potència elèctrica i tèrmica generades del mes d'agost. La primera gràfica mostra les corbes de la central bàsica, la segona (dalt part dreta) la central amb emmagatzematge i la tercera la central amb emmagatzematge i sistema auxiliar [21].

La línia blava, representada a la part esquerra de les gràfiques, representa la potència elèctrica neta de la central. La línia taronja, representada a la part dreta de les gràfiques, representa la potència tèrmica generada pel camp solar i, en vermell, la potència tèrmica produïda a partir de gas natural.

Es pot observar com en la segona gràfica, quan s'hi afegeix l'acumulació, la potència elèctrica amplia la seva corba desplaçant-se a la dreta i generant electricitat durant la nit fins a les 3 del matí, complint amb els objectius marcats. La tercera gràfica, que té en compte a

més a més de l'emmagatzematge el recolzament amb energia fòssil, aporta una quantitat petita d'energia pels dies que no hi ha Sol o possibles problemes de la central. Tot i això és una quantitat insignificant a l'estiu i compleix una funció de recolzament.

Al hivern és molt més important l'energia generada per la caldera de gas natural, com es pot veure al mes de febrer de les següents gràfiques de la Figura 8.32.

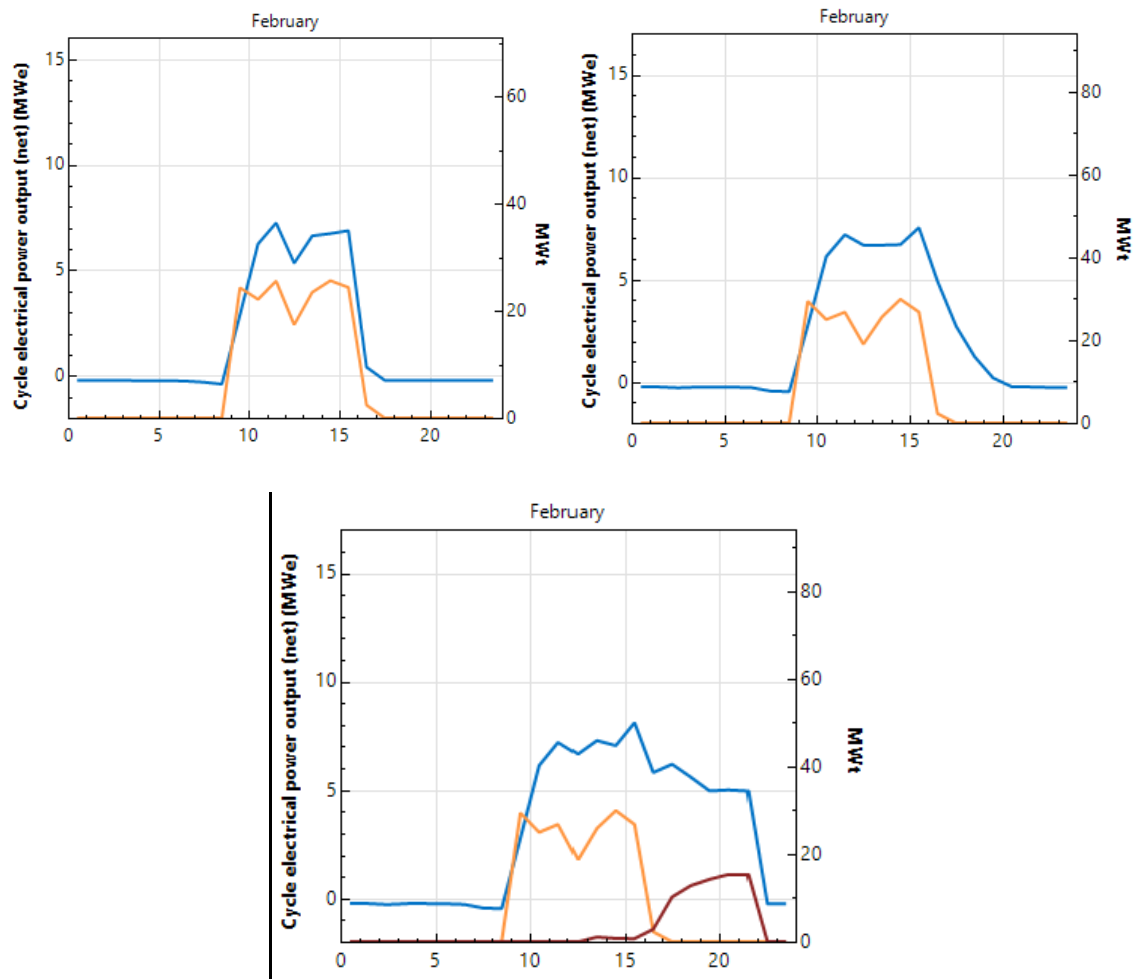


Figura 8.32. Corbes de potència elèctrica i tèrmica generades del mes de febrer. La primera gràfica mostra les corbes de la central bàsica, la segona (dalt part dreta) la central amb emmagatzematge i la tercera la central amb emmagatzematge i sistema auxiliar [21].

A diferència del mes de febrer, al hivern sí que es necessita de la caldera de gas natural per generar durant la nit i vendre l'energia com a energia renovable. Com a es pot veure a la segona gràfica, la generació elèctrica només dura fins les 8 del vespres tot i tenir en compte l'emmagatzematge. Si s'afegeix la caldera, aquesta generació dona potència elèctrica fins a les 10 del vespre.

8.4. Anàlisi econòmic

L'anàlisi i el detall econòmic es fa només de la central amb emmagatzematge i sistema de producció auxiliar. Els ratis econòmics s'han tret del propi software, que utilitza les centrals termosolars dels estats units com a referència. Tots els costos que es mostren estan expressats en euros. S'ha aplicat el canvi equivalent de 1 dòlar igual a 0,82 euros, dada extreta del banc d'Espanya [27].

Els costos directes són els de la Figura 8.33 següent, fent un total de 129,5 M€:

COSTOS DIRECTES			
	Quantitat	Cost	Total [€]
Adequació de l'emplaçament	201.105 m ²	74,51 €/m ²	14.983.608
Camp solar	201.105 m ²	206,96 €/m ²	41.621.131
Circuit de transferència de calor (equips inclosos)	201.105 m ²	57,95 €/m ²	11.653.917
Emmagatzematge	455,1 MWht	51,33 €/h	23.356.499
Caldera auxiliar	18 MWe	745,06 €/MWe	13.411.151
Cicle de potència	18 MWe	910,63 €/MWe	16.391.406
Control de la planta	18 MWe	107,62 €/MWe	1.937.166
Subtotal			123.354.875
Contingència		6%/total	7.401.293
Total			129.516.481 €

Figura 8.33. Costos directes de la central

Els costos indirectes són els de la Figura 8.34 següent. Només s'han tingut en compte els costos de l'empresa instal·ladora i s'han menyspreat els costos referents al terreny, ja que com s'ha explicat en el capítol 4, són zones que cedeix l'estat per aquest tipus de instal·lacions.

COSTOS INDIRECTES		
	Quantitat	Cost
Enginyeria		5%/total
		6.536.113
Cost del terreny		0%/total
		0
Altres		5%/total
		3.921.668
Total		10.457.781 €

Figura 8.34. Costos indirectes de la central [21]

La suma de costos directes i indirectes fan un total de 139.974.262 €, tal i com s'ha presentat a l'apartat de resultats.

A part d'aquests costos anuals, s'han tingut en compte costos de manteniment, costos variables en funció de la producció elèctrica i costos del gas natural. Es poden veure els costos a la Figura 8.35 següent:

COSTOS D'OPERACIÓ I MANTENIMENT	
	Cost primer any
Cost fix manteniment	612.000 €/any
Cost fix per capacitat	54,6 €/kW/any
Cost variable de generació	3,3€/MWh
Cost del gas natural	32,8 €/MWh

Figura 8.35. Costos d'operació i manteniment de la central [21]

S'ha considerat el mateix cost per persona de manteniment que en la central fotovoltaica, en aquest cas per una plantilla de 30 operaris. Pel cost del gas natural s'ha consultat les dades de l'Institut Català de l'Energia de l'any 2019. S'ha agafat el preu mitja del conjunt dels 28 països que formen la Unió Europea (UE-28) de 32,8 €/MWh, equivalent a 11,75 \$/MMBTU [28].

ANÀLISI FINANCER		
Període de simulació	Vida del projecte	40 anys
	Any d'inici productiu	2023
Variació de l'ingrés al llarg del temps	Inflació	3%
Finançament	Fons propis	139.974.262 €
Venda de l'electricitat	Tarifa d'alimentació	0,09 €/kWh
	Duració de la tarifa	25 anys
	Variació de la tarifa anual	1 %/any
Retorn de la inversió	Període de recuperació	37,1 anys

Figura 8.36. Anàlisi financer.

El període de retorn és tan elevat que al final de la vida de la central gairebé no s'han generat beneficis.

8.5. Estudi ambiental

En aquest apartat es fa el càlcul de la quantitat d'emissions de CO₂ que no s'emeten a l'atmosfera gràcies a la producció d'energia renovable, i que es produirien pel cas de generar aquesta energia en una central convencional que utilitzi combustibles fòssils pel seu funcionament. No es té en compte l'energia que es genera amb la caldera de gas natural.

El mix elèctric considerat és el presentat en el capítol de fotovoltaica, de 182gCO₂/kWh.

Estalvi d'emissions de CO₂	
Energia generada (kWh/any)	45.558.000
Mix elèctric (kgCO₂/kWh)	0,182
Estalvi d'emissions (tCO₂/any)	8.292
Energia generada per la caldera (kWh/any)	7.189.000
Emissions generades per la caldera (tCO₂/any)	1.309
Balanç d'emissions (tCO₂/any)	6.983

Figura 8.37. Emissions estalviades i generades per la central termosolar [21]

L'estalvi d'emissions de CO₂ és de 6.983 tones de CO₂ cada any, i equival a 4.484 cotxes fent 10.000 km/any. És cert que fabricar tots els elements de la central suposen un consum energètic i conseqüentment una generació d'emissions a l'atmosfera, però no s'ha aconseguit disposar d'aquesta informació per l'informe.

9. Comparació entre la CST i la FV

L'objectiu d'aquest apartat és valorar tota la informació obtinguda en els anteriors punts i poder comparar la central fotovoltaica amb la central termosolar de cilindres parabòlics amb tots els seus avantatges i inconvenients. Així, s'ha comparat la producció elèctrica, els aspectes econòmics i l'impacte ambiental d'ambdues centrals.

9.1. Producció elèctrica

En primer lloc, cal recordar que ambdues centrals es troben situades al mateix emplaçament, una superfície proposada pel Govern d'Andorra en el PSIEd'A i dirigida a la construcció d'una central solar gràcies a les condicions del terreny. Així, la superfície disponible per a la construcció de cadascuna de les dues centrals és de 60 ha. El fet de tenir una limitació d'espai comporta una restricció molt important per a la central termosolar. Aquesta necessita de dues etapes diferents (tèrmica i elèctrica) per generar l'electricitat produïda, mentre que la central fotovoltaica amb una sola etapa ja li és suficient.

En segon lloc, els mòduls fotovoltaics capten la radiació solar tant directa com indirecta, mentre que, els col·lectors solars cilíndrics parabòlics només són capaços de captar la radiació directa. Això comporta que la instal·lació FV pugui aprofitar una part més gran de l'energia rebuda del sol.

Pel que fa a la potència instal·lada, la central fotovoltaica compta amb aproximadament 47MWe, mentre que la central termosolar amb 18MWe. És important remarcar que la central termosolar produeix energia durant les hores que no hi ha sol ja que disposa d'un acumulador, mentre que la central fotovoltaica té la limitació de produir només les hores de sol. Això comporta que l'energia total entregada per la planta termosolar no s'allunyi tant de l'entregada per la fotovoltaica, ja que tot i produir menys potència, pot fer-ho durant més temps.

Per últim i com a paràmetre més important, l'energia elèctrica total produïda per la central termosolar és de 52,7 GWh/any mentre que, per la central fotovoltaica és de 92,4 GWh/any. Per tant, la instal·lació fotovoltaica produeix un 75% més d'energia que la termosolar sota les mateixes condicions de superfície i energia rebuda del sol. Tot i això, cal dir que la central CST ofereix l'avantatge de poder emmagatzemar l'energia.

A la següent taula de la Figura 9.1 es pot veure la comparació de tots els paràmetres explicats de forma resumida:

	CENTRAL FOTOVOLTAICA	CENTRAL TERMOSOLAR
Superfície disponible	60 ha	60 ha
Superfície útil de captació solar	24,5 ha	20 ha
Irradiació captada	Directa i indirecta	Directa
Potència elèctrica instal·lada (MWe)	47	18
Energia elèctrica generada (MWh/any)	92.388	52.747

Figura 9.1. Taula comparativa de la producció elèctrica entre la central fotovoltaica i la central termosolar.

En la següent Figura 9.2 es pot veure la comparació mensual de producció elèctrica de les dues centrals.

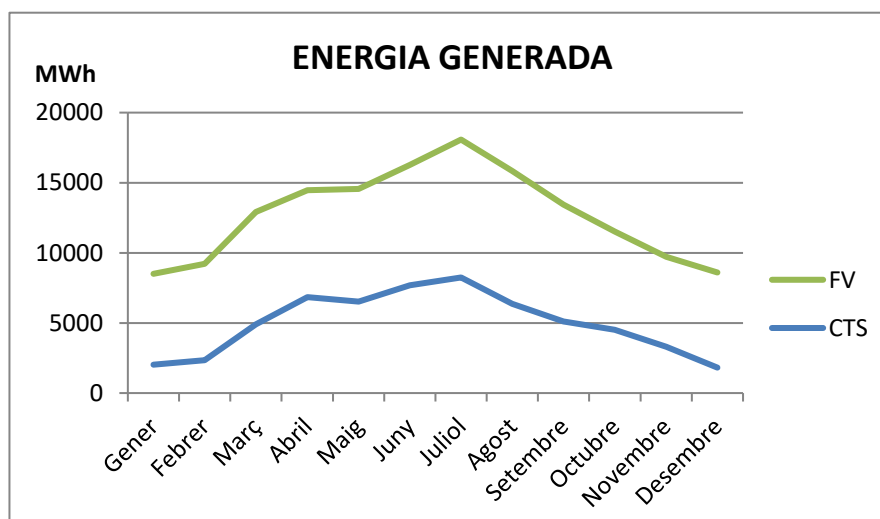


Figura 9.2. Comparació de l'energia generada de la central fotovoltaica i la central solar tèrmica.

A partir de la Figura 9.2, s'ha pogut observar que tot i la diferència que hi ha degut a la potència instal·lada, les dues corbes segueixen la mateixa tendència al llarg de tot l'any.

Això és degut a que els nivells de radiació solar són els mateixos per a totes dues centrals.

9.2. Estudi econòmic

La inversió inicial total que necessita la central termosolar és força major que la que necessita la central fotovoltaica. Hi ha una diferència de més de 93,8 M€ que sumat a una major producció elèctrica fa molt més atractiva aquest tipus de instal·lacions.

Els costos de funcionament i operació també són majors en la central termosolar. S'ha de tenir en compte que el personal encarregat de la planta és molt superior que per la central fotovoltaica, ja que s'ha de controlar a més a més del camp solar, el cicle de potència.

	Central fotovoltaica	Central termosolar
Inversió total (M€)	46,01	139,9
LCOE (€/MWh)	22	102,7
Període de retorn (anys)	5,5	37,1
Vida útil de la instal·lació (anys)	25	40

Figura 9.3. Taula comparativa de la inversió, el LCOE i el període de retorn de les centrals.

Els ingressos econòmics estan relacionats amb la producció energètica. Conseqüentment, com que la central fotovoltaica genera més energia té uns ingressos anuals majors. Això es veu en la capacitat d'amortitzar el capital invertit. La central fotovoltaica l'aconsegueix amortitzar en 5,5 anys mentre que la CST en més de 37 anys. Tot i que cal dir, que la vida útil de la central termosolar és de gairebé el doble (40 anys) que la de la fotovoltaica (25 anys).

9.3. Impacte ambiental

L'impacte ambiental tracta de quantificar el valor de les tones de diòxid de carboni que s'estalvien en substituir una part de l'energia de la xarxa actual per la produïda per una de les centrals d'aquest projecte.

En la següent Figura, es mostra el factor d'emissions produït i l'estalvi d'emissions de cadascuna de les centrals.

	Central fotovoltaica	Central termosolar
Energia generada (kWh/any)	92.388	45.558
LCE (gCO₂/kWh)	182	182
Estalvi d'emissions (tCO₂/any)	12.402	6.983

Figura 9.4. Taula comparativa de l'estalvi d'emissions i factor d'emissions de les dues centrals.

Com és evident, la central fotovoltaica té un estalvi major a la central termosolar ja que genera més energia elèctrica. A més a més, el fet d'utilitzar una caldera auxiliar en la central termosolar fa que el valor de les seves emissions estalviades sigui més petit perquè se li resten les emissions produïdes per aquesta.

Conclusions

En aquest projecte s'ha fet un estudi comparatiu entre una central termosolar operant amb cilindres parabòlics i una central fotovoltaica a Andorra ocupant un mateix emplaçament.

La situació energètica d'Andorra es caracteritza per una dependència gairebé total de l'exterior (>95%), bàsicament de França i d'Espanya, i una alta supeditació als combustibles fòssils, un recurs finit i subjecte a una alta volatilitat tant en preu com en disponibilitat. En el cas de l'energia elèctrica, tan sols una mica més del 15% de la demanda nacional és generada de forma autòctona i, majoritàriament a partir de l'energia hidroelèctrica. Aquesta particularitat posa de manifest la carència de sobirania del país, no entesa en el seu sentit polític sinó des d'una perspectiva energètica i tecnològica. Aquest factor, juntament amb la demanda energètica en continu creixement anual, el risc de saturació de les línies d'importació elèctrica, l'augment constant dels preus dels carburants i de les tarifes elèctriques, la necessitat d'integrar la política energètica a la resta de polítiques sectorials i la voluntat del compliment de les directrius energètiques europees van motivar l'elaboració del Pla Sectorial d'Infraestructures Energètiques d'Andorra. Aquest, identifica els equipaments necessaris per incrementar la producció energètica nacional fins al 33% de la demanda al 2030 prioritzant les energies renovables, de manera que el 67,8% de la producció nacional seria d'origen renovable.

Per dur a terme el dimensionament de les dues centrals s'han marcat una sèrie de requisits, alguns d'ells donats per FEDA, altres per la pròpia legislació andorrana, o per professionals d'aquestes dues tecnologies. El principal requisit ha estat la ubicació de les centrals. A través del PSIEd'A, Andorra posa a disposició terrenys repartits per tot el país on s'hi poden edificar centrals de generació que utilitzin energies renovables. Un altre requisit ha estat prescindir de l'emmagatzematge en la central fotovoltaica i considerar-lo imprescindible en la central termosolar per tal de vendre energia durant la nit. Finalment, en termes econòmics, FEDA ha marcat un preu de compra màxim de l'energia de 90 €/MWh.

S'ha escollit l'emplaçament de la Rebassa per a la ubicació de les dues centrals ja que és un dels punts de màxima irradiació del país. Consta d'una superfície de 60 hectàrees amb una pendent de 15° encarada direcció sud. Presenta una irradiació solar directe de 1841,2 kWh/m²/any i una irradiació horitzontal global de 1646,3 kWh/m²/any. Les condicions de vent màximes poden arribar als 87 km/h i a gruixos de neu màxims de 50 cm.

La instal·lació fotovoltaica s'ha dimensionat a partir del software suís PVsyst. El camp solar consta de 150.003 plaques fotovoltaiques i 103 inversors. Els mòduls tenen una potència nominal de 345Wp per unitat i estan col·locats amb una estructura fixa inclinada a 40° respecte l'horitzontal. Per altra banda, l'inversor compta amb una potència de 500 kW. L'energia total injectada a la xarxa per la instal·lació fotovoltaica és de 92.388 MWh/any. La qual cosa implica una producció específica de 1.785 kWh/ kWp/any i una proporció de rendiment del 89,5%, un valor força alt pel que fa a les instal·lacions fotovoltaiques. La inversió necessària és de 46,01 M€ (890 €/kWp) i, juntament amb els costos de funcionament, es té un LCOE de 22 €/MWh. S'aconsegueix amortitzar la inversió fotovoltaica ja que la vida útil de la central és de 25 anys i té un *payback* de 5,5 anys. Pel que fa al impacte ambiental, s'estalvien anualment 12.402 tCO₂.

Per altra banda, la central solar tèrmica de cilindres parabòlics s'ha dimensionat a partir del software americà SAM. El camp solar consta de 246 col·lectors formant 41 llaços que eleven la temperatura del fluid tèrmic de 297°C a 397°C respectivament. El fluid que circula pel camp solar és l'oli Therminol VP-1, amb un rang d'operació d'entre 12°C (temperatura de congelació) i 400°C. Des d'aquest circuit, a través de intercanviadors, es passa la calor al cicle de potència o al sistema d'emmagatzematge. L'acumulació es fa amb sals Hitec a partir de dos tancs amb capacitat de 9 hores d'emmagatzematge. El cicle de potència s'ha dimensionat per obtenir un múltiple solar de 2, corresponent a un potència elèctrica de 18 MW. A part, s'ha instal·lat una caldera auxiliar de gas natural amb 3 períodes del 20%, 30% i 50% de suport per recolzar la generació de la central. Amb tot això, la central genera 52.747 MWh/any en 3258 hores, aconseguint un factor de càrrega del 37,2%. La inversió necessària és de 139,54 M€ i, juntament amb els costos de manteniment i del gas natural, es té un LCOE de 102,7 €/MWh. S'aconsegueix amortitzar la inversió termosolar ja que la vida útil de la central és de 40 anys i té un *payback* de 37 anys. Pel que fa al impacte ambiental, s'estalvien anualment 6.983 tCO₂.

Per acabar, cal dir que la instal·lació fotovoltaica produeix un 75% més d'energia que la termosolar sota les mateixes condicions de superfície i energia rebuda del sol. Tot i això, la central CST ofereix l'avantatge de poder emmagatzemar l'energia. El fet de poder acumular-la és molt interessant pel sistema energètic andorrà ja que permetria una major independència a les hores sense sol o inclús en dies de neu. La inversió econòmica de la instal·lació fotovoltaica s'amortitza al cap de 5,5 anys després de la seva arrencada, oferint un total de més de 19 anys d'ingressos econòmics. No obstant això, la termosolar fins al cap de 37 anys de l'inici de la seva producció, no rep cap benefici cosa que la fa menys

seductora en termes econòmics. A més, la construcció de qualsevol de les dues centrals es reduirien les emissions de CO₂ expulsades a l'atmosfera.

Finalment, cal dir la central fotovoltaica estaria produint al voltant d'un 16% del consum elèctric andorrà mentre que la termosolar, produiria el 9%. Aquesta dada mostra que la primera porta a Andorra més a prop del seu objectiu energètic del 2030. Així, tenint en compte les dades energètiques, econòmiques i ambientals, es creu que actualment tindria més sentit la construcció d'un Parc Solar fotovoltaic a l'emplaçament proposat pel Govern andorrà situat a La Rabassa. No obstant això, l'energia solar tèrmica continua estant en ple creixement i possiblement d'aquí uns anys serà una opció molt competitiva envers la fotovoltaica.

Agraïments

Agraïm a la nostra tutora, Carme Pretel Sánchez, totes les estones que ha dedicat a ajudar-nos a tirar endavant el projecte i per la informació que ens ha proporcionat.

També agraïm a FEDA, i concretament a Marc Calvet, la seva bona disposició i tota la informació que ens han facilitat sobre les dades energètiques i situació actual d'Andorra.

No ens podem oblidar tampoc d'en Juan José Serrano i d'en Carlos David Pérez, experts en energia solar tèrmica de concentradors solars, que ens han aconsellat i subministrat informació al llarg de tot el decurs del projecte.

Així mateix, agraïm l'ajuda de l'enginyer andorrà Jordi Brescó Ruiz per la seva predisposició i la informació que ens ha proporcionat en relació a la central solar fotovoltaica.

Per altra banda, volem agrair a l'enginyer Joan Solanelles Betriu el seu consell i la seva ajuda durant tot el seguiment del projecte.

Finalment, agraïm a les nostres famílies i a totes les persones que de forma continuada ens han donat suport al llarg de tot aquest temps.

Bibliografia

- [1] GOVERN D'ANDORRA. *Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra*, 2012.
- [2] GOVERN D'ANDORRA. *Guia d'aplicació del Reglament de la generació d'energia elèctrica*, 2018.
- [3] GOVERN D'ANDORRA. BOPA. Llei 21/2018, del 13 de setembre, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc)
- [4] FEDA, 2020. Lloc web: <https://www.feda.ad/energia-i-meteo/energia/historic>.
- [5] DEPARTAMENT D'ESTADÍSTICA, 2020. Lloc web: www.estadistica.ad
- [6] GOVERN D'ANDORRA, Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Sostenibilitat. *Pla Sectorial d'Infraestructures Energètiques d'Andorra*, 18 febrer del 2018.
- [7] PVGIS, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport. Lloc web: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
- [8] GOVERN D'ANDORRA. Servei Meteorològic Nacional, 2019. Lloc web: www.meteo.ad
- [9] GOVERN D'ANDORRA, Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Sostenibilitat. Llei LITECC, lloc web: <https://www.mediambient.ad/normativa/la-litecc>.
- [10] RENEWABLE ENERGY. SUN LIGHT ENERGY. Energy technology, MUEI ETSEIB, 2019.
- [11] RENEWABLE ENERGY II. PHOTOVOLTIC ENERGY. Energy technology, MUEI ETSEIB, 2019.
- [12] CÉLULA FOTOELÉCTRICA, 2020. Lloc web: https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula_fotoel%C3%A9ctrica
- [13] DIFERÈNCIA ENTRE PANELL DE 60 O 72 CÈL·LULES, 2018. Lloc web: <https://news.energysage.com>
- [14] IMATGE PANELL MONOCRISTAL·LÍ. Lloc web: <https://solarmat.es>

- [15] IMATGE PANELL POLICRISTAL·LÍ I AMORF. Lloc web: <https://www.implicat.com/tipos-de-paneles-solares/>
- [16] RENEWABLE ENERGY I. CONCENTRED SOLAR POWER (CSP). Energy technology, MUEI ETSEIB, 2019.
- [17] CENTRAL TERMOSOLAR D'ANDASOL, 2020. Lloc web: <https://es.wikipedia.org/wiki/Andasol>
- [18] IMATGE CONCENTRADOR FRESNEL. Lloc web: <https://www.tecpa.es/tipos-de-centrales-termosolares/>
- [19] IMATGE DISC PARABÒLIC. Lloc web: <http://www.concentracionsolar.org.mx/>
- [20] Montes, M.J. et al. *Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors*. Solar Energy 83 (2009) 2165-2176, Elsevier. Agost, 2009.
- [21] SYSTEM ADVISOR MODEL 2018.11.11. National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. Lloc web: <https://sam.nrel.gov/>
- [22] Yathin Krishna, M. Faizal, R.Saidur, K.C. Ng i Navid Aslfattahi. (2020). State of the art heat transfer fluids for parabolic trough collector. Elsevier, 6.
- [23] E. Lüpfert, E. Zarza-Moya, M. Geyer, P. Nava, J. Langenkamp, W. Schiel, A. Esteban, R. Osuna i E. Mandelberg. (2003). Euro Trough Collector Qualificaion Complete – Performance Test Results from PSA. ISES
- [24] Dr. Davd W. Kearney. Parabolic Trough Colector Overview. Notes on a bit of history, development after Luz, and a recent surge in trough collector technology offerings, 2007.
- [25] Michael J. Wagner i Paul Gilman. Technical Manual for the SAM Physical Trough Model, 2011.
- [26] GOVERN D'ANDORRA. BOPA Decret núm. 30 de 23 de maig de 2018. Decret d'aprovació i publicació del Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra
- [27] BANCO DE ESPAÑA Canvi d'euros a dòlars. Lloc web: <https://www.bde.es/bde/es/>

- [28] ICAEN. Preus de gas natural any 2019. Lloc web: <http://icaen.gencat.cat/ca/energia/preus/>
- [29] IMATGE ESQUEMA TURBINA. Lloc web: <https://www.areatecnologia.com>
- [30] GENERALITAT DE CATALUNYA, Institut Català d'Energia, novembre 2020. Lloc web: www.gencat.cat/icaen
- [31] OCU. Panells fotovoltaics, 2019-20. <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/el-mejor-panel-solar-del-mundo/>
- [32] VIOSOR DE MAPES PER LES CORBES DE NIVELL. Lloc web: <https://www.ideandorra.ad/geoportal/>
- [33] Oriol Travesset Baró. (2017). Prospectiva energètica al Principat d'Andorra. Model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista, p11.

ANNEX

ANNEX I: Dades meteorològiques Meteonorm

ANNEX II: Fitxa tècnica SunPower SPR-X21-345

ANNEX III: Pèrdues tèrmiques del tub receptor

ANNEX IV: Corbes de potència tèrmica i energia neta produïdes horàries de cada més