



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

---

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria  
de Manresa

TREBALL DE FI DE GRAU

# Estudi tècnic i econòmic d'una estructura de suport per la implantació simbiòtica de panells fotovoltaics en un camp de cultiu

GRAU EN ENGINYERIA MECÀNICA  
2022 - 2023

Autor: Francesc Bibiloni Bibiloni  
Directora: Maria Dolors Riera Colom  
Data: 09/06/2023

# Index General

MEMÒRIA DEL TREBALL DE FI DE GRAU	3
ANNEXES DEL TREBALL DE FI DE GRAU	56

MEMÒRIA DEL TREBALL DE FI DE GRAU

# Estudi tècnic i econòmic d'una estructura de suport per la implantació simbiòtica de panells fotovoltaics en un camp de cultiu

GRAU EN ENGINYERIA MECÀNICA  
2022 - 2023

Autor: Francesc Bibiloni Bibiloni  
Directora: Maria Dolors Riera Colom  
Data: 09/06/2023

# Abstract

For the realization of this project, a state-of-the-art study has been carried out which has served to explain what agrivoltaic systems are, which is its potential for growth in Spain and which is its main inconvenience, putting the structures in the spotlight. In addition, a brief introduction to the finite element method has been made and the design software used in the study, Robot Structural Analysis®, has been explained.

Next, the technical study was carried out, to carry it out the applicable regulations were consulted and together with the conditions established by the company, the technical requirements to be met were defined. With the requirements defined, the process of designing and simulating the structure has begun, a process in which there have been several iterations to achieve a technically viable structure.

And finally with the design of the viable prototype, the economic study has been carried out and the obtained prices have been suitable for the implementation of the structure.

# Resum

Per a la realització d'aquest projecte s'ha dut a terme un estudi de l'estat de l'art que ha servit per explicar què són els sistemes agrivoltaics, quin és el seu potencial de creixement a Espanya i quin és el seu principal inconvenient, posant les estructures en el punt de mira. A més a més s'ha realitzat una breu introducció al mètode dels elements finits i explicat el programari de disseny que s'ha utilitzat en l'estudi, sent aquest el Robot Structural Analysis®.

Seguidament s'ha realitzat l'estudi tècnic, per portar-lo a terme s'ha consultat la normativa aplicable i conjuntament amb les condicions establertes per l'empresa s'han definit els requisits tècnics a complir. Amb els requisits definits s'ha començat el procés de disseny i simulació de l'estructura, procés en el que hi han hagut diverses iteracions per aconseguir una estructura viable tècnicament.

I finalment amb el disseny del prototip viable, s'ha realitzat l'estudi econòmic i s'han obtingut uns preus que serien adequats per a la implantació de l'estructura.

# Agraïments

Vull expressar el meu sincer agraïment a tots aquells que han estat presents durant el meu treball de final de grau i d'altres que han contribuït a que hagi arribat fins aquí.

En primer lloc, vull agrair el suport i els esforços que han fet els meus familiars per tal que jo sigui aquí el dia d'avui. No m'oblido dels meus companys de feina que les darreres setmanes m'han mantingut animat i amb ganes. I com no podia ser d'altre manera agraeixo l'assessorament rebut per part de la tutora, gràcies M<sup>a</sup> Dolors. Sense ells, aquest projecte no hauria estat possible.

Agrair a Sud Renovables la seva col·laboració en aquest treball. El seu suport i recursos aportats han estat importants per al desenvolupament d'aquest projecte i valoro l'oportunitat que m'han brindat.

Agraïments especials a tots aquells bons professors que s'han creuat en el meu camí, afortunadament han estat molts, i han aconseguit transmetre la seva passió per l'ensenyament. En menció a una exposició d'un d'aquests professors, deixo anar la següent metàfora: "Qui diria que aquell noi de 1er d'ESO, avui es troba posant les teules de la casa i es prepara per seguir amoblant-la".

Gràcies a tots per ser una font d'inspiració i suport constant. El vostre ajut ha estat de gran valor per al meu èxit acadèmic.

# Índex de la memòria

<b>1. Introducció:</b> .....	<b>10</b>
1.1. Objectius.....	10
1.2. Abast del TFG.....	10
1.3. Requisits del TFG.....	11
1.4. Motivació.....	11
<b>2. Antecedents i estat de l'art:</b> .....	<b>13</b>
2.1. Agrivoltaica.....	13
2.1.1. Definició d'agrivoltaisme [6].....	13
2.1.2. Situació actual de l'agrivoltaica.....	13
2.1.3. Estructures habituals.....	14
2.1.4. Necessitat d'un nou model d'estructures.....	17
2.2. Mètode dels elements finits, FEM.....	17
2.2.1. Procés de l'anàlisi estructural amb Robot Structural Analysis®.....	18
<b>3. Estudi tècnic:</b> .....	<b>20</b>
3.1. Normativa aplicable.....	20
3.1.1. Normativa estructures metàl·liques.....	21
3.1.2. Esborrany de la instrucció tècnica per a les instal·lacions agrivoltaiques (Confidencial).....	21
3.2. Aplicació de la normativa al Robot Structural Analysis Professional®.....	22
3.3. Requisits tècnics a complir.....	24
3.4. Plantejament de l'estructura.....	25
3.5. Procés de simulació de l'estructura.....	28
3.5.1. Materials i propietats.....	28
3.5.2. Secció.....	30
3.5.3. Model geomètric.....	34
3.5.4. Condicions de contorn.....	38
3.5.5. Càrregues.....	39
3.6. Avaluació de resultats.....	45
<b>4. Estudi econòmic de l'estructura dissenyada:</b> .....	<b>50</b>
<b>5. Conclusions:</b> .....	<b>52</b>
<b>6. Referències:</b> .....	<b>53</b>

# Llista de figures

Figura 1: Parc agrivoltaic sobre vinya, projecte a Tresserre de Sun'Agri. [7].....	14
Figura 2: Parc agrivoltaic sobre pomeres, a Alemanya de Baywa re i Fraunhofer ISE.....	15
Figura 3: Estructura amb forma d'hivernacle convencional, de El Español. [8].....	16
Figura 4: Hivernacle amb cel·les fotovoltaïques incorporades al vidre, de SolarInfo.es [9]...	16
Figura 5: Configuració de normatives (Font: Robot Structural Analysis Professional®).....	22
Figura 6: Configuració de normatives de càrregues (Font: Robot Structural Analysis Professional®).....	23
Figura 6: Editor de regulació de combinacions segons norma (Font: Robot Structural Analysis Professional®).....	23
Figura 7: Matriu repetitiva aïllada.....	26
Figura 8: Perfil de la matriu repetitiva aïllada.....	27
Figura 8: Detall de les unions de perfileria.....	27
Figura 9: Propietats de l'acer (Font: Robot Structural Analysis Professional®).....	29
Figura 10: Propietats de l'alumini (Font: Robot Structural Analysis Professional®).....	30
Figura 11: Rail C47 [4].....	31
Figura 12: Rail C71 [5].....	31
Figura 13: Menú d'inici del Robot Structural Analysis Professional®.....	31
Figura 14: Secció perfil C47.....	32
Figura 15: Secció perfil C71.....	32
Figura 16: Secció rodona dels pilars.....	33
Figura 17: Secció CAE suports triangles.....	33
Figura 18: Secció rodona dels pilars.....	34
Figura 19: Secció CAE suports triangles.....	34
Figura 20: Estructura en format de barres.....	35
Figura 21: Detall del triangle.....	36
Figura 22: Detall 3D de l'estructura.....	36
Figura 23: Estructura amb seccions de barra actives.....	37
Figura 24: Estructura definida amb els panells.....	37
Figura 25: Entorn de disseny de les condicions de contorn (Font: Robot Structural Analysis Professional®).....	38
Figura 26: Estructura amb condicions de contorn definides.....	39
Figura 27: Aplicació de càrregues del pes propi.....	40
Figura 28: Valor bàsic de la velocitat del vent, DB SE-AE [https://laureamiro.com/esp/2012/04/luchando-contra-mapas-viento-espanoles/ ].....	41
Figura 29: Entorn de caracterització de la simulació de vent.....	42
Figura 30: Entorn de simulació de vent.....	42
Figura 31: Zones climàtiques d'hivern, DB SE-AE.....	43
Figura 32: Taula de sobrecàrrega de neu en un terreny horitzontal [kN/m2], DB SE-AE.....	43
Figura 33: Aplicació de la sobrecàrrega de neu.....	44
Figura 34: Fletxes màximes i mínimes V1.....	46
Figura 35: Esforços màxims i mínims V1.....	46



Figura 36: Detall canvis estructura V3.....	47
Figura 37: Fletxes màximes i mínimes V3.....	48
Figura 38: Esforços màxims i mínims V3.....	49
Figura 40: Taula resum de l'estudi econòmic.....	51

# 1. Introducció:

## 1.1. Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és realitzar l'estudi tècnic d'una estructura de suport per a panells fotovoltaics situats en un camp de cultiu, permetent així el conreu d'aquest al mateix temps que s'aconsegueix aprofitar la superfície de conreu per produir energia.

A més a més, es pretén arribar a una conclusió respecte a la seva viabilitat econòmica.

## 1.2. Abast del TFG

En primer lloc, es realitzarà una revisió de l'estat de l'art de les estructures agrivoltaiques actuals i dels processos de disseny mitjançant el FEM per tal de recopilar informació sobre les estructures agrivoltaiques existents, incloent els seus dissenys, materials utilitzats i característiques tècniques. Això permetrà identificar els punts forts i febles de les solucions actuals i establir una base de coneixements per al disseny de la nova estructura.

A continuació, es procedirà al disseny de l'estructura agrivoltaica, tenint en compte els requisits establerts pel projecte. Aquest disseny serà sotmès a simulacions numèriques utilitzant el FEM per avaluar la seva viabilitat tècnica. Es tindran en compte factors com la resistència estructural, la distribució de càrregues, l'estabilitat i altres consideracions importants per garantir un rendiment òptim de l'estructura.

Després d'avaluar la viabilitat tècnica del disseny proposat, es durà a terme un estudi econòmic per comparar-lo amb altres solucions disponibles al mercat. Aquest estudi tindrà en compte factors com els costos de producció, els materials utilitzats, els costos d'instal·lació i manteniment, així com els beneficis econòmics esperats, com els estalvis energètics i la producció agrícola adicional.

Finalment, es realitzaran les conclusions basades en l'anàlisi tècnic i econòmic realitzat. Es determinarà si el disseny proposat és viable des del punt de vista tècnic i econòmic. D'aquesta forma es podran identificar possibles millores o adaptacions per al futur desenvolupament de l'estructura agrivoltaica.

Amb aquest projecte, s'espera contribuir al camp de la energia renovable i l'agricultura sostenible mitjançant el disseny i desenvolupament d'una estructura agrivoltaica eficient i econòmicament viable.

Val a dir que no és de l'abast d'aquest TFG la construcció d'un prototip físic.

### 1.3. Requisits del TFG

Els requisits d'aquest TFG es resumeixen en aconseguir un model d'estructura agrivoltaica que compleixi els següents punts:

- Disseny d'estructura modular
- Adaptable a diversos entorns d'aplicació
- Lleuger per facilitar la instal·lació
- Viable tècnica i econòmicament
- Permet una producció escalable
- Fàcil accés realització de manteniments

### 1.4. Motivació

Les energies renovables han passat a ser una de les meves grans inquietuds en els darrers anys, és per això que alhora de buscar pràctiques curriculars en empresa vaig decidir escollir una empresa enfocada en l'energia fotovoltaica. A l'octubre del 2021 vaig començar en conveni de pràctiques a SudRenovables i des del juliol de 2022 com a treballador en plantilla, durant aquest període he estat treballant en projectes domèstics personalitzats segons les necessitats energètiques de cada client.

Alhora de començar el TFG em van recomanar fer-lo acompanyat de l'empresa per tal de poder aprofundir més en un cas real, i després de consultar-ho amb l'empresa em van proposar fer aquest estudi sobre les estructures per agrivoltaica ja que quan algun client s'ha interessat per fer una instal·lació d'aquest tipus finalment ho han acabat descartant per el sobrecost que comporta tenir unes estructures fetes a mida.

## 2. Antecedents i estat de l'art

A dia d'avui el sector de l'agrivoltaica es troba en els seus inicis i totes les solucions estructurals que s'han creat fins al moment han estat fetes a mida per cada client. Qualsevol producte fet a mida implica que el preu final d'aquest augmenta de forma significativa, i tant els agricultors com els inversors interessats en promoure projectes de gran envergadura es troben que una de les majors partides dels pressupostos correspon a l'estructura fet que de moment dificulta la viabilitat econòmica d'aquestes instal·lacions.

El fet de produir una estructura estàndard i adaptable a diverses situacions permet reduir els costos de I+D per unitat d'estructura i al tractar-se d'un producte enfocat a una producció elevada es podria arribar a desenvolupar una línia de producció que permet reduir molt el cost en si de cada una de les peces de l'estructura.

### 2.1. Agrivoltaica

L'agrivoltaica sorgeix com a una alternativa d'implantació de l'energia solar fotovoltaica a gran escala en la que s'aconsegueix aprofitar el mateix terreny tan per la producció d'energia solar fotovoltaica com per l'agricultura convencional. Aquesta solució pretén ajudar a satisfer la demanda mundial d'energia amb energia renovable, sense causar una intrusió significant al sector agrícola.

#### 2.1.1. Definició d'agrovoltisme [6]

Sistema d'explotació mixt, agrari i elèctric, que combina en una mateixa extensió de terreny la producció agropecuària amb la generació d'electricitat a partir de llum solar.

#### 2.1.2. Situació actual de l'agrivoltaica

La situació actual de l'agrivoltaica a Espanya és prometedora, el país presenta un gran potencial per aquesta tecnologia, donat el seu clima favorable, la disponibilitat de terrenys agrícoles i l'objectiu de promoure les energies renovables.

La combinació de panells solars amb les activitats agrícoles permet aprofitar al màxim l'espai i els recursos disponibles. A més, l'ombra proporcionada pels panells solars pot reduir l'evaporació de l'aigua i protegir els cultius dels efectes adversos de la radiació solar excessiva.

S'han realitzat diverses instal·lacions pilot i projectes comercials que han demostrat els beneficis tant per a la producció d'energia renovable com per a la producció agrícola.

Les institucions governamentals i les empreses d'energia renovable han mostrat un interès creixent en l'agrivoltaica. S'han posat en marxa polítiques i incentius per fomentar aquesta tecnologia, incloent-hi subvencions, crèdits fiscals i facilitats en les autoritzacions administratives per a les instal·lacions agrivoltaiques. A més, s'han establert col·laboracions entre el sector agrícola i les empreses d'energia per promoure la implantació d'aquestes estructures en les explotacions agràries.

Tot i així un dels principals problemes que presenta el sector, com ja s'ha comentat anteriorment, és l'elevat cost de les estructures ja que de moment suposen una de les parts més importants del pressupost en aquest tipus d'instal·lacions.

### 2.1.3. Estructures habituals



Figura 1: Parc agrivoltaic sobre vinya, projecte a Tresserre de Sun'Agri. [7]

En el cas de la imatge en la figura 1 es tracta d'una estructura d'inclinació variable que incorpora seguidors solars d'un eix. Aquestes estructures aconseguen una major producció solar ja que s'aconsegueix millorar la incidència de la llum sobre els panells solars, sobretot en els mesos d'estiu quan la producció és major. Per maximitzar la producció s'alinea l'eix de gir amb el sud, permetent que al matí els panells tinguin una incidència directa del sol estan inclinats a l'est i variar la inclinació durant el transcurs del dia per acabar amb una inclinació a l'oest durant les hores de la tarda. Per contra aquesta solució presentarà un cost i manteniment elevat degut als diversos motors i parts mòbils que conformen el sistema en sí.



Figura 2: Parc agrivoltaic sobre pomeres, a Alemanya de Baywa re i Fraunhofer ISE. [8]

Aquesta segona estructura vista en la figura 2, es tracta d'una solució d'inclinació i orientació fixa orientada a sud. Que tal i com s'ha comentat abans pot resultar més adequada per augmentar la producció durant els mesos d'hivern. En aquesta estructura es pot apreciar que es forma una malla reticulada en la que uneix les files de panells entre elles.





Figura 3: Estructura amb forma d'hivernacle convencional, de El Español. [13]

En aquest tercer tipus d'estructura de la figura 3, podem veure una solució que presenta una forma similar a la dels hivernacles i que es diferencia per ajuntar varies files de panells i presentar una major distància entre cada conjunt de panells. Aquesta solució deixa bona part de l'estructura sense ser aprofitada per la implantació dels panells fotovoltaics. També es pot veure que en aquest cas ha estat necessari realitzar una fonamentació amb formigó.



Figura 4: Hivernacle amb cel·les fotovoltaïques incorporades al vidre, de SolarInfo.es [9]



En aquesta figura 4, podem veure un altre tipus d'estructura que parteix d'un típic hivernacle en el que s'ha substituït els vidres convencionals per uns que incorporen algunes cel·les fotovoltaïques. Aquest podria ser un model d'adaptació per hivernacles existents, tot i que al mantenir la major part de la superfície ocupada per vidre tradicional la producció energètica serà inferior a altres solucions.

#### 2.1.4. Necessitat d'un nou model d'estructures

Tal i com es pot veure amb les estructures descrites anteriorment en cap dels casos anteriors es veu una solució pensada per ser modular, adaptable i fàcil d'instal·lar. Fets que es tradueixen com ja s'ha comentat en un sobrecost alhora de desenvolupar aquests tipus de projectes.

Per tant es pot confirmar que hi ha una necessitat en el mercat d'una solució nova que aconsegueixi reduir els costos de producció i instal·lació d'aquestes estructures per ajudar a augmentar la viabilitat econòmica dels projectes agrivoltaïcs.

Un cop arribats aquí es poden entendre millor encara els requisits esmentats anteriorment a l'apartat 1.3., que en definitiva pretenen superar les mancances del mercat.

## 2.2. Mètode dels elements finits, FEM

El FEM és una tècnica de simulació numèrica àmpliament utilitzada en el camp de l'anàlisi estructural. Consisteix en dividir una estructura o geometria continua en elements més petits, fet que permet modelar i simular el seu comportament d'una forma més precisa.

Ens permet analitzar les tensions, deformacions i vibracions resultants a les estructures després d'haver aplicat unes condicions o càrregues determinades que pretén simular l'entorn real on s'instal·larà l'estructura en qüestió.

Per la simulació de la viabilitat tècnica de l'estructura que es dissenyarà es farà servir un anàlisi estàtic, aquest tipus de simulació permet entendre com es

distribueixen les tensions i deformacions de l'estructura estudiada quan s'aplica una càrrega constant.

Per a la realització de l'anàlisi estàtic amb el FEM es farà servir el programa *Robot Structural Analysis*®, en la seva versió estudiantil.

### 2.2.1. Procés de l'anàlisi estructural amb *Robot Structural Analysis*®

El procediment per realitzar el càlcul d'una estructura amb el programari de disseny *Robot Structural Analysis*® es pot resumir en els següents passos:

1. Definició de normativa aplicable: Es selecciona la normativa aplicable segons l'ubicació on es pretén implantar l'estructura, ja que es tracta d'un programa d'ús internacional i permet seleccionar la normativa que es vol seguir alhora de dissenyar. Un cop determinada el programa aplica les regles de disseny de forma automàtica i facilita la simulació.
2. Creació del model geomètric: Es crea el model de l'estructura en l'entorn de disseny pròpi del programa, definint els elements estructurals com ara pilars, bigues, lloses o tancaments. Al ser un programa d'*Autodesk*® permet importar models de programes de disseny arquitectònic com *Autocad*® o construir el model des de zero com s'ha comentat anteriorment.
3. Definició de propietats i assignació de materials: Es procedeix a assignar propietats estructural als diferents elements, com ara els perfils de secció, el material d'aquests i les propietats mecàniques pertinents. Tot plegat permet definir les característiques pròpies de cada element en funció de la seva geometria i material.
4. Condicions de contorn: Es determinen les restriccions de desplaçaments, punts de suport i connexions estructurals entres els pròpis elements. Aquestes condicions de contorn permeten determinar el comportament del conjunt de l'estructura amb l'entorn i com actuen les forces o càrregues que s'aplicaran a seguidament.

5. Aplicació de càrregues: Es procedeix a aplicar les càrregues que intervenen en l'anàlisi estructura com poden ser el pes propi, les càrregues de vent o les càrregues de neu, entre d'altres. Aquestes càrregues poden ser aplicades en els nodes, en les barres o distribuïdes amb forma de pressió sobre una superfície.
  
6. Configuració i execució de l'anàlisi: Es selecciona el tipus d'anàlisi desitjat i es procedeix a configurar els factors de seguretat i les combinacions de càrregues que pertoquin segons normativa o requeriments de disseny. El programari executa tot el càlcul pel mètode dels elements finits i genera uns informes de càlcul amb les deformacions, les tensions, les forces internes resultants de la simulació.
  
7. Avaluació de resultats: Amb les dades obtingudes dels informes generats pel programari es procedeix a revisar els resultats i verificar si compleix amb els criteris de disseny i de seguretat que s'han establert.