

L'ENERGIA DEL QUE QUEDA



SOSTENIBILITAT

ECONOMICA

MEDIAMBIENTAL

I SOCIAL

La utilització del residu de suc de poma per a la confecció de cel·les fotovoltaïques

Treball de recerca de batxillerat

Autor: M. Fuji

“Si no ho pots explicar de manera senzilla, és que no ho has entès bé.”

(atribuïda a Albert Einstein)

RESUM

A hores d'ara, el canvi climàtic és considerat la més gran de les amenaces pel medi ambient i urgeix trobar-hi solucions. És d'aquesta necessitat que neix la motivació per optimitzar l'eficiència dels processos basats en energies netes i per maximitzar l'aprofitament dels recursos per a generar energia.

Les cel·les solars sintetitzades amb colorant (DSSCs) són un innovador tipus de cel·les fotovoltaïques amb el potencial suficient per a substituir les cel·les convencionals de silici. Aquestes cel·les es caracteritzen especialment per usar productes orgànics (verdures, fruites etc) amb l'objectiu de generar electricitat.

Aquest projecte parteix de la premissa que no té cap mena de coherència fer servir aliments per a la generació d'electricitat, i proposa l'aprofitament de residu d'aliments per a aquest fi. Així doncs, aquest és el primer estudi a provar la possibilitat de construir DSSCs a partir del residu de suc de poma (*Malus domestica*).

Per assolir aquest fi, s'han construït amb èxit quatre DSSCs funcionals (poma vermella, residu de suc de poma, poma verda i poma podrida). Aquestes s'han caracteritzat i comparat mitjançant paràmetres elèctrics i tècniques òptiques d'anàlisi per tal d'estudiar la influència de les variables de color i maduresa en el rendiment de la cel·la.

Finalment, degut a l'abundant producció de pomes de la província de Girona, s'ha plantejat i discutit la possible aplicació d'aquest tipus de cel·les en aquest territori. Per aconseguir modelitzar aquest hipotètic sistema circular d'aprofitament de residu, s'han estudiat diferents factors com ara: l'energia que podria ser produïda en comparació a l'energia consumida de la província, el preu en comparació al preu de les cel·les de silici, la degradació i altres variables. Malauradament, els resultats de l'aplicació de la proposta prèviament mencionada han resultat substancialment poc satisfactoris.

PARAULES CLAU: Energia elèctrica, Cel·la fotovoltaïca, Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs), Sensibilitzador, Residu de suc de poma, *Malus domestica*, Eficiència, Província de Girona, Paràmetres elèctrics, Tècniques òptiques d'anàlisi.

RESUMEN

En estos momentos, el cambio climático es considerado la más grande de las amenazas para el medio ambiente y urge encontrar soluciones. Es de esta necesidad que nace la motivación para optimizar la eficiencia de los procesos basados en energías limpias y para maximizar el aprovechamiento de los recursos para generar energía.

Las celdas solares sintetizadas con colorante (DSSCs) son un innovador tipo de celdas fotovoltaicas con el potencial suficiente para sustituir a las celdas convencionales de silicio. Estas celdas se caracterizan especialmente por usar productos orgánicos (verduras, frutas etc) para generar electricidad.

Este proyecto parte de la premisa de que no tiene ningún tipo de coherencia utilizar alimentos en la generación de electricidad, y propone el aprovechamiento de residuos de alimentos para este fin. Así pues, éste es el primer estudio en probar la posibilidad de construir DSSCs a partir del residuo de zumo de manzana (*Malus domestica*).

Para lograr este fin, se han construido con éxito cuatro DSSCs funcionales (manzana roja, residuo de zumo de manzana, manzana verde y manzana podrida). Éstas se han caracterizado y comparado mediante parámetros eléctricos y técnicas ópticas de análisis para estudiar la influencia de las variables de color y madurez en el rendimiento de la celda.

Por último, debido a la abundante producción de manzanas de la provincia de Girona, se ha planteado y discutido la posible aplicación de este tipo de celdas en este territorio. Para conseguir modelizar este hipotético sistema circular de aprovechamiento de residuo, se han estudiado distintos factores como: la energía que podría ser producida en comparación con la energía consumida de la provincia, el precio en comparación con el precio de las celdas de silicio, la degradación y otras variables. Desgraciadamente, los resultados de la aplicación previamente mencionada han resultado substancialmente poco satisfactorios.

PALABRAS CLAVE: Energía eléctrica, Celda fotovoltaica, Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs), Sensibilizador, Residuo de zumo de manzana, *Malus domestica*, Eficiencia, Provincia de Girona, Parámetros eléctricos, Técnicas ópticas de análisis.

ABSTRACT

Nowadays, climate change is considered is considered the greatest threat to the environment and, consequently, solutions must be urgently found. This need is the source of the motivation to optimize the efficiency of processes based on clean energies and to maximize the use of resources to generate energy.

Dye-Synthesized Solar Cells (DSSCs) are an innovative type of photovoltaic cells with enough potential to replace conventional silicon cells. These cells are particularly characterized by using organic products (vegetables, fruit, etc.) to generate electricity.

This project is based on the premise that it is not coherent to use food in the generation of electricity and puts forward the use of food waste for this purpose. Actually, this is the first paper to explore and verify the possibility of building DSSCs from apple juice residue (*Malus domestica*).

To achieve this goal, four functional DSSCs (red apple, apple juice residue, green apple and rotten apple) have been successfully constructed. These have been characterized and compared using electrical parameters and optical analysis techniques in order to study the influence of color and maturity variables on cell performance.

Finally, due to the abundant production of apples in the province of Girona, the possible application of this type of cells in this territory has been considered and discussed. In order to model this hypothetical circular waste utilization system, different factors have been studied such as the energy which could be produced compared to the energy consumed in the province, DSSCs price compared to silicon cells, degradation and further variables. Unfortunately, the results of the aforementioned application have been substantially unsatisfactory.

KEYWORDS: Electrical energy, Photovoltaic cell, Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs), Sensitizer, Apple juice leftovers, *Malus domestica*, Efficiency, Province of Girona, Electrical parameters, Optical analysis techniques.

ÍNDIX

1	INTRODUCCIÓ.....	6
1.1	Tema i motivacions del treball.....	6
1.2	Descripció de les fonts utilitzades.....	9
1.3	Hipòtesis i objectius.....	10
1.4	Metodologies emprades	11
1.5	Estructura del treball	12
1.6	Valoració del procés de recerca	14
1.7	Agraïments.....	15
2	MARC TEÒRIC.....	17
2.1	DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS (DSSCs).....	18
2.1.1	Definició	18
2.1.2	Introducció.....	18
2.1.3	Història	24
2.1.4	Composició.....	27
2.1.4.1	Sensibilitzador o colorant.....	28
2.1.4.2	Semiconductor.....	50
2.1.4.3	Electròlit	59
2.1.4.4	Catalitzador	63
2.1.4.5	Substrat.....	64
2.1.5	Estructura.....	65
2.1.6	Funcionament	66
2.1.7	Situació actual	68
3	MARC PRÀCTIC	71
3.1	DSSCs basades en el rebuig de suc de poma.....	74
3.1.1	Metodologia.....	74
3.1.1.1	Conceptes previs	74
3.1.1.2	Procediment.....	77
3.1.2	Resultats	87
3.1.2.1	Anàlisi de resultats	87
3.1.3	Discussió dels resultats.....	90

3.2	Caracterització de les DSSCs naturals basades en la poma.....	91
3.2.1	Metodologia.....	91
3.2.1.1	Conceptes previs	91
3.2.1.2	Procediment.....	101
3.2.2	Resultats	118
3.2.2.1	Anàlisi de resultats	119
3.2.3	Discussió dels resultats.....	129
3.3	Aplicació de les DSSCs basades en residu de suc de poma a la província de Girona	132
3.3.1	Metodologia.....	132
3.3.1.1	Conceptes previs	132
3.3.1.2	Procediment.....	134
3.3.2	Resultats	139
3.3.2.1	Anàlisi de resultats	140
3.3.3	Discussió dels resultats.....	145
3.4	Viabilitat de les DSSCs basades en residu de suc de poma com a cel·la fotovoltaica competent.....	147
3.4.1	Metodologia.....	147
3.4.1.1	Conceptes previs	147
3.4.1.2	Procediment.....	150
3.4.2	Resultats	153
3.4.2.1	Anàlisi de resultats	153
3.4.3	Discussió dels resultats.....	157
4	CONCLUSIONS	158
5	WEBGRAFIA I BIBLIOGRAFIA	164
5.1	Bibliografia	164
5.2	Webgrafia.....	164
6	INDEX DE FIGURES, IL·LUSTRACIONS I TAULES.....	178
6.1	Index de figures	178
6.2	Index de il·lustracions.....	180
6.3	Index de taules	181
7	GLOSSARI DE SÍMBOLS	182
8	ANNEXOS	i

ANNEXOS DE LA PRIMERA SECCIÓ.....	i
Annex 1: Procediment i materials emprats en la extracció dels colorants i la construcció de les DSSCs.....	i
Annex 2: Càlculs en l'elaboració del sensibilitzador	ix
ANNEXOS DE LA SEGONA SECCIÓ	xi
Annex 3: Materials i eines emprades en la caracterització de les DSSCs.....	xi
Annex 4: Taules de dades per a la caracterització de les DSSCs.....	xiii
ANNEXOS DE LA TERCERA SECCIÓ	xv
Annex 5: Fotos de la visita al Mooma.....	xv
Annex 6: Entrevista a Llorenç Frigola	xviii
Annex 7: Procediment i materials usats per a determinar el volum de sensibilitzador consumit per unitat de superfície	xx
Annex 8: Dades sobre consum energètic de la província de Girona proporcionades pel ICAEN.....	xxi
Annex 9: Càlculs, resultats i procediment usat per a calcular l'energia total produïda en una any pel sistema dissenyat.....	xxvii
ANNEXOS DE LA QUARTA SECCIÓ.....	xxix
Annex 10: Càlculs i taules de dades per al seguiment de la DSSC de residu de suc de poma i l'estudi del preu dels materials	xxix
Annex 11: Entrevista a Josep Maria Solà.....	xxxii

1 INTRODUCCIÓ

1.1 TEMA I MOTIVACIONS DEL TREBALL

Avui en dia, la major part de l'energia (80%) prové de fonts d'energia no renovables, concretament de la combustió de combustibles fòssils com el carbó, el petroli o el gas natural. L'ús d'aquests recursos comporta dues conseqüències fatals: en primer lloc, el conegut canvi climàtic produït per gasos d'efecte hivernacle com el CO₂ alliberats a l'atmosfera en cremar aquests combustibles. En segon lloc, la dependència que la nostra societat genera d'un recurs d'energia que en realitat és limitat. Aquests efectes són a hores d'ara la causa més possible de l'extinció de l'espècie humana. Per si no n'hi hagués prou, l'increment de la població i de la qualitat de vida augmenten vertiginosament tant la demanda energètica com el canvi climàtic i el preu dels recursos energètics.

Per solucionar aquesta situació, i com ja és molt ben sabut, és necessària una transició a les anomenades energies renovables. Aquestes energies no emeten gasos perillosos a l'atmosfera i com a resultat poden solucionar els dos problemes mencionats anteriorment, és a dir, generen un impacte nul o quasi nul sobre el medi ambient i són recursos pràcticament il·limitats. Els exemples més destacables són: l'energia hidroelèctrica, l'energia eòlica, l'energia solar, l'energia de biomassa i l'energia de mareas.

Els estudis indiquen que d'aquestes alternatives, l'energia solar és la que compta amb més potencial i, per tant, tindrà un paper més rellevant en el model energètic del futur. Aprofitant el total de l'energia solar durant una hora, es produiria més energia que la que tot el món consumeix durant un any sencer. Per aprofitar aquesta energia s'utilitzen cel·les fotovoltaïques, uns dispositius electrònics que usen el fenomen fotovoltaic per convertir la llum solar en energia elèctrica.

Desgraciadament, les cel·les de silici usades en l'actualitat presenten desavantatges com que la seva eficiència màxima teòrica està a punt de ser assolida o que és molt difícil abaratir-ne el seu preu donat que aquest depèn molt dels materials de fabricació. Aquests dos fets no donen marge de millora a les cel·les de silici i obliguen a investigar en noves cel·les fotovoltaïques amb més potencial.

La cel·la solar sensibilitzada amb colorant, coneguda també com a DSSCs¹, és una nova cel·la fotovoltaica revolucionària inspirada en la fotosíntesi natural. Malgrat ser un prototip, es preveu que la DSSC pugui cobrir les mancances de la cel·la de silici convencional i esdevingui un gran avenç en la nostra lluita contra el canvi climàtic. Una característica fonamental de les DSSCs és que és possible emprar colorant natural extret de fruites o verdures per confeccionar-les. A aquest tipus de DSSCs, se les anomena DSSCs naturals.

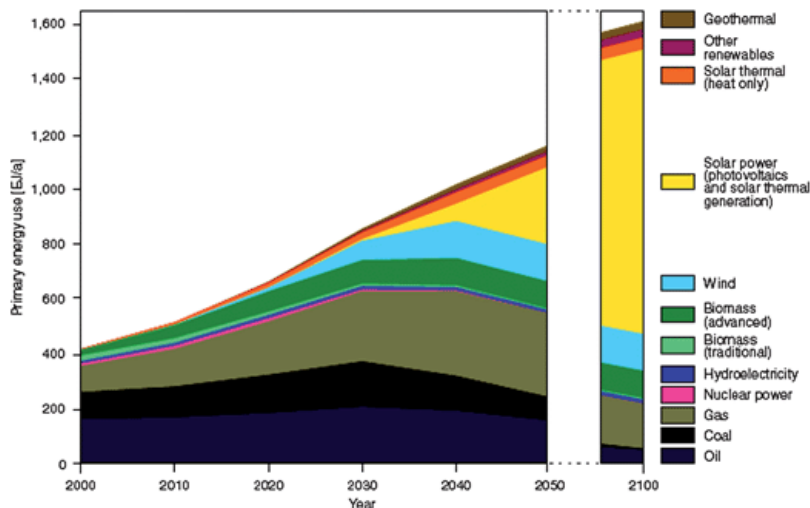


Figura 1. Mix energètic en funció del temps (passat, actualitat i previsió de futur).

Font: Magalhães et al., 2008

Des de l'inici de l'educació secundària, vaig prendre consciència sobre què és el canvi climàtic i tot el que comporta. Ja fos mitjançant xerrades organitzades per l'escola, activitats de conscienciació plantejades pel meu "Cau" (grup d'escoltes) o projectes com per exemple un crèdit de síntesi sobre l'Antàrtida; em vaig adonar del paper amenaçador que té el canvi climàtic per a l'existència de vida a la Terra. Pensar que l'ésser humà és el causant de la pitjor amenaça contra el nostre planeta, sempre m'ha fet bullir la sang, perquè crec que com a mers habitants que som no tenim cap dret a tractar-lo d'aquesta manera. Per aquest motiu, sempre he manifestat un gran interès per les maneres alternatives de produir energia i sobretot sempre he somiat en aportar el meu granet de sorra a la lluita contra el problema climàtic.

¹ DSSCs: Acrònim de *Dye-sensitized solar cells*. La traducció al català és cel·les solars sintetitzades amb colorant. També és correcte: DSC, DYSC o Grätzel cells.

L'any 2021, en participar en el projecte del programa Joves i Ciència: “De la fotosíntesi natural a l'artificial: manual per a la recerca de nous combustibles sostenibles”, vaig aprendre de la mà de professionals en aquest camp sobre tecnologies innovadores que pretenien solucionar la situació climàtica actual. Entre elles, em va atreure particularment la DSSC, donat que involucrava molts processos i coneixements sobre física, el grau universitari que m'agradaria estudiar.

Un cop finalitzada l'estada, Joves i ciència em va encarregar l'elaboració d'un article científic per tal d'accedir a la segona fase. En aquest treball, hi vaig veure l'oportunitat de fer una aportació útil per la causa que sempre havia desitjat.

Primerament, vaig pensar que donat la quantitat de pomes produïdes a la província de Girona, la meua província, seria una bona opció estudiar la construcció de DSSCs basades en *Malus domestica*, popularment coneguda com a poma. Per desgràcia, vaig necessitar una sola cerca a internet per descobrir que ja estava investigat.

A continuació, vaig plantejar-me la següent pregunta: Tenint en compte que, ni tan sols hi ha prou aliments per acabar amb la fam al món, i que cada any es malgasten 1.300 milions de tones d'aliments², quin sentit tindria utilitzar quantitats industrials de fruites i verdures fresques per generar electricitat? Això no obstant, els residus de fruita o verdures sobrants de processos com per exemple l'elaboració de suc no tenen gairebé cap ús i per tant potser sí que es podrien emprar per generar energia.

Així doncs, en descobrir que encara ningú havia investigat aquest camp, en el meu article científic vaig estudiar si era possible confeccionar DSSCs a partir del residu de fer suc de poma.

Per elaborar aquest projecte vaig decidir ampliar el meu article científic, convertint-lo en un projecte realment útil i ambiciós. L'ampliació que plantejo, neix de plantejar-me el potencial real de l'aplicació d'aquesta idea i tecnologia a la meua província. Una

² Extret de: Karin Schanes, Karin Dobernic, Burcu Gözet, Food waste matters - A systematic review of household food waste practices and their policy implications, Journal of Cleaner Production, Volume 182, 2018, Pages 978-991, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.030> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618303366>)

província que produeix una de cada cinc pomes del país i com a resultat grans quantitats de suc de poma.

En definitiva, en aquest projecte, pretenc crear i estudiar un sistema econòmic cíclic i sostenible basat en la reutilització de les restes de suc de poma de la província de Girona per generar electricitat.

1.2 DESCRIPCIÓ DE LES FONTS UTILITZADES

Estic molt orgullós de poder dir que tot el marc teòric està escrit a partir de la informació extreta d'articles científics d'autoria nacional i sobretot estrangera. Ha suposat un esforç enorme llegir al voltant d'un centenar d'articles científics en anglès, extreure'n la informació més important i fer-la comprensible per a tothom. Els articles científics o *papers* es poden considerar la culminació del coneixement humà sobre un tema donat que és el format que usen els doctors que treballen en recerca per publicar els seus estudis. Per aquest motiu, per estudiar un prototip de cel·la fotovoltaica com és la DSSC, l'únic recurs d'on es pot extreure informació és dels articles científics.

Pel que fa al marc pràctic, he tornat a recórrer a una extensa quantitat d'articles científics però, en aquest cas, també he usat altres recursos com ara llibres científics, treballs de final de màster i treballs de final de grau. D'altra banda, per a la comprensió de conceptes m'ha estat de molta ajuda el lloc web "*pv education*" recomanat pel meu tutor de l'article científic.

Finalment, cal destacar que en tot el treball he aprofitat molt el material que el programa Joves i ciència em va brindar un cop acabada la primera fase del projecte. Aquest dossier es referència durant tot el treball amb la següent cita: (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*). Finalment per l'elaboració de la gran quantitat de peus de plana del treball, he utilitzat diccionaris. Aquests peus de plana expliquen tots els conceptes que podrien representar una dificultat pel lector.

1.3 HIPÒTESIS I OBJECTIUS

S'ha aconseguit un correcte desenvolupament del projecte gràcies a la formulació de quatre hipòtesis de les quals es parteix. Dues d'aquestes hipòtesis es centren en l'estudi de la DSSC basada en residu de poma, estudiant-ne la funcionalitat, la seva eficiència i comparant-la amb altres DSSCs naturals basades en *Malus domestica* amb diferents característiques (color, maduresa). Les altres dues es focalitzen en l'anàlisi de l'aplicació de la DSSC basada en el residu de suc a la província de Girona.

Adicionalment, per facilitar l'elaboració del marc pràctic i el seu seguiment per part del lector, s'han plantejat vuit objectius a assolir al final del treball. Cadascuna de les hipòtesis conté dos dels objectius.

Hipòtesis i objectius proposats:

- ✓ És possible extreure un sensibilitzador natural del residu recollit en l'elaboració de suc de poma i emprar-lo en la confecció d'una DSSC funcional.
 - Extreure quatre tipus sensibilitzadors naturals de *Malus domestica*: poma vermella, poma vermella podrida, poma verda i residu de poma vermella.
 - Fabricar quatre DSSCs cadascuna de les quals usi un dels sensibilitzadors prèviament extrets.
- ✓ La maduresa i el color de les pomes usades en l'extracció de sensibilitzador natural d'aquest fruit són variables que alteren el rendiment de la DSSC.
 - Caracteritzar les DSSCs a partir de paràmetres utilitzats en cel·les fotovoltaiques que estandarditzen les condicions de treball i en reflecteixen el rendiment.
 - Caracteritzar els quatre sensibilitzadors i les quatre DSSCs mitjançant tècniques òptiques d'anàlisi.
- ✓ És viable aplicar DSSCs basades en el residu de suc de poma com a font d'energia elèctrica a la província de Girona.
 - Recollir i analitzar dades referents a: la producció de residu de suc de poma, la radiació incident i el consum d'energia de la província de Girona.
 - Descobrir experimentalment quin volum de colorant absorbeix una DSSC basada en residu de suc de poma.
- ✓ Les DSSCs basades en el residu de poma són una opció de cel·la fotovoltàica competent i amb un preu assequible.

- Fer un seguiment de la DSSC basada en suc de poma per tal d'estudiar el seu rendiment a llarg termini.
- Calcular el cost aproximat dels components d'un sistema a gran escala que utilitzi DSSCs basades en residu de suc de poma.

1.4 METODOLOGIES EMPRADES

Per verificar o desmentir les hipòtesis proposades s'han hagut d'emprar procediments força diferents.

En l'extracció del colorant natural de les pomes i la construcció de les DSSCs s'ha hagut d'aplicar un procediment experimental al laboratori.

Per la caracterització i l'avaluació de les DSSCs s'ha fet servir eines com un espectròmetre, resistències elèctriques o un multímetre per anar prenent les mesures. Totes les dades han estat resumides en taules i en gràfiques a partir de les quals se n'han extret conclusions.

Per idear el sistema econòmic circular també s'han usat alguns procediments experimentals però, sobretot, s'han recollit dades a través d'internet i bases de dades.

Adicionalment, s'han realitzat dues entrevistes:

- ✓ La primera a Llorenç Frigola, director gerent de Mooma i enginyer agrònom:
L'entrevista ha permès conèixer la situació de la poma de Girona, la seva disposició a participar en un sistema com el que aquest projecte proposa i ha aportat dades de vital importància per l'elaboració del treball. (Veure Annex 6).
- ✓ La segona a en Josep Maria Solà enginyer en telecomunicacions i gestor de projectes de l'empresa Green Electric:
Aquesta segona entrevista ha permès conèixer l'opinió d'un professional sobre el model energètic del futur i el paper que hi jugaran les cel·les fotovoltaïques. Així mateix, ha proporcionat dades sobre el preu de les cel·les de silici per comparar-les amb les DSSCs. (Veure Annex 11).

Aquest treball és bastant multidisciplinari donat que engloba principalment les matèries de química, física i tecnologia i, en menor mesura, les de matemàtiques i biologia.

1.5 ESTRUCTURA DEL TREBALL

El cos d'aquest projecte, com tot treball de recerca, es divideix en dues parts: un marc teòric i un marc pràctic.

El marc teòric engloba tots els conceptes fonamentals de la DSSC i pretén donar una visió general d'aquesta al lector. Aquesta part s'inicia amb una breu introducció que resumeix el concepte bàsic de DSSC i actua de resum del marc teòric. Seguidament, s'inclou una breu recapitulació dels episodis històrics més transcendents en l'origen i història de la cel·la.

A continuació en la part més tècnica, s'analitza amb molt de detall cadascun dels components de la DSSC, s'explica des de la seva funció i el funcionament fins als exemples més destacables. Assimilar les funcions dels components de manera individual és imprescindible per entendre els següents apartats on s'exposa el principi de funcionament de la DSSC i la seva estructura.

Finalment, es descriu la situació actual de la DSSC a partir de l'enumeració dels objectius que els estudis intenten assolir i les propostes més innovadores i prometedores que s'han plantejat recentment.

El marc teòric, també compta amb definicions, esquemes i moltes enumeracions amb la finalitat de facilitar-ne la comprensió. Aquesta preocupació pels detalls es deu al fet que és necessari entendre els conceptes fonamentals i el vocabulari del marc teòric per començar a llegir el marc pràctic.

A diferència d'altres treballs de recerca, en aquest projecte, el marc pràctic es divideix en quatre àmplies seccions, una secció per cada hipòtesi.

En la primera secció es sintetitzen quatre sensibilitzadors naturals basats en *Malus domestica*: poma vermella, poma podrida vermella, residu de suc de poma i poma verda. Seguidament, es construeixen quatre DSSCs amb ells i es comprova si les cel·les funcionen.

En la segona secció es caracteritza les quatre DSSCs mitjançant paràmetres elèctrics i tècniques òptiques d'anàlisi per analitzar si la maduresa o el color modifiquen les característiques de la DSSC.

En la tercera secció es recullen diferents dades a partir d'entrevistes i bases de dades i es comprova el consum de colorant d'una DSSC a partir d'un senzill procés experimental. Així s'analitza quina proporció del consum energètic es cobriria a partir de la utilització de tot el residu de suc de poma de la província de Girona.

Finalment, en la quarta secció s'estudia el preu aproximat de la construcció de les DSSC a gran escala i es valora la viabilitat del sistema plantejat en la secció anterior.

Les seccions estan ordenades cronològicament, de manera que s'inicia amb individus de *Malus domestica* (pomes) i s'acaba analitzant l'efectivitat del sistema econòmic basat en residus de suc de poma.

Per acabar, en quant a la llarga extensió del treball. Es tracta d'un projecte considerablement ambiciós, que tracta alguns conceptes de grau universitari els quals a mi m'ha costat mesos d'entendre i processar autònomament a través d'articles científics d'alt nivell.

Prenent com a referència la famosa cita comunament atribuïda a Albert Einstein utilitzada al principi del treball: "Si no ho pots explicar de manera senzilla, és que no ho has entès bé", la filosofia d'aquest projecte consisteix a intentar que sigui accessible per a tothom i per aconseguir-ho es parteixen de conceptes molt bàsics que es desenvolupen per arribar als més complexos.

La conseqüència directa d'aquesta bona intenció i d'aquesta metodologia és un treball amb una extensió de pàgines considerable i potser lluny del que seria recomanable per un treball de recerca de 2n de batxillerat.

1.6 VALORACIÓ DEL PROCÉS DE RECERCA

Aquest projecte és el repte més significatiu que he afrontat data d'avui. Un cop acabat, penso que el resultat ha sigut molt satisfactori i estic orgullós d'haver pogut assolir tots els objectius que em vaig marcar donat que semblava una tasca inabordable en un inici.

L'aprenentatge més important que m'emporto d'aquest procés de recerca és la possibilitat de fer realitat una idea sorgida d'uns breus instants d'inspiració mitjançant mesos de treball metòdic i constant. Així mateix, he pogut comprovar que aquest procediment és la metodologia necessària per assolir grans fites en totes les disciplines.

També, m'agradaria recalcar que ha estat fonamental saber adaptar-me a les dificultats i entrebancs que han anat sorgint i trobar recursos. Aquestes habilitats m'han resultat indispensables per obtenir dades a partir d'entrevistes i consultes i, sobretot, en la construcció de les DSSCs i la seva anàlisi.

Pel que fa al marc teòric, he pogut aprendre sobre cel·les solars, un tema que sempre m'havia despertat molta curiositat i que no s'explica a l'institut. La dificultat més gran ha sigut aprendre els conceptes bàsics de la DSSCs, donat que en ser un tema poc conegut, només he pogut disposar d'articles científics que lògicament estaven escrits en anglès. He notat una progressió molt gran al llarg dels mesos en la quantitat d'informació que era capaç d'entendre d'aquests articles.

Durant els procediments experimentals del marc pràctic he disposat de recursos molt més limitats dels que solen disposar els científics que treballen en aquests camps. Tot i això, aquest desavantatge i el fet d'haver de construir aparells i sistemes partint de la base, m'ha permès comprendre amb profunditat el seu principi de funcionament. La part més frustrant emocionalment, però també més emocionant, ha sigut la caracterització de les cel·les. La possibilitat que després d'invertir hores en la construcció de les DSSC simplement no funcionessin o que sobtadament un dels paràmetres calculats resultés en un valor absurd eren causa d'un gran estrès però també d'una gran intriga. D'altra banda, moltes vegades entenien conceptes de manera errònia diverses vegades, però al final, quan per fi els consolidava, la satisfacció era molt gran.

En conclusió, l'elaboració d'aquest treball de recerca és de les experiències més enriquidores que he viscut. La investigació i les entrevistes m'han aportat coneixements sobre el model energètic del futur i un rigor a l'hora de parlar sobre la situació energètica actual. Per altra banda, pel que fa a l'àmbit personal, m'he sorprès a mi mateix i he adquirit més confiança gràcies a descobrir que soc capaç d'organitzar i gestionar un projecte d'aquesta envergadura. Finalment, estic molt orgullós d'haver complert el somni de col·laborar, a partir d'una proposta útil, a la lluita contra el canvi climàtic i l'ús dels combustibles fòssils.

1.7 AGRAÏMENTS

Primer de tot donar gràcies a Francesc Mena, físic i a Maria Jou, química, per ajudar-me a desenvolupar una primera versió de la idea que aquest treball proposa, fent néixer així el projecte.

Seguidament, vull agrair especialment a l'Associació Catalana Catalunya la Pedrera per acceptar-me al programa Joves i Ciència i proporcionar-me la formació, els mitjans i l'oportunitat. En particular als meus professors de projecte: Carolina Pulignani, Dr. Ernest Pastor, Dr. Michael Sachs, Dr. Lorenzo Mogno, Dr. Laia Francas i, especialment, a Dr. Camilo A. Mesa pel seu excel·lent suport, ajuda i orientació com a tutor del meu article científic durant l'elaboració d'aquest.

D'altra banda, donar les gràcies al meu institut, per proporcionar-me materials utilitzats en el disseny experimental i deixar-me el seu laboratori. En especial a la meva tutora del treball de recerca per guiar-me, donar-me recomanacions i ajudar-me en els procediments experimentals al laboratori. Mencionar també a la Gemma Roca per deixar-me material, en Carles Llensa pel seu suport i orientació i la Dolors Corcoll per respondre'm dubtes.

Així mateix, agraeixo molt la generosa col·laboració de la Sidreria Mooma per proporcionar-me dades totalment essencials, permetre'm visitar les seves instal·lacions i convidar-me a una visita guiada i un tast de suc de poma i sidra. Sobretot donar les gràcies a en Llorenç Frigola per una esplèndida entrevista i per facilitar-me informació sobre cel·les solars que m'ha resultat de molta utilitat per l'elaboració del treball.

Altrament, agrair molt a l'empresa Green Elèctrics per proporcionar-me dades de preus de cel·les solars comercials i exclusivament a Josep Maria Solà per la seva disposició a compartir el seu bagatge i el seu punt de vista sobre el futur de les cel·les fotovoltaïques.

També mencionar a l'Institut Català d'Energia, sobretot a Berenice Abuin Ibañez per proporcionar-me dades sobre el consum d'energia a la província de Girona.

Mencionar també a l'Anna Crusi, professora de batxillerat, per respondre'm dubtes sobre el format del treball de recerca i proporcionar-me contactes.

Per sobre de tot, donar les gràcies a la meua família, pel seu suport constant i per suportar amb paciència la meua tediosa actitud durant els moments més difícils del projecte. Pel que fa al meu pare, Francesc Mota, donar-li les gràcies per ajudar-me a aconseguir materials, proporcionar-me una entrevista i acompanyar-me al Mooma. Respecte al meu germà petit, Bernat Mota, agrair-li la seva ajuda durant molts dies fins a altes hores de la nit per mesurar paràmetres de les DSSCs en el procés d'avaluació d'aquestes. Finalment, agrair a la meua mare, Anna Llobet, per la correcció del treball sencer, per ajudar-me en les traduccions de l'anglès, per respondre'm una infinitat de dubtes i per la seva constant preocupació durant l'any i mig que aquest projecte ha durat.

2 MARC TEÒRIC

L'energia elèctrica és el combustible actual del món i, en conseqüència, els humans (com a mínim els que pertanyem al primer món) en som totalment dependents. Com s'ha detallat en la introducció, la manera en què satisfem aquesta necessitat, a hores d'ara ja primària, és el que probablement decidirà el futur del planeta i, malauradament, en l'última dècada aquesta gestió no ha estat l'adequada.

Per tal de solucionar la crisi energètica, la indústria de l'energia es troba en un procés d'innovació i evolució constant. Cada cop apareixen més sectors amb noves maneres de transformar l'energia de l'entorn en la demandada energia elèctrica i cada un d'aquests sectors és incommensurablement ampli. Com a conseqüència d'aquesta gran diversitat, l'especialització cada cop és més essencial.

El sector de l'energia solar és possiblement el més prometedor de tots i com a resultat, no pateix, ni molt menys, de falta de complexitat. El nombre de nous prototips de cel·les fotovoltaïques i l'enrevessament del seu principi de funcionament augmenta de manera exponencial.

Les “Dye-sensitized solar cells”, les cel·les utilitzades en aquest treball per extreure energia elèctrica del rebuig de *Malus domestica*³, són un prototip de cel·la molt recent i per tant amb un mecanisme d'operació molt complicat.

És per aquest motiu que, com s'ha explicat anteriorment, el marc teòric d'aquest treball es pot entendre com un requisit per entendre el marc pràctic. Sense haver assolit amb profunditat els conceptes referents a la “Dye-sensitized solar cell” és impossible entendre com es procedeix al marc pràctic. Així doncs, aquesta secció intenta explicar l'origen de la cel·la, la seva rellevància, els conceptes fonamentals i els estudis actuals orientats a fer finalment possible la seva aplicació a gran escala. Degut al grau de dificultat dels conceptes explicats a continuació, s'ha procurat partir de bases senzilles i detallar el màxim tots els termes mitjançant peus de pàgina per a facilitar la comprensió del treball.

³ *Malus domestica*: Nom científic de la poma o del pomer.

2.1 DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS (DSSCs)

2.1.1 DEFINICIÓ

Tipus de cel·la fotovoltaica pertanyent al grup de les cel·les fotovoltaïques de capa fina que imita el mecanisme fotoelectroquímic utilitzat per les plantes en el procés de la fotosíntesi natural per tal de generar energia elèctrica a partir de l'energia lumínica rebuda del sol.

2.1.2 INTRODUCCIÓ

Les DSSCs sorgeixen com una de les més innovadores propostes en el sector de l'energia solar d'ençà de la invenció de les cel·les de silici i, en conseqüència, pretenen ser una alternativa a elles (*Ngurah i Alit, 2021*). Com és característic de les cel·les pertanyents a les “cel·les de tercera generació”, malgrat trobar-se en fase experimental, les DSSCs permeten obtenir eficiències de conversió elèctrica teòriques molt més grans comparades amb les cel·les de generacions anteriors, amb una menor inversió econòmica. No obstant això, actualment l'eficiència⁴ de les DSSCs encara és substancialment menor en comparació a les cel·les convencionals de silici (14.3% contra 20-22% respectivament)⁵. L'eficiència teòrica predita de la cel·la sensibilitzada amb colorant és d'aproximadament el 32% (*Grätzel et al., 2010*).

Potencial

Les característiques que realment converteixen les DSSCs en unes cel·les solars prometedores i dignes d'estudi i investigació es poden resumir en els següents punts:

1. Bon rendiment mesurat en condicions estàndards⁶.

⁴ **Eficiència (en cel·les solars):** Relació entre l'energia elèctrica produïda i l'energia lumínica rebuda.

⁵ Obtinguts de:

-Cel·les de silici: Preus aproximats que es poden obtenir actualment (2022) al mercat. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels>

-DSSCs: Eficiència de conversió d'energia certificada NREL (PCE).

<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

⁶ **Condicions estàndards** (En anglès *Standard test conditions*, o STC): Conveni consistent en una sèrie de constants acordades internacionalment per tal de caracteritzar i comparar les cel·les en iguals condicions. Els valors de les constants equivalen a “1 sol” i són els següents:

-Irradiància: 1000 W/m² (1 kW/m²).

-Temperatura de 25°C (ambient).

-Air mass: 1.5 AM.

2. Rendiment estable en condicions amb temperatures, irradiància i amb un angle d'incidència solar poc favorable (*Magalhães et al., 2008*).
3. Semi transparència i capacitat de contenir diferents colors al mateix temps.
4. Les següents propietats dels seus materials:
 - a. Sostenibilitat.
 - b. Baix cost.
 - c. Abundància.
 - d. Facilitat per obtenir-los.

Problemàtica amb materials ideals

Tot i poder utilitzar materials amb aquestes propietats ideals per construir les cel·les és necessari ressaltar que, actualment, aquests materials no proporcionen una eficiència acceptable. En conseqüència la major part de les DSSCs actuals estan construïdes amb materials perjudicials per al medi ambient, que són menys econòmics, abundants i estables. Per tal de substituir aquests materials es necessita més investigació i la publicació de més treballs orientats a aquestes alternatives més prometedores a llarg termini. Aquest treball pretén col·laborar en l'assoliment d'aquest objectiu.

Disseny

El disseny de les DSSCs consisteix en dues parts, concretament en dos elèctrodes⁷:

✓ **Elèctrode de treball o fotoànode**

És un elèctrode transparent i conductor de l'electricitat anomenat substrat sobre el qual s'apliquen nanopartícules⁸ d'un semiconductor en forma de capa fina (4 µm) a més d'una colorant molecular o sensibilitzador (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*):

⁷ **Elèctrode:** Conductor elèctric, generalment metàl·lic o grafit, utilitzat com a qualsevol dels dos terminals d'un medi elèctricament conductor; condueix el corrent dins i fora d'aquest medi, que pot ser una solució electrolítica com en una bateria d'emmagatzematge, o un sòlid, gas o buit.

L'elèctrode del qual surten els electrons s'anomena càtode i es designa com a negatiu; l'elèctrode que rep els electrons s'anomena ànode i es designa com a positiu. En alguns casos els dos pols poden invertir-se. Els elèctrodes permeten que els electrons flueixin a través d'ells per tal d'arribar de l'ànode al càtode.

⁸ **Nanopartícules:** És una partícula petita que oscil·la entre 1 i 100 nanòmetres de mida.

- Substrat:

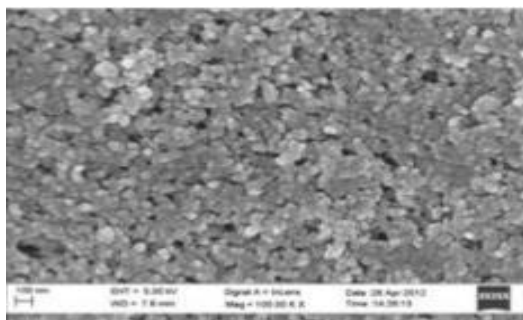
Generalment, el substrat consisteix en un vidre cobert amb una capa fina i transparent d'òxid d'estany banyat en fluor. Aquest tipus d'elèctrode s'anomena "FTO"⁹.

- Sensibilitzador:

El sensibilitzador (*dye molecules*)¹⁰. De la mateixa manera que la clorofil·la en el cas de les plantes, aquestes molècules s'encarreguen d'absorbir la llum incident provinent del sol amb la finalitat d'aprofitar aquesta energia per generar càrregues elèctriques. (Liu, 2020). Existeix una quantitat ingent de possibles sensibilitzadors i de combinacions entre ells, cadascun amb característiques diferents. Aquests es tractaran en profunditat més endavant.

- Semiconductor:

S'aplica en forma de nanopartícules sobre el substrat amb la finalitat que formi una capa porosa que ocupi una gran superfície. Aquest s'encarrega de la transferència de les càrregues elèctriques. Com es pot apreciar a la il·lustració 1, a escala microscòpica, el semiconductor sol presentar una estructura similar a la d'una esponja. El semiconductor emprat més habitualment en la construcció de DSSCs és l'òxid de titani (IV) (TiO₂). Aquesta preferència envers aquest semiconductor s'explicarà en els següents apartats.



Il·lustració 1. Micrografia electrònica d'una pel·lícula de TiO₂ dipositada sobre vidre FTO.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

⁹ **FTO:** sigles de *fluorine doped tin oxide* (òxid d'estany banyat en fluor).

¹⁰ Tot i que la traducció literal al català de *dye molecules* és "molècules de tint", s'usa el terme "colorant" en comptes de "tint". També és correcte colorant molecular.

D'igual manera també es pot utilitzar "sensibilitzador" o "colorant sensibilitzador" (a l'anglès *sensitizer* i *dye sensitizer* respectivament) per a referir-se al colorant.

✓ **Contraelèctrode o contra-càtode**

D'igual manera que el fotoànode, el contraelèctrode també conté un elèctrode conductor de l'electricitat. A més a més, aquest conté un catalitzador i una solució anomenada electròlit que es troba entremig dels dos elèctrodes:

- Substrat:
Aquest és idèntic al del fotoànode i, per tant, generalment també acostuma a ser un vidre FTO
- Electròlit:
Consisteix en una parella redox encarregada de diverses funcions com per exemple regenerar el sensibilitzador, actuar de mediador entre el contraelèctrode i el fotoànode, etc. La parella redox més habitual és la de I_2 i I^- .
- Catalitzador:
Com en qualsevol altre context en ciència, la funció del catalitzador és la de facilitar i accelerar la reacció disminuint la resistència que s'oposa en la transferència de càrrega. El catalitzador més habitual és el platí.

Funcionament

A diferència de les cel·les de silici, el mecanisme de funcionament de les DSSCs separa l'absorció de la llum i la generació de càrregues de la transferència de càrregues. (*Hyun et al., 2015*). Aquest singular mecanisme es deu al fet que, tot i que els semiconductors sí que són capaços d'absorbir radiació electromagnètica¹¹, aquests estan limitats a la radiació ultraviolada (*Montero, 2018*). D'altra banda, els colorants moleculars són capaços d'ampliar aquest rang a longituds d'ones més grans, com ara l'espectre visible¹² o fins i tot, una part del rang de la llum infraroja (*Hupp et al., 2008*).

Es defineixen així dos processos totalment independents:

¹¹ **Radiació electromagnètica:** Energia que es transmet a la velocitat de la llum a través de camps elèctrics i magnètics oscil·lants.

¹² **Espectre visible:** Rang de l'espectre electromagnètic entre 380-700 nm (aproximadament) on es troben les longituds d'ones ("els colors") perceptibles a l'ull humà.

✓ **Absorció de la llum i generació de càrregues elèctriques**

El sensibilitzador o colorant molecular absorbeix el fotó¹³ i excita un electró amb l'energia d'aquest. Seguidament, aquest electró és transferit al semiconductor iniciant així un cicle de transferència de càrregues elèctriques. Per tal de millorar l'eficiència d'aquest procés és necessari modificar el sensibilitzador (*Nazeeruddin, Baranoff i Grätzel, 2011*)

✓ **Transferència de càrregues elèctriques**

A partir del semiconductor i l'electròlit es produeixen una sèrie de reaccions de reducció i oxidació (redox) o d'intercanvi de càrregues elèctriques segons la parella redox de l'electròlit.

Una reacció redox consisteix en dues semireaccions simultànies (*Ondarse, 2021*):

- Reducció:

El procés pel qual un àtom guanya un o més electrons. L'agent reductor és l'encarregat de cedir electrons a l'agent oxidant, oxidant-se i consegüentment augmentant el seu estat d'oxidació¹⁴. Paral·lelament, els electrons cedits produeixen la semireacció de reducció.

- Oxidació:

El procés pel qual un àtom perd un o més electrons. L'agent oxidant és l'encarregat de captar els electrons de l'agent reductor, reduint-se i consegüentment reduint el seu estat d'oxidació. Paral·lelament, degut a la falta d'electrons per part del reductor, es produeix la semireacció d'oxidació.

En les cel·les fotoelectroquímiques (com la DSSC) el càtode és l'encarregat de dur a terme la reducció (contraelectrode) i l'ànode (electrode de treball) és l'encarregat d'efectuar l'oxidació (*Raveendranath, 2022*).

¹³ **Fotó:** És una partícula elemental, concretament el bosó de la força electromagnètica i en conseqüència la portadora de totes les radiacions electromagnètiques. No té ni massa ni càrrega elèctrica, viatja a la velocitat de la llum i es representa amb la lletra grega γ .

¹⁴ **Estat d'oxidació:** Quantitat d'electrons que un àtom d'un element químic cedeix i accepta en una reacció química. D'altra banda, es pot entendre com la càrrega elèctrica de l'àtom en el cas que tots els enllaços amb altres àtoms fossin totalment iònics. També és correcte: número d'oxidació o número de valència.

A través d'aquestes reaccions de transferència d'electrons (explicades en més detall a l'apartat de funcionament de les DSSCs) els electrons primerament passaran del semiconductor al substrat de l'elèctrode de treball i seguidament viatjaran del fotoànode al contraelèctrode a través d'un circuit extern. És en aquest precís punt i instant quan es pot utilitzar l'electricitat produïda per la DSSC. A continuació, els electrons són transferits a la parella redox de l'electròlit, on es difondran en la solució d'aquest per arribar de nou a la superfície del semiconductor. Finalment, aquest els transferirà al colorant que es trobava oxidat, d'aquesta manera el colorant es regenerarà i el cicle es tancarà (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*). Per tal d'optimitzar les reaccions redox i en conseqüència el procés de transferència de càrregues elèctriques és necessari modificar el semiconductor i l'electròlit (*Nazeeruddin, Baranoff i Grätzel, 2011*).

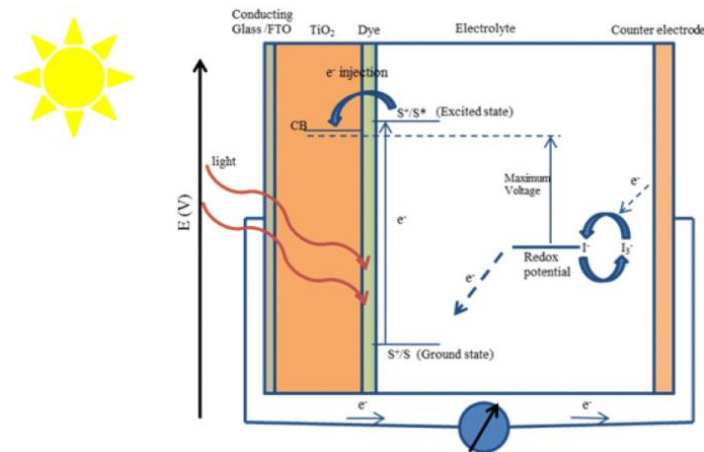


Figura 2. Mecanisme de funcionament de la DSSC.

Font: Sharma, Sharma i Sharma, 2018.

Evolució

En un termini molt curt (1991-2017) les DSSCs han arribat a duplicar el seu rendiment, partint d'una eficiència record del 7% (1991) a una del 14% (2015) (*Ho, Li i Lee, 2017*). Aquests tan satisfactoris resultats es deuen a la recerca i a l'estudi de nous tipus de DSSC. L'estratègia utilitzada consisteix a estudiar cada un dels elements que conformen les DSSCs per separat, buscant alternatives més viables i optimitzant-ne les característiques

mitjançant l'ús de tècniques molt concretes (algunes explicades més endavant). En el cas del fotoànode, per exemple, s'intenten millorar les següents característiques plantejant-se els següents objectius (*Agarwal et al., 2021*):

1. Millorar l'eficiència en la captació de la llum.
2. Augmentar el rang de l'espectre electromagnètic¹⁵ útil per la transformació en electricitat.
3. Augmentar la capacitat de dispersió de la llum pel colorant.
4. Optimitzar la transferència de càrregues al semiconductor.
5. Reduir les reaccions de recombinació.

2.1.3 HISTÒRIA

Arrels de la DSSC

El primer pas en la construcció de la DSSC es remunta a l'any 1870, quan Vogel va descobrir que uns colorants fets amb halogenur de plata en un medi gelatinós eren capaços de captar la llum ultraviolada i en conseqüència representar imatges. A partir d'aquest descobriment¹⁶ va dissenyar una pantalla pancromàtica que va esdevenir un avanç fonamental en el món de la fotografia i en el de la fotoelectroquímica.

Disset anys més tard, l'any 1887, James Moser va aconseguir sensibilitzar el primer elèctrode aconseguint una tensió d'uns 0.04 V¹⁷. No va ser fins al cap d'unes quantes dècades, a l'any 1960 quan es va construir el primer prototip de DSSC. En aquest any, Gerisher i Tributsch van descobrir que era possible generar electricitat mitjançant la il·luminació de colorants orgànics i van aplicar-ho a la pràctica per construir la primera cel·la sensibilitzada amb colorant de la història¹⁸ (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*).

¹⁵ **Espectre electromagnètic:** L'espectre electromagnètic o espectre és el rang de totes les radiacions electromagnètiques possibles distribuïdes segons la seva energia. Cada objecte té una radiació electromagnètica característica i aquesta es distribuirà diferent a l'espectre.

¹⁶ **Article de Vogel:** W. West, Proc. Vogel Cent. Symp., Photogr. Sci. Eng., 1974, 18, 35–48.

¹⁷ **Article de Moser:** J. N. Moser, Monatsh. Chem., 1887, 8, 373.

¹⁸ **Article de Gerisher i Tributsch:** H. Gerisher and H. Tributsch, Ber. Bunsen. Phys. Chem., 1968, 72, 437–445.

Aquests científics van emprar òxid de zinc (ZnO) com a substrat i van escollir la clorofil·la com a sensibilitzador. A causa de la pèssima eficiència de la cel·la, es van publicar altres estudis combinant el ZnO amb altres sensibilitzadors (com ara rosa de Bengala o la cianina) per tal de millorar aquesta eficiència, però tampoc van ser exitosos.

Aquesta recerca va perdurar fins a l'any 1977 quan la investigació en DSSCs basades en ZnO es va aturar en sec gràcies al fet que Spitler i Calvin descobrissin l'ús del TiO₂ com una alternativa viable al ZnO¹⁹. En aquest estudi, es va demostrar una absorció extremadament millor del colorant per part d'aquest semiconductor i, en conseqüència, una major eficiència garantida per la DSSC. El TiO₂ va permetre trencar amb totes les fronteres i limitacions trobades fins aleshores donant pas, així, a una nova etapa en la història de les DSSCs (*Nair et al., 2014*).

DSSC a l'actualitat

Tot i que el TiO₂ va obrir moltes portes i va ser el que va fer possible l'evolució de les DSSCs, l'autèntica i més gran revolució en el sector de les cel·les sensibilitzades amb colorant no va arribar fins a l'any 1991.

Tres anys abans d'aquest moment tan significatiu, Brian O'Regan i Michael Grätzel van començar a investigar un nou tipus de DSSC per a la Universitat de Califòrnia, Berkeley. Aquesta nova cel·la fotovoltaica està constituïda per una fina capa (10 µm de gruix) elaborada amb partícules de TiO₂ com a semiconductor, junt amb un nou sensibilitzador sintètic anomenat ruteni amb unes característiques d'absorció de colorant ideals per sensibilitzar el semiconductor. La investigació va acabar l'any 1991 a l'*École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL) a Suïssa i el famós article²⁰ científic es va publicar a la revista "Nature" (*JoVE Science Education Database, 2022*). La DSSC de O'Regan i Grätzel va registrar els següents resultats (Grätzel i O'Regan, 1991):

1. Densitat de corrent (J_{sc}): 12 mA cm⁻²
2. Aprofitament del flux d'energia incident del sol: 46%
3. Eficiència en la transformació dels fotons a corrent elèctric (IPCE): 80%
4. Eficiència total (PCE): 7.1% (12% en llum diürna difusa)

¹⁹ **Article de Spitler i Calvin:** M. T. Spitler and M. Calvin, *J. Chem. Phys.*, 1977, 66, 4294–4305.

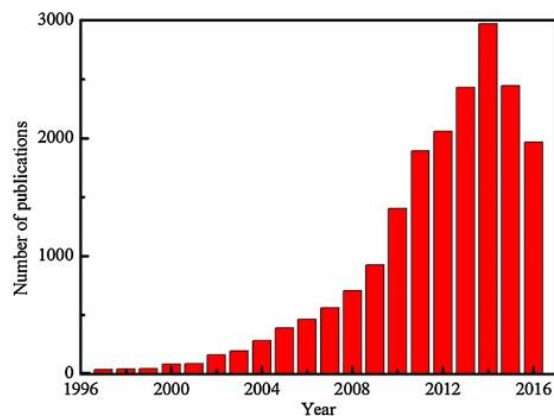
²⁰ **Article Grätzel i O'Regan:** O'Regan B, Grätzel M. *Nature* 353: 737-740, 1991.

5. Estabilitat: Com a mínim 5 milions de cicles sense patir cap mena de descomposició (excepcional)
6. Preu: Econòmic

Malgrat que el 1980 ja s'havia combinat el TiO₂ amb alguns colorants de complexos de ruteni diverses vegades, (Mendes et al., 2008) no s'havia arribat mai a una eficiència tan desorbitada com en aquesta ocasió. Aquest 7.1% va fer qualificar la DSSC com un projecte prometedor i realista en l'àmbit de les fonts d'energia renovables, a més de brindar-li una fama a escala mundial que només va en augment cada any i que ha motivat una quantitat incommensurable d'estudis que parteixen de les nanopartícules de TiO₂ com a semiconductors i els complexos de ruteni com a sensibilitzadors. El treball de Grätzel i O'Regan va suposar un avenç molt important en el sector de les cel·les fotovoltaïques, i el seu prototip és considerat la primera autèntica DSSC, el model d'on parteixen les altres. A causa d'aquests motius, es considera la terminologia Grätzel cell igual de correcte que DSSC per referir-se a la cel·la.

Les publicacions més destacades es resumeixen en la següent taula:

Any	Eficiència
1991	7.1%
1993	9.6%
2000	10.4%
2008	11.3%
2014	13%
2015	14.3%



Taula 1. Rècords d'eficiència més destacables al llarg dels anys.
Font: Elaboració pròpia.

Figura 3. Evolució del nombre de publicacions al llarg dels anys.

Font: Ho, Li i Lee, 2017.

En els anys posteriors a la publicació del cèlebre article, es van establir nous records de manera constant, duplicant pràcticament aquesta aparentment insuperable eficiència en un molt curt termini de temps (24 anys). (Hyun et al., 2015) Grätzel va continuar

col·laborant en la recerca formant part de tots els equips que van registrar nous rècords d'eficiència.

L'any 1993 es va registrar una eficiència del 9.6% i l'any 2000 una eficiència del 10.4% al *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). En aquest mateix any, a causa de superar el 10% d'eficiència es va tornar a impulsar la recerca i va augmentar el nombre d'articles científics publicats sobre DSSCs dràsticament. Així mateix, l'any 2008 es va arribar a l'eficiència record de 11.3%, a l'any 2014 a la de 13% usant un colorant de porfirina i finalment a l'any 2015 es va assolir l'eficiència de 14.3%, emprant la co-sensibilització (explicada a l'apartat de "situació actual"), l'actual eficiència record.

Cal recalcar que cada cop que s'aconseguia una nova eficiència rècord, això motivava nous estudis que implicaven a més investigadors en els projectes relacionats amb DSSCs. En passar del 10% d'eficiència rècord, aquest efecte va ser extraordinàriament més acusat i, com a resultat, les primeres empreses van decidir dipositar la seva confiança en l'aplicació de dispositius fotovoltaics basats en DSSCs en alguns dels seus productes. (Ho, Li i Lee, 2017)

2.1.4 COMPOSICIÓ

Descripció general

Com bé s'ha exposat a la introducció de les DSSCs, tota DSSC està composta per dos elèctrodes: el contraelèctrode o contra-càtode i l'elèctrode de treball o fotoànode. Així mateix, per una banda, el fotoànode està compost per un substrat de vidre d'un òxid transparent i conductor de l'electricitat (TCO)²¹ que acostuma a ser un vidre FTO, un òxid metàl·lic porós que actua com a semiconductor (com les nanopartícules de TiO₂) i finalment tot està recobert per una monocapa de colorant (Sánchez i Beltran, 2015) o sensibilitzador (com els colorants complexos de ruteni). Per altra banda, el contraelèctrode està compost per un catalitzador (com el platí) per resistir l'oxidació i accelerar les reaccions redox durant la transferència de càrregues, un substrat de vidre (Hyun et al., 2015) i l'electròlit que consisteix en una solució composta principalment per substàncies químiques que es troben en forma de ions. En les DSSCs aquestes substàncies

²¹ **TCO:** sigles de *transparent conductive oxide* (òxid transparent i conductor).

químiques s'anomenen parella redox (com per exemple el iode (I_2) i el triiodur (I_3^-)) i són les encarregades de les reaccions redox (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*).

En aquesta secció s'aprofundirà al màxim detall en cadascun dels components de la DSSC.

Elèctrode de treball

2.1.4.1 Sensibilitzador o colorant

Definició

Substància acolorida que s'adjunta químicament al substrat amb la funció d'absorbir la llum solar per a generar electricitat. És el component més important de les DSSCs.

Funció

El colorant es localitza en el fotoànode de la DSSC, concretament es troba en forma d'una monocapa de color que, incrustada en el substrat de vidre, recobreix el semiconductor. El seu objectiu en la cel·la sensibilitzada és el d'actuar com a fotosensibilitzador²² (*Agarwal et al., 2021*), és a dir, el de reaccionar davant de fotons, passant les seves molècules a un estat elèctricament excitat a través de l'energia d'aquests. A partir de la injecció d'aquestes càrregues (generades en l'excitació de les molècules al semiconductor) s'inicien les transferències d'electrons i en conseqüència és possible generar l'electricitat a partir de l'energia solar. El semiconductor, per si sol, tan sols és capaç d'absorbir una petita part de la radiació ultraviolada, per aquest motiu és necessari submergir-los en una barreja d'un sensibilitzador molecular fotosensible amb un dissolvent. Gràcies a l'estructura porosa del semiconductor, moltes molècules de colorant queden incrustades al semiconductor, augmentant així el rang de l'espectre electromagnètic que abasta el semiconductor a l'espectre visible i a regions de l'infraroig, i en conseqüència l'absorció de la llum en la superfície d'aquest (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*).

²² **Fotosensibilitzador:** Substància que en ser irradiada per llum ultraviolada (UV) o visible, les seves molècules passen a un estat electrònicament excitat. Aquestes molècules excites, per si mateixa o per transferència d'energia, electrons o àtoms de H a un altre substrat, generen espècies altament reactives.

Funcionament

Per entendre l'absorció de la llum per part del sensibilitzador, és essencial comprendre el concepte d'orbital atòmic i el d'orbital molecular i abans d'assimilar aquestes dues idees és vital entendre l'estructura de l'àtom:

✓ Estructura de l'àtom:

L'àtom es pot dividir en dues parts (*Coffey, 2018*):

- Nucli:
Regió central de l'àtom conformada pels neutrons (càrrega neutre) i els protons (càrrega positiva) units entre si per la força nuclear forta²³.
- Escorça o núvol electrònic:
Regió al voltant del nucli que està conformada pels electrons (càrrega negativa), els quals giren al voltant de l'àtom formant moviments ondulatoris (*Perez i Merino, 2020*).

✓ Orbital atòmic:

És una funció d'ona que ens descriu una regió i espai energètic al voltant de l'àtom on la probabilitat de trobar un electró fixat en els nombres quàntics: n , l i m és molt elevada. En altres paraules, els orbitals atòmics es presenten com la classificació de l'escorça electrònica en capes. Cadascuna d'aquestes capes té una certa quantitat d'energia en funció de la distància entre aquest i el nucli, a quanta menys distància del nucli es trobi l'orbital, menor serà la seva energia i viceversa. Els electrons ocupen els orbitals de menor a major energia en estat fonamental²⁴ i tan sols poden haver-hi dos electrons a cada orbital.

²³ **Força nuclear forta:** Una de les 4 forces fonamentals del model estàndard de la física de partícules, "mediada" pels gluons.

²⁴ **Estat fonamental:** És l'estat de menor energia possible en que es poden distribuir els electrons d'un àtom en els seus orbitals atòmics.

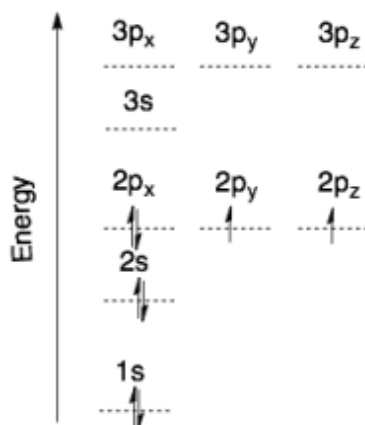


Figura 4. Orbitals atòmics de l'àtom d'oxigen.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

✓ **Orbital molecular:**

És una funció d'ona que ens descriu una regió i espai energètic en una molècula on la probabilitat de trobar un electró és molt elevada. D'altra manera un orbital molecular també es pot entendre com la combinació dels orbitals atòmics dels àtoms que conformen una molècula. De la mateixa manera que en els orbitals atòmics, els orbitals moleculars també tenen una certa energia associada i els electrons els ocupen de menys a més energia amb un màxim de dos electrons per orbital. El nombre d'orbitals moleculars és igual a la suma de tots els orbitals atòmics de tots els àtoms que conformen la molècula i el nombre d'electrons de la molècula és igual a la suma de tots els electrons de tots els àtoms (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*).

Entre tots els orbitals n'existeixen 2 de molt particulars:

- HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital):
L'orbital ocupat per electrons amb major quantitat d'energia.
- LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital):
L'orbital lliure d'electrons amb menor quantitat d'energia.

La diferència d'energia entre aquests dos orbitals fronterers s'anomena "HOMO-LUMO gap"²⁵ (Shiroudi *et al.*, 2020).

Un cop entesos aquests conceptes és possible entendre la següent secció:

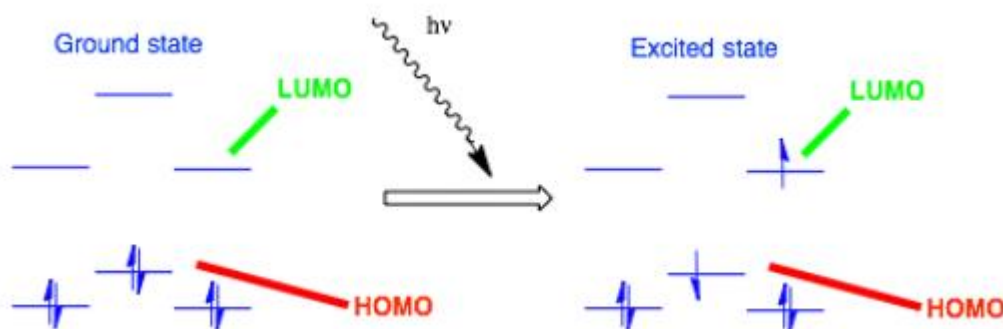


Figura 5. Orbitals moleculars de la molècula de nitrogen.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

✓ **Absorció de llum en colorants moleculars – Teoria d'orbitals de frontera:**

Si una radiació electromagnètica (llum solar) incideix sobre el sensibilitzador amb una energia igual a la de "l'HOMO-LUMO gap", segons l'efecte fotovoltaic²⁶ les molècules de colorant absorbiran el fotó i, en conseqüència, es produirà la fotoexcitació de l'electró. D'aquesta manera un electró passarà de l'orbital HOMO a l'orbital LUMO i, conseqüentment, la molècula passarà de l'estat fonamental a l'estat excitat (Agarwal *et al.*, 2021).

²⁵ **HOMO-LUMO gap:** La traducció en català pot ser obertura entre HOMO i LUMO.

²⁶ **Efecte fotovoltaic:** Procés físic que converteix l'energia lumínica en energia elèctrica. Tots els dispositius fotovoltaics basen el seu principi de funcionament en aquest efecte. Cal diferenciar-lo del efecte fotoelèctric on els electrons s'alliberen del material en incidir-hi la llum.

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA

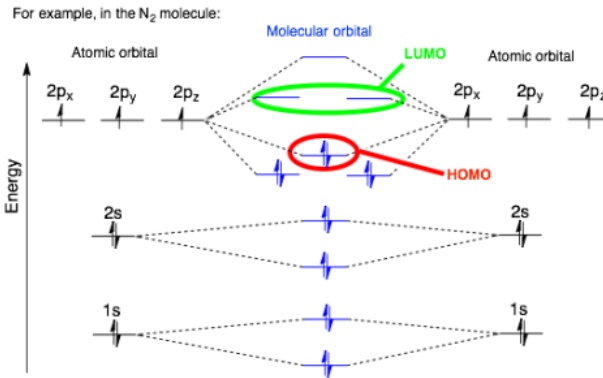


Figura 6. Fotoexcitació de l'electró de orbital HOMO al LUMO.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

L'energia de la radiació incident no depèn de la intensitat de la radiació sinó que ve determinada per la seva longitud d'ona (*HeliEsfera, 2018*). L'equació 1 determina la longitud d'ona necessària per aconseguir l'energia de "l'HOMO-LUMO gap".

$$E \text{ (eV)} = \frac{1.24}{\lambda \text{ (\mu m)}}$$

Equació 1. Energia en funció de la longitud d'ona.

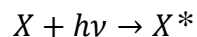
On:

- E: Energia.

- λ : Longitud d'ona.

- 1.24: Constant (Explicada a l'apartat la llum, pàgina 91).

D'altra banda, la que té lloc en l'excitació del sensibilitzador és la següent:



Equació 2. Reacció d'excitació d'una molècula.

On:

- X: Molècula.

- $h\nu$: Energia.

- X*: Molècula excitada.

A causa de que una molècula en estat excitat és inestable, torna al seu estat fonamental en un procés anomenat relaxació. En aquest procés, l'electró passa de l'orbital LUMO al HOMO, alliberant la mateixa energia que havia absorbit anteriorment en forma de llum o calor.

En la DSSC, la relaxació del sensibilitzador s'evita i s'injecta l'electró al semiconductor. Això s'assoleix mitjançant l'ús dels altres components de la cel·la per tal d'aprofitar aquesta energia lumínica abans que es perdi.

Característiques

Per tal que una substància sigui considerada un sensibilitzador, ha de disposar de les següents característiques i propietats (*Hyun et al., 2015*):

1. Ha de ser luminescent²⁷ (*Yang et al., 2010*).
2. Excel·lent perfil d'absorció de l'espectre electromagnètic, com a mínim absorció pancromàtica²⁸.

- a. Estructura molecular:

El sensibilitzador ha de disposar d'una bona estructura molecular per poder absorbir el màxim de llum possible en una àmplia gamma de longituds d'ona, normalment: llum visible, llum ultraviolada i una regió de la llum infraroja. Per aconseguir absorbir el màxim de llum s'intenta igualar l'espectre d'absorció del sensibilitzador al de la radiació electromagnètica que arriba des del sol a la terra. Una bona estructura molecular conté grups funcionals²⁹ com els dobles enllaços, els heteroàtoms o els anells aromàtics (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*).

²⁷ **Luminescent:** Propietat que permet a un material absorbir una radiació incident passant a un estat excitat i seguidament, quan els electrons es relaxen, alliberar-la.

²⁸ **Absorció pancromàtica:** Absorció de llum visible de tots els colors.

²⁹ **Grups funcionals:** Un grup d'àtoms que sempre estan units de la mateixa manera i que li donen al compost unes propietats determinades.

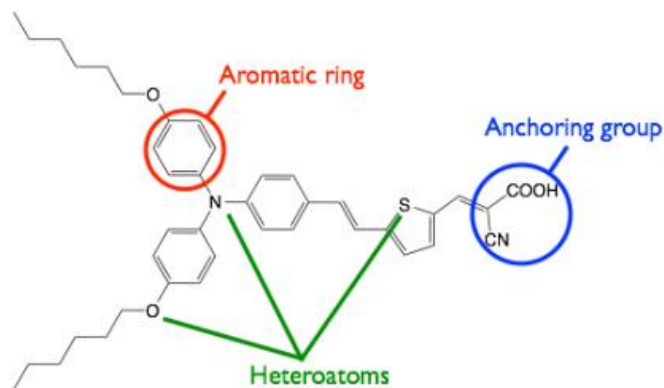


Figura 7. Estructura molecular d'un sensibilitzador.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

3. El sensibilitzador ha de tenir la capacitat de fixar-se al semiconductor mitjançant enllaços forts, per tal que els electrons puguin accedir amb facilitat al semiconductor a través del sensibilitzador (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*).

- a. Grups d'ancoratge:

Els enllaços entre el semiconductor i el sensibilitzador han de ser covalents³⁰ i en conseqüència, per aconseguir-los, és necessari l'ús de substituents químics que actuen com ancoratge entre els dos components.

³⁰ **Enllaços covalents:** És una força que uneix a dos àtoms no-metàl·lics a partir de la compartició d'electrons de la capa de valència per formar molècules.

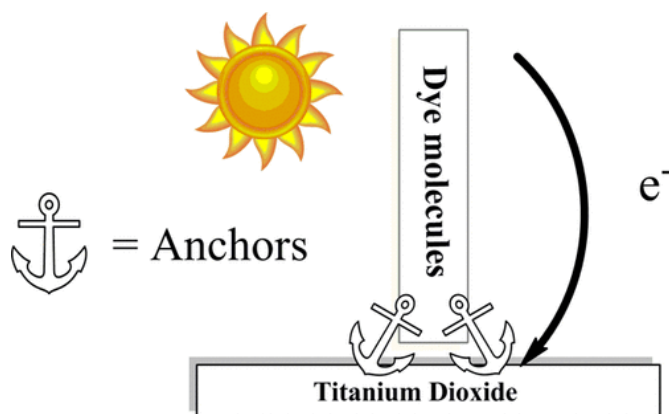


Figura 8. Esquema il·lustrativa del principi de funcionament dels grups d'ancoratge.

Font: Zhang i Cole, 2015.

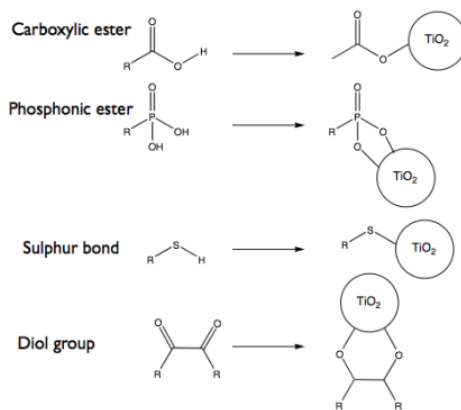


Figura 9. Exemples de grups d'ancoratge.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

4. Propietats electroquímiques:

- L'orbital LUMO ha de ser prou energètic per a injectar l'electró a la banda de conducció, concretament ha de ser més energètic que la banda de conducció del semiconductor.
- L'orbital HOMO ha de ser prou poc energètic per a ser regenerat pel sensibilitzador. Concretament, ha de ser menys energètic que la banda de conducció del semiconductor i que la parella redox de l'electròlit.

5. La perifèria ha de ser hidròfoba³¹ per tal de minimitzar el contacte directe entre l'electròlit i el fotoànode i el càtode i, en conseqüència, millorar l'estabilitat a llarg termini. En cas contrari, una distorsió produïda per aigua del colorant podria reduir l'estabilitat.
6. Estabilitat mínima per suportar 108 rotacions (vint anys d'exposició) (*Yang et al., 2010*).

Rol en l'eficiència total

La variació de l'eficiència total de la DSSC en funció del sensibilitzador variarà segons la manera que el sensibilitzador assoleixi els següents paràmetres (*Yusuf, 2018*):

1. L'eficiència amb la qual el sensibilitzador absorbeix els fotons.
2. L'eficiència amb la qual l'electró és excitat pel fotó.
3. L'eficiència amb la qual es separa l'electró del sensibilitzador i es recull pel semiconductor.

Criteris ideals

El sensibilitzador ideal és el que compleix de millor manera les característiques citades anteriorment. Tot i això, cal fer èmfasi en com és l'espectre d'absorció ideal per un sensibilitzador.

L'espectre d'absorció ideal és equivalent a l'espectre d'emissió solar. Això és a causa que la llum que absorbirà una cel·la sempre serà la solar i, per tant, cal que l'espectre d'absorció de la cel·la s'adapti el màxim possible a l'espectre d'emissió solar. Aquest espectre es caracteritza pel següent (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*):

1. Pràcticament, tota la irradiància solar es troba entre el rang entre els 300 nm i els 2500 nm.
2. La meitat de la potència disponible i un terç dels fotons es troba en la regió delimitada entre els 400 nm i els 750 nm.

³¹ **Hidròfoba:** És una propietat d'una substància que li permet repel·lir l'aigua.

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA

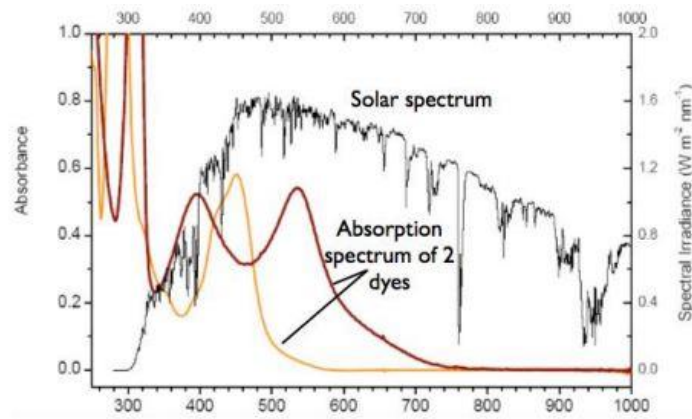


Figura 10. Espectre d'emissió solar dels 0 nm als 3000 nm (irradiància en funció de la longitud d'ona).

Font: Brilliant.

Per tal d'apropar-se a l'espectre solar, es procura que el sensibilitzador no absorbeixi radiació per sobre dels 920 nm (Ho, Li i Lee, 2017), donat que la gràfica que representa la irradiància en funció de la longitud d'ona de l'espectre solar (figura 8), presenta un mínim relatiu³² en aquest punt. Addicionalment, es procura que el sensibilitzador absorbeixi el màxim des del final de la regió del blau (450 nm - 490 nm) de l'espectre visible fins al principi de l'infraroig (780 nm - 1 mm) (Hupp et al., 2008).

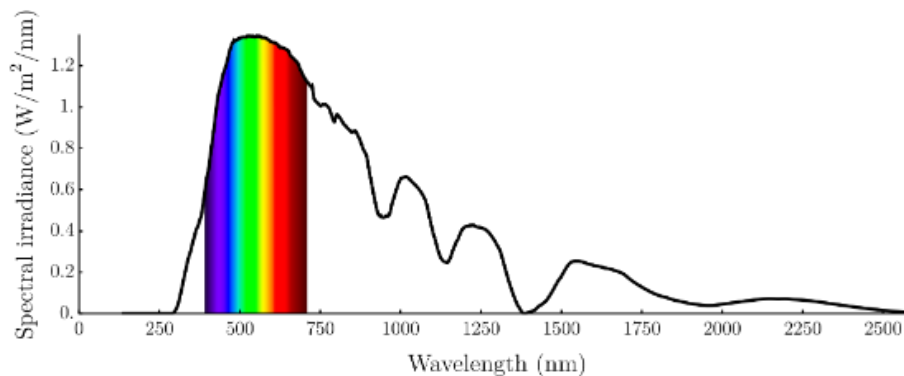


Figura 11. Superposició entre l'espectre solar (negre) i l'espectre d'absorció de dos diferents tints (vermell i groc).

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

³² **Mínim relatiu:** Una funció $\{f(x)\}$ té un mínim relatiu a $\{x=a\}$, si $\{f(a)\}$ és menor o igual que els punts propers a $\{a\}$.

Tipus de sensibilitzadors

Els sensibilitzadors es poden classificar en dos grans grups: els sensibilitzadors sintètics i els sensibilitzadors naturals. Tal com el seu nom indica els sensibilitzadors naturals són els extrets de la natura, com per exemple de pigments de fulles, flors i fruites, etc. En canvi, els sensibilitzadors sintètics són els que han sigut preparats en un laboratori. Aquest darrer grup també es divideix en dos grups: els sensibilitzadors orgànics i els sensibilitzadors inorgànics. Els sensibilitzadors orgànics són els que han estat elaborats amb elements no-metalls, majoritàriament per C, H, O i N; en canvi, els sensibilitzadors inorgànics són els que es constitueixen d'un àtom d'element metall, a part dels elements no-metalls que conté. (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*).

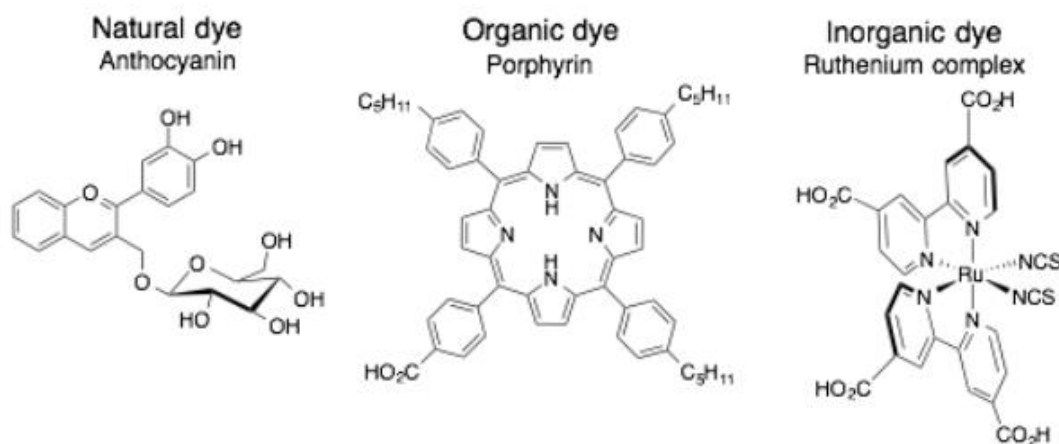


Figura 12. Tipus de sensibilitzadors.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

✓ Sensibilitzadors sintètics

- **Sensibilitzadors Inorgànics o sensibilitzadors de colorants de complex metàl·lic**

Estructura

Els sensibilitzadors inorgànics generalment consisteixen en un ió metàl·lic junt a un lligand³³ subsidiari o d'ajuda:

³³ **Lligand:** Ió o molècula lligada a un àtom metàl·lic.

- ✓ Ió metàl·lic:
S'encarrega de l'absorció de la llum.
- ✓ Lligand subsidiari:
Sol ser una bipyridina o una tetra-*piridina* (compostos químics) i actua com a grup d'ancoratge. Els lligams es poden modificar per tal d'optimitzar les propietats fotovoltaiques (*Hyun et al., 2015*).

Característiques

Els colorants sintètics es caracteritzen per les següents propietats fotovoltaiques:

1. Rangs d'absorbància elevats que s'estenen fins al rang de l'infraroig. Aquests brinden una excel·lent eficiència total a la DSSC.
2. Excel·lent estabilitat electroquímica durant llargs terminis (1000 h) en constant absorció de llum solar i estrès tèrmic (*Grätzel et al., 2007*).
3. Bones propietats electroquímiques, és a dir, amb els nivells d'energia dels diferents elements ben col·locats.
4. Ràpida injecció de l'electró al semiconductor amb pràcticament totes les longituds d'ona.
5. Alt coeficient d'extinció molar (ϵ)³⁴ amb radiacions ultraviolades (*Kuang et al., 2006*).
6. Possibilitat d'optimitzar les propietats anteriors.

En contrapartida els sensibilitzadors inorgànics pateixen de baix coeficient d'extinció molar a l'espectre visible i a l'infraroig.

Eficiència

Degut a les excepcionals propietats fotovoltaiques dels sensibilitzadors inorgànics, aquests sempre han aconseguit eficiències totals molt significants. Actualment, és molt difícil trobar un article científic recent amb resultats d'eficiència total per sota el 10% emprant colorants inorgànics.

³⁴ **Coefficient d'extinció molar (ϵ):** És una mesura de la força amb què una espècie o substància química absorbeix la llum a una determinada longitud d'ona. Explicat a més detall al marc pràctic.

El record actual d'eficiència total amb DSSCs que empren sensibilitzadors inorgànics és del 12.3%³⁵, usant un compost de ruteni (*Sotero et al., 2019*).

Exemples

Entre els metalls que es poden usar per a la confecció de sensibilitzadors trobem: el ruteni, el platí, el coure, l'osmi, el ferro o el reni (*Hyun et al., 2015*).

Entre tots aquests, sense cap dubte, el millor i més destacable és el ruteni:

Els compostos de ruteni sobresurten notablement entre la resta de metalls en la síntesi de colorants inorgànics pels següents trets (*Sotero et al., 2019*):

1. Vida més llarga en estat excitat o molt de temps de vida de l'electró.
2. Estat oxidat químicament estable, és a dir, quan el ruteni cedeix l'electró al semiconductor es manté estable.
3. Rang d'absorció a l'espectre electromagnètic extremadament ampli (ultraviolada (UV) a infraroja (IR)).
4. Altes propietats electroquímiques.
5. Eficient transferència de càrrega entre el ió metàl·lic i el lligand subsidiari.
6. L'extraordinari record actual de ~ 1.8 eV en "l'HOMO-LUMO gap". Que permet absorbir tota la llum fins als ~ 700 nm de longitud d'ona (equació 1).

Els sensibilitzadors inorgànics basats en compostos de ruteni més reconeguts i utilitzats són els següents (*Hyun et al., 2015*):

- Colorant N3
- Colorant N749 o colorant negre³⁶
- Colorant N719

³⁵ **Article 12.3%:** M. Grätzel, DSC-IC 3, April 23–25, Nara, Japan, 2009.

³⁶ **Colorant negre:** Nom usat a causa de l'espectre d'absorció electromagnètic millorat del colorant N749.

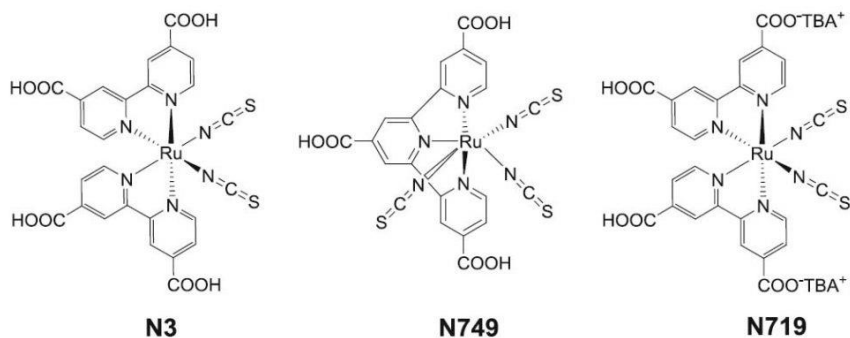


Figura 13. Exemples de compostos de ruteni.

Font: Sotero et al., 2019.

Els màxims inconvenients del ruteni són els següents:

1. Té un alt cost.
2. És un material limitat.

Per culpa d'aquests dos últims trets el ruteni no és un material factible a llarg termini ni compatible amb un sistema fotovoltaic sostenible i respectuós amb el medi ambient.

Rendibilitat

Els sensibilitzadors inorgànics són opcions completament inviables i pitjors que els altres dos grups de sensibilitzadors pels següents motius:

1. Són recursos limitats i en conseqüència:
 - a. Són molt cars i, per tant, els sensibilitzadors són molt poc econòmics de produir.
 - b. No són sostenibles
2. Poden ser tòxics per l'ésser humà i, per tant, no són segurs a l'hora de manipular-los.
3. Generen impacte mediambiental.
4. Complicats de sintetitzar.
5. Baix coeficient d'extinció molar a l'espectre visible.

Atès que totes aquestes raons, és necessari deixar els sensibilitzadors inorgànics de banda i apostar pels sensibilitzadors orgànics i els naturals. Així doncs, és prioritària la recerca en aquests dos últims tipus de sensibilitzadors (Jun et al., 2021).

✓ **Sensibilitzadors orgànics o colorants orgànics sense metalls**

Estructura

L'estructura predominant entre els sensibilitzadors orgànics és la de D- π -A³⁷. Aquesta estructura consisteix en tres grups funcionals (*Kumar et al., 2016*):

✓ Donant (D):

S'encarrega de cedir l'electró a l'acceptador.

✓ Acceptador (A):

Es troba adherit al semiconductor i s'encarrega de rebre l'electró.

✓ Enllaç (π):

Uneix el donant i l'acceptador mitjançant ponts.

Aquesta estructura opera com una plantilla base per crear nous sensibilitzadors orgànics triant un grup funcional que operi com a donant, un altre com a acceptador i un últim com a enllaç. Això caracteritza els sensibilitzadors orgànics com uns sensibilitzadors molt fàcils de sintetitzar i dissenyar (*Hyun et al., 2015*).

Característiques

Els colorants orgànics comparteixen les següents propietats fotovoltaiques que els diferencien d'altres tipus de sensibilitzadors:

1. Molta flexibilitat en el disseny molecular, és a dir, moltes possibilitats i molta facilitat per modificar-lo. Això permet ajustar les seves propietats per tal d'ajustar l'eficiència de la DSSC.
2. Gran rang d'absorció de l'espectre electromagnètic (de la radiació ultraviolada a la infraroja) (*Ekpe, Obot i Obotowo, 2016*).
3. Coeficients d'extinció molars extremadament alts (normalment $> 2.50 \times 10^4 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ a la regió visible) (*Ho, Li i Lee, 2017*).

En contrapartida els sensibilitzadors orgànics pateixen de baixa estabilitat a altes temperatures i per evitar problemes és necessari procurar unes molt bones propietats electroquímiques (*Robertson, 2006*).

³⁷ (D- π -A): Acrònim de “donor-pi-acceptor”. La traducció literal al català és donant-pi-acceptador.

Eficiència

L'any 2013 Zhang et al. van aconseguir registrar una eficiència total de 11.5-12.8%³⁸ mitjançant l'ús d'un sensibilitzador orgànic. Aquest resultat inesperat va esdevenir una gran victòria pels sensibilitzadors orgànics, demostrant que aquests podien assolir eficiències comparables i, fins i tot, superiors als sensibilitzadors basats en complexos de ruteni (colorant inorgànic més clàssic). Aquest triomf va motivar la recerca obtenint eficiències totals incomparables.

El record actual de la màxima eficiència (14.3%)³⁹ aconseguida pertany a una DSSC sensibilitzada amb una barreja de dos colorants orgànics.

Exemples

Alguns exemples de sensibilitzadors orgànics són: els colorants de porfirines, els colorants de cumarina, els colorants d'índole, colorants de trietilamina, colorants de fenotiazina (PTZ), colorants de carbazole, colorants de fenoxazina (POZ).

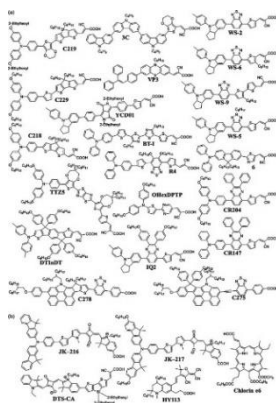


Figura 14. Exemples de compostos orgànics.

Font: Ho, Li i Lee, 2017.

Els colorants orgànics més representatiu són els compostos de porfirines:

Les porfirines són uns compostos orgànics molt presents en la vida. Es poden trobar principalment (Sotero et al., 2019):

³⁸ Article de Zhang: *Energy Environ. Sci.*, 2013,6, 2944-2949.

³⁹ Article eficiència rècord: K. Kakiage, et al. *Chem. Commun.*, 51 (2015), pp. 15894-15897.

- Actuant com a base de l'hemoglobina

Una proteïna del cos humà present en els glòbuls vermells de la sang. Està involucrada en el funcionament del sistema respiratori. La seva estructura es caracteritza per tenir un àtom de Fe (ferro) en el centre.

- Presentes en la clorofil·la

Pigment fotosintètic que atorga el color verd de les fulles de les plantes. És responsable transformar l'energia lumínica en energia química en el procés conegut com a fotosíntesis i en conseqüència responsable de la vida a la terra. La seva estructura es caracteritza per tenir un àtom de Mg (magnesi) en el centre.

Aquests tipus de compostos es poden emprar en el desenvolupament d'eficients sensibilitzadors orgànics caracteritzats pel següent (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*):

1. Alt coeficient d'extinció molar o extraordinària capacitat d'absorció de la llum i d'emissió (sobretot a l'espectre visible). Aquesta absorció s'aconsegueix principalment mitjançant dues tècniques (*Sotero et al., 2019*):
 - a. Adherir més grups funcionals que actuïn com a donadors.
 - b. Afegir cadenes d'enllaços conjugats. Aquestes també augmenten la solubilitat i en conseqüència la puresa del sensibilitzador. Es poden afegir cadenes d'enllaços a les següents posicions:

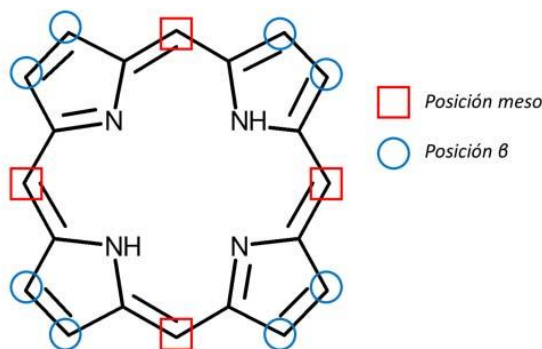


Figura 15. Posicions que pot ocupar un enllaç conjugat.

Font: Sotero et al., 2019.

2. Molt de temps de vida de l'electró, és a dir, pot resistir més temps en estat excitat abans que el sensibilitzador es relaxi. (> 1 ns).
3. Injecció de l'electró al semiconductor molt ràpida (a escala de femtosegons).
4. Temps de recombinació molt alt (a escala de milisegons), el qual permet evitar les reaccions de recombinació (Explicades a l'apartat de funcionament).
5. Capacitat per millorar les seves propietats electroquímiques.
6. Bona estabilitat a llarg termini (*Hyun et al., 2015*).

Rendibilitat

Els colorants orgànics són una alternativa molt prometedora per substituir els sensibilitzadors inorgànics que actualment predominen en el mercat de DSSCs. Havent assolit eficiències totals comparables als colorants inorgànics, els sensibilitzadors orgànics són més prometedors que els inorgànics pels següents trets:

1. Simples de sintetitzar i de modificar-ne l'estructura.
2. Més alt coeficient d'extinció molar en l'espectre visible (*Sánchez i Beltran, 2015*).
3. Més econòmics degut a (*Ho, Li i Lee, 2017*):
 - a. Baix cost de purificació.
 - b. No necessitat de metalls estranys amb un gran cost.
 - c. El cost pràcticament depèn del nombre de processos en la síntesi del colorant.
4. Més sostenibles a causa de no contenir recursos limitats com els metalls nobles (*Koumura i Hara, 2009*).
5. Menys pèrdues d'energia durant el transport de les càrregues en el fotoànode a causa de la possibilitat d'utilitzar capes del semiconductor més fines, gràcies a l'alt coeficient d'extinció molar dels sensibilitzadors orgànics (*Ho, Li i Lee, 2017*).

Degut a tots aquests motius és més senzill i viable produir a gran escala DSSCs amb sensibilitzadors orgànics. El problema d'aquests colorants ha sigut que s'han desenvolupat després que els inorgànics, però afortunadament la investigació en DSSCs amb sensibilitzador orgànic per tal de millorar-ne l'eficiència, augmentar-ne la durabilitat i reduir-ne el cost està augmentant exponencialment i una futura producció industrial és imminent (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*).

✓ Sensibilitzadors naturals

Extracció

A diferència dels sensibilitzadors sintètics, els sensibilitzadors naturals no es sintetitzen sinó que s'extrauen directament de la natura. Normalment, s'extreuen de les fulles, els fruits i les flors de plantes o fins i tot algues (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*). Existeixen diverses tècniques d'extracció del colorant, però la més simple, habitual i utilitzada és mitjançant l'ús de dissolvents. Durant les últimes dues dècades, s'han provat i es continuen provant tot de colorants vegetals extrets de components de les plantes tan diferents com són el fruit i l'escorça (*Rita, 2012*). De la mateixa manera, el marc pràctic d'aquest treball també ha contribuït a posar a prova nous tipus de colorants.

Característiques

Malauradament, a diferència dels colorants sintètics, la realitat és que els sensibilitzadors naturals no ressalten en cap propietat fotovoltaica. Entre totes les mancances, les més urgents de solucionar per tal d'augmentar l'eficiència total que proporcionen a la DSSC són les següents:

1. Baixa interacció entre el sensibilitzador i el semiconductor. L'adhesió del colorant en el semiconductor és vital per proporcionar un alt V_{oc} (Paràmetre per caracteritzar una cel·la solar) (Explicat en el marc pràctic).
2. Baixa estabilitat.

Existeix una gran necessitat d'estudis en aquests dos punts per la supervivència d'aquests sensibilitzadors i pel possible paper que puguin tenir en el model energètic futur. Això no obstant, aquests desavantatges queden compensats en l'apartat de rendibilitat (*Hyun et al., 2015*). A més, es poden assolir eficiències molt més altes (fins a un 9% aproximadament) quan es modifica l'estructura molecular del sensibilitzador (*Satapathi i Sawhney, 2015*).

Eficiència

Com és d'esperar, un cop conegudes les pèssimes propietats fotovoltaïques, cap eficiència registrada usant sensibilitzadors naturals aconsegueix encara els valors mínims per la producció a gran escala. Afortunadament, alguns resultats mínimament esperançadors junt amb l'extraordinària rendibilitat d'aquest tipus de sensibilitzadors motiven estudis en l'optimització d'aquest tipus de sensibilitzadors i altres components de la DSSC

compatibles amb aquests. La major part de dissenys amb aquests sensibilitzadors no superen el 2% d'eficiència i ni tan sols els colorants amb estructura molecular modificada, no superen el 10% (*Kusumawati et al., 2021*).

L'eficiència rècord usant sensibilitzadors naturals és de 1.70%⁴⁰, assolida per un sensibilitzador de betanina obtingut del nap vermell (*Rajasekar, Moganapriya i Mohankumar, 2021*)

Exemples

Els colorants naturals més utilitzats són els següents:

✓ Antocianina:

Són els pigments responsables dels colors cians (que van des del rosa salmó passant pel vermell i violeta fins al blau fosc) de la majoria de flors, fruits i fulles de les angiospermes⁴¹ (*Rita, 2021*). També es poden extreure de tubercles, arrels, tiges, etc. Està comprovat que la intensitat del color de la fruita, verdura, planta etc és directament proporcional a la quantitat d'antocianina d'aquest (*Tsigie, Ayele, Amogne et al., 2020*).

El rang de l'antocianina es troba dintre de l'espectre visible, (*Jun et al, 2021*):

- Entre els 450 nm - 580 nm de longitud d'ona, unes longituds d'ona molt altes per un sensibilitzador natural.
- Amb un pic d'absorció màxima a la regió dels 520 nm.

L'estructura d'una molècula d'antocianina conté grups funcionals de carbonil⁴² i hidroxil⁴³ i, en alguns casos, catecols⁴⁴ que s'encarreguen d'actuar com a grups d'ancoratge per tal d'enllaçar-se a la superfície del semiconductor i en conseqüència permetre que el sensibilitzador s'adhereixi a aquest mateix. Aquesta

⁴⁰ **Article eficiència 1.70%:** G. Calogero, G. Di Marco, S. Cazzanti, S. Caramori, R. Argazzi, A. Di Carlo, C. A. Bignozzi, *Int. Jour. of Mol. Sci.*, 2010, 11, 254-267.

⁴¹ **Angiospermes:** Plantes que contenen flors.

⁴² **Carbonil:** Grup funcional de fórmula $>C=O$, característic dels aldehyds i de les cetones.

⁴³ **Hidroxil:** Grup funcional $-OH$ característic dels alcohols i dels fenols.

⁴⁴ **Catecol:** Compost orgànic de fórmula $C_6H_4(OH)_2$.

connexió és necessària perquè l'electró es pugui transferir amb més facilitat d'un element a l'altre (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*).

L'antocianina es pot classificar en diferents tipus o antocianines. Tot i ser el mateix tipus d'antocianina, les propietats d'aquesta continuen variant en funció de la planta. Els tipus més comuns d'antocianina en flors són els següents (*Rita, 2021*):

- La pelargonidina (taronja)
- La cianina (vermell taronja)
- La delfinidina (blau-vermella)
- La petunidina (blau-vermella)
- La malvidina (blau-vermella)

Degut a l'enorme presència d'antocianina en gairebé tots els fruits i flors de colors i les altes longituds d'ona d'absorció, la recerca en aquest tipus de colorant, la seva utilització com a sensibilitzador i el potencial en futures aplicacions és abundant (*Kusumawati et al., 2021*).

✓ Clorofil·la:

És un pigment de color verd trobat comunament en fulles i plantes verdes a més de ser una molècula vital en el procés de la fotosíntesi. Absorbeix en els rangs del visible entre (*Jun et al, 2021*):

- Els 400 nm – 450 nm i els 640 nm – 680 nm de longitud d'ona.
- Amb un pic d'absorció als 430 nm.

La seva estructura consisteix en un ió central Mg^{2+} i un lligand subsidiari que sol ser el tetrapirrole.

Existeixen 6 tipus⁴⁵ de clorofil·la segons la seva estructura de lligands:

- Clorofil·la-a
- Clorofil·la-b
- Clorofil·la-c
- Clorofil·la-d
- Clorofil·la-e

⁴⁵ Els noms poden variar en funció de la font.

- Clorofil·la-f

Els estudis en DSSCs amb sensibilitzadors de clorofil·la són més abundants que els de tots els altres colorants naturals a causa del gran rendiment que ha demostrat i el seu rol en el procés fotosintètic i l'intent d'imitar-ne aquest mateix (*Tsigie, Ayele, Amogne et al., 2020*).

✓ Flavonoides:

És un gran grup de sensibilitzadors naturals (entre ells l'antocianina) que es poden trobar a dintre les cèl·lules de teixits de plantes o a la superfície de diferents òrgans de plantes. Es caracteritzen per incloure el grup funcional fenilbenzopirà ($C_6-C_3-C_6$) (*Rita, 2021*).

✓ Carotenoides:

Pigments de color groc, taronja i vermell obtinguts de verdures, plantes i fruites amb aquests mateixos colors vius. El seu rang d'absorció pot ser optimitzat modificant l'estructura (*Jun et al, 2021*).

✓ Betanina:

Una categoria de pigments de betalaina, uns pigments grocs i vermells obtinguts dels pètals de flors, fruites, fulles, arrels del plantes, etc (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*).

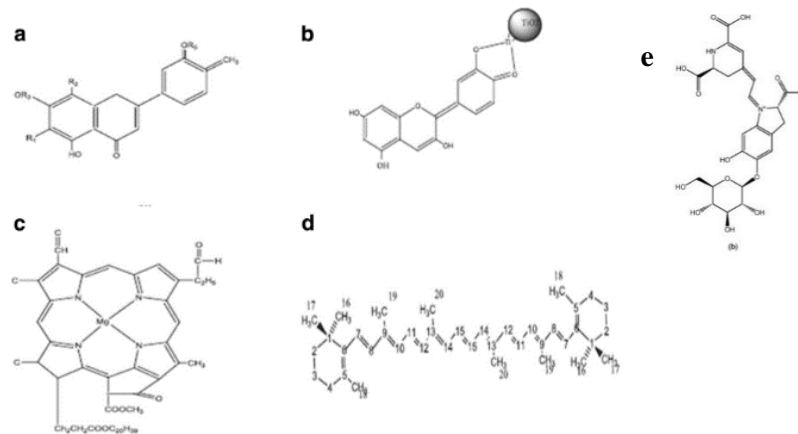


Figura 16. Colorants naturals més destacables (a-antocianina, b-flavonoide, c-carotenoide, d-clorofil·la i e-betanina).

Font: Sharma, Sharma i Sharma, 2018.

Rendibilitat

Els sensibilitzadors naturals són una alternativa perfectament viable als sensibilitzadors sintètics de cares al futur i la més prometedora de les 3 tres opcions plantejades en aquest apartat a causa dels següents arguments (*Rita, 2021*):

1. Baix cost de producció gràcies a:
 - a. Tècnica de preparació simple.
 - b. Matèries primeres econòmiques.
2. Fàcil obtenció.
3. Abundància en les matèries primeres, és a dir que són il·limitats.
4. No perjudicials per al medi ambient.
5. Completa biodegradació.
6. Procés d'extracció senzill i respectuós amb el medi ambient.

Per tots aquests trets i la evidència que els sensibilitzadors naturals són més econòmics i ecològics que els sintètics és imprescindible apostar per ells per tal d'aconseguir millorar la seva eficiència actual i crear DSSC ecològiques (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*). Amb més recerca la comercialització i el desenvolupament d'aquesta nova tecnologia s'ha d'acabar convertint en una realitat (*Hyun et al., 2015*).

2.1.4.2 Semiconductor

Definició

Materials que actuen com a conductors elèctrics o com a aïllants elèctrics en funció de les condicions físiques (camp magnètic o elèctric, radiació incident, pressió, temperatura etc). En la DSSC actua com a transferidor de càrregues.

Funció

En la DSSC, el semiconductor es diposita adherit al substrat i unit al sensibilitzador mitjançant grups carboxils i hidroxils en la seva estructura. La seva funció és la d'absorbir el colorant i recollir els fotoelectrons⁴⁶ que aquest produeix. Es pot entendre el semiconductor com un intermediari entre el sensibilitzador i el substrat, el qual permet

⁴⁶ **Fotoelectrons:** Els fotoelectrons són aquells electrons que es produeixen quan un fotó energètic de radiació colpeja una molècula.

una transferència ràpida i eficaç dels electrons entre aquests dos components (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*).

D'igual manera que en el sensibilitzador, el semiconductor modifica en gran manera tant el rendiment total de la DSSC com les seves característiques. Per consegüent, és obligatori ser prudent en la selecció d'aquest (*Sotero et al., 2019*).

Funcionament

Per entendre el paper del semiconductor en la DSSC, cal assimilar primer el seu mecanisme d'absorció de la llum. De la mateixa manera, abans d'entrar en el funcionament d'un semiconductor, cal saber que és un semiconductor i que el fa un tipus de material tan especial. Per comprendre la peculiaritat dels semiconductors és necessària una introducció en conductivitat elèctrica i en teoria de bandes:

✓ Teoria de bandes

Quan dos àtoms s'uneixen per formar orbitals moleculars, se'n formen només dos, separats per una diferència d'energia. Ara bé, quan molts àtoms s'ajunten, tots els orbitals atòmics d'aquests àtoms es combinen, es superposen i, consegüentment, la diferència energètica entre dos orbitals atòmics adjacents és infinitament tan petita que es pot considerar nul·la. Com a resultat els orbitals atòmics o nivells d'energia es transformen en un nou concepte anomenat bandes d'energia. Aquest és el cas de l'estructura electrònica d'un material sòlid covalent⁴⁷, ja que es pot entendre com una xarxa infinita d'àtoms units covalentment. D'igual manera que en els orbitals moleculars de les molècules HOMO i LUMO, en teoria de bandes també cal definir-ne dues de fonamentals (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*):

- Banda de valència:

Banda d'energia més energètica ocupada d'electrons.

✓ Banda de conducció:

Banda d'energia menys energètica desocupada d'electrons.

⁴⁷ **Sòlid covalent:** Són sòlids que es mantenen units per enllaços covalents.

La diferència d'energia entre aquestes dues bandes d'energia s'anomena "band gap"⁴⁸.

✓ **Conductivitat elèctrica:**

La conductivitat elèctrica es defineix com la facilitat que ofereix el material al pas del corrent elèctric a través d'ell i està relacionada amb el nombre de bandes energètiques i pel band gap del material. En funció de la seva conductivitat elèctrica es poden diferenciar tres tipus de materials (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*):

- Conductors:

Estan formats per un gran nombre d'àtoms junts que superposen els seus orbitals atòmics de tal manera que foment una única banda energètica per on els electrons es poden moure lliurement. Tots els elements metalls són conductors. Un augment de temperatura o una vibració pot obstruir el pas d'electrons disminuint la conductivitat del material.

✓ Aïllants:

L'estructura electrònica d'aquests dos materials està composta per dues bandes energètiques (banda de valència i de conducció). A més a més, els aïllants tenen una band gap molt alta ($>4 \text{ eV}^{49}$) i, per tant, una diferència energètica entre les dues bandes molt gran. A conseqüència d'aquesta substancial diferència d'energia, la banda de valència està plena d'electrons, la de conducció buida i els electrons no es poden promoure d'una a l'altre degut a l'enorme band gap. Els no-metalls són aïllants.

✓ Semiconductors:

L'estructura electrònica d'un semiconductor també té dues bandes energètiques. El que diferencia aquest tipus de materials dels altres dos radica en la band gap. Aquesta és més petita que la dels aïllants (entre $0.5 \text{ eV} - 4 \text{ eV}$) i permet que el material pugui oscil·lar entre aïllant i conductor segons les condicions. A baixa temperatura els semiconductors actuen com aïllants, però a l'augmentar la temperatura, mitjançant l'aprofitament de l'energia tèrmica, els semiconductors són capaços de promoure els

⁴⁸ **Band gap:** Traduccions al català poden ser: banda prohibida o bretxa de banda. S'utilitza la terminologia anglesa perquè és la més oficial, correcta i utilitzada.

⁴⁹ $1 \text{ eV} = 1.602177 \times 10^{-19} \text{ J}$.

electrons de la banda de valència a la de conducció i actuar com un conductor elèctric (*JoVE Science Education Database, 2022*).

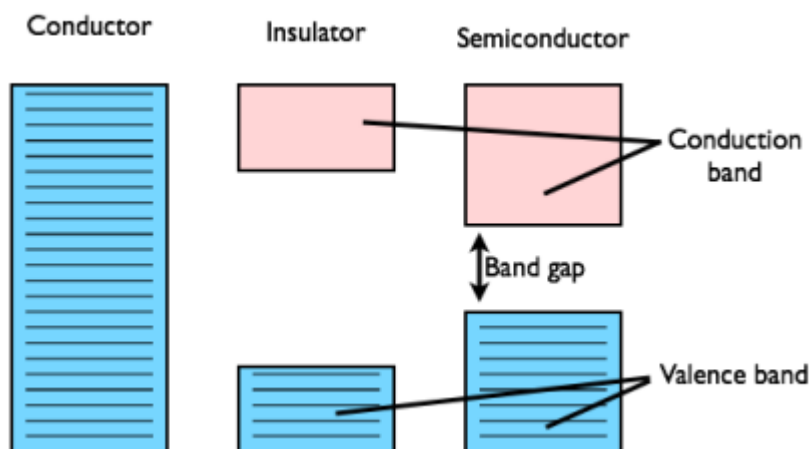


Figura 17. Estructura de bandes en un conductor elèctric, un aïllant elèctric i un semiconductor elèctric.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

✓ **Absorció de la llum en semiconductors:**

L'excitació de la band gap d'un semiconductor es pot produir mitjançant dos mecanismes (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*):

✓ Excitació tèrmica:

En augmentar la temperatura, la band gap es redueix. Per altra banda, també es pot interpretar que a causa de l'energia tèrmica els electrons del material augmenten la seva energia i com a resultat el material actua com a conductor. Aquesta excitació es pot produir a temperatura ambient en segons quins semiconductors (Photovoltaics Education Website, 2019)

- Absorció de fotons:

Mitjançant l'aprofitament de fotons amb una energia igual o superior a la band gap del semiconductor (equació 3), els electrons es poden promoure de la banda de valència a la banda de conducció en un procés anomenat generació de parells electró-forat.

$$h \cdot \nu \geq E_{band\ gap}$$

Equació 3. Energia per promoure l'electró a la banda de conducció.

On:

- h: Constant de Planck.
- ν : freqüència.
- $E_{band\ gap}$: Energia de la band gap.

En els dos processos, es generen dos portadors de càrrega:

- Electró:

L'electró excitat que es troba a la banda de conducció i actua com una càrrega negativa.

- Forat:

Es pot entendre com una vacant de càrrega negativa residual que ha deixat l'electró al saltar de la banda de valència a la de conducció. Per tant, el forat es defineix com una càrrega positiva ubicada a la banda de valència.

Trencant l'equilibri entre aquests dos, desplaçant els electrons, forats o els dos al mateix temps, es pot generar un corrent elèctric. Per aquest motiu els forats i els electrons són anomenats portadors de càrrega. Cal recalcar que d'igual manera que en els orbitals moleculars, al cap de molt poc temps, es produeix la recombinació, és a dir, un procés similar a la relaxació on els electrons retornen a la banda de valència i s'aniquilen amb els forats. D'igual manera que en la relaxació, seguint el principi de conservació d'energia, s'emeten exactament la mateixa quantitat d'energia absorbida anteriorment per promoure l'electró en forma de radiació electromagnètica o d'emissió d'energia tèrmica (s'emeten fotons en els dos casos) (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*).

$$E_0 = E$$

Equació 4. Principi de conservació de l'energia.

On:

- E_0 : Energia inicial.

- E : Energia final.

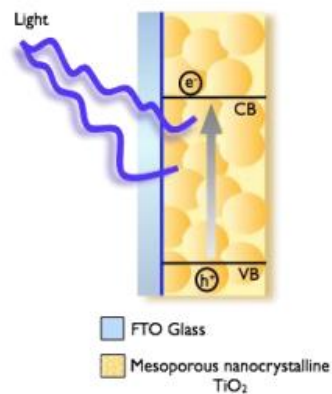


Figura 18. Excitació de la band gap d'un semiconductor.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

✓ Absorció de la llum en DSSC:

En la DSSC no es produeix l'absorció tal com s'ha explicat a la secció anterior. En aquest cas, el sensibilitzador injecta directament el seu electró de l'orbital LUMO a la banda de conducció del semiconductor. Perquè es pugui realitzar aquesta injecció, l'energia de l'orbital LUMO ha de ser més gran que la banda de conducció. Seguidament, el semiconductor transporta l'electró al substrat des d'on serà transportat al contraelectrode a través d'un circuit extern (on s'aprofita l'electricitat).

Característiques

Per ser utilitzat en una DSSC, un semiconductor ha de tenir les següents característiques (Agarwal *et al.*, 2021):

1. Bona adherència en el substrat conductor.
2. Bona capacitat d'acceptació d'electrons.

3. Bona porositat per una eficient difusió del colorant.
4. Banda de conducció menys energètica que l'orbital LUMO del sensibilitzador.
5. Band gap tan energètica com sigui possible, però sense arribar a valors d'un material aïllant (aproximadament 3 eV – 4 eV).
6. Gran superfície per millorar l'absorció dels sensibilitzadors (*Mehmood et al., 2019*).
7. Microestructura adequada (*Mehmood et al., 2019*).

Com millor s'assoleixin aquests requisits, millor serà l'eficiència total de la cel·la.

Classificació

Per poder comprendre amb profunditat com es classifiquen els semiconductors, és indispensable assimilar el concepte de dopatge (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*).

✓ **Dopatge:**

Procés d'afegir nivells d'energia a la band gap a partir d'adherir impureses com per exemple alumini o fòsfor a la xarxa cristal·lina del semiconductor. Els nous nivells d'energia permeten modificar i desplaçar la banda de valència o de conducció més a prop del nivell de Fermi⁵⁰, augmentant el nombre d'estats parcialment plens, i conseqüentment, augmentant la conductivitat del material.

Segons el dopatge, els semiconductors es classifiquen en dos grans grups:

✓ Intrínsecs (no dopats):

Semiconductors que no han estat sotmesos a un procés de dopatge. El nivell de Fermi es troba exactament a la meitat entre la banda de conducció i valència.

✓ Extrínsecs (dopats):

Semiconductors inicialment intrínsecs que han estat dopats. El nivell de dopatge varia en funció del semiconductor. En aquest cas la posició del nivell de Fermi varia segons el semiconductor.

Es poden classificar en:

- Tipus p:

⁵⁰ **Nivell de Fermi:** El nivell de Fermi és un nivell hipotètic, per sota del qual estan ocupats tots els estats. Es troba sempre entre la banda de valència i de conducció.

La majoria dels portadors de càrrega que conté són forats. El material dopant s'anomena "material acceptor", ja que s'encarrega d'alliberar els electrons més dèbilment vinculats dels àtoms del semiconductor. El nivell de Fermi es troba més a prop a la banda de valència.

- Tipus n:

La majoria de portadors de càrrega que conté són electrons. El material dopant s'anomena "material donant", ja que s'encarrega de cedir els seus electrons més dèbilment vinculats als àtoms del semiconductor. El nivell de Fermi es troba més a prop a la banda de conducció.

Exemples destacables

El semiconductor més utilitzat en la confecció de DSSCs, amb una diferència important, és l'òxid de titani (IV) (TiO₂):

✓ **Òxid de titani (IV) (TiO₂)**

Les capes d'òxid de titani porós emprades per l'elaboració de DSSCs són extreptes de materials orgànics polimèrics⁵¹ i de materials carbonosos⁵². S'usen aquests tipus de materials per solucionar els següents defectes que poden aparèixer en la preparació del TiO₂ (Ho, Li i Lee, 2017).

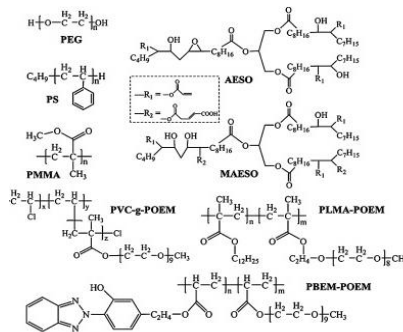


Figura 19. Materials orgànics polimèrics usats en la preparació del TiO₂.
Font: Ho, Li i Lee, 2017.

La band gap del TiO₂ és 3.2 eV, tot i que pot variar segons l'estat del semiconductor.

⁵¹ **Polímer:** Una classe de substàncies naturals o sintètiques formades per molècules molt grans, anomenades macromolècules, que són formades a la vegada per unitats químiques més simples anomenades monòmers.

⁵² **Carbonós:** Qualsevol material orgànic que conté una gran quantitat de carboni.

El TiO_2 és el semiconductor més emprat en DSSCs pels següents motius (*Sotero et al., 2019*):

1. Alta estabilitat.
2. Gran àrea de superfície.
3. Baixa toxicitat.
4. Alta estabilitat tèrmica i química.
5. Baix cost.
6. Bones propietats òptiques i electròniques.
7. Fàcil disponibilitat (*Mehmood et al., 2019*).

El TiO_2 pot presentar tres estructures cristal·lines diferents:

- Anatasa
- Rutil
- Brookita

El més utilitzat és l'anatasa degut a la seva band gap de 3.2 eV en comparació a per exemple la de 3 eV del rutil.

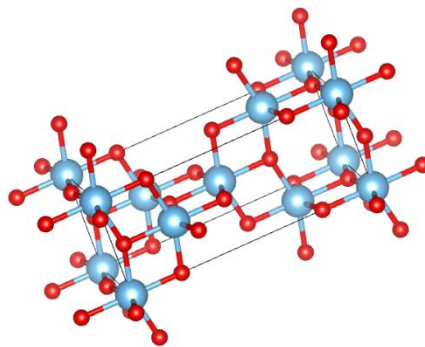


Figura 20. Estructura de la molècula de anatasa (TiO_2).

Font: Karttunen, 2021.

✓ Alternatives

Tot i que el TiO_2 és el semiconductor més utilitzat, s'han provat altres alternatives sense obtenir mai una major eficiència, però sí amb característiques semblants al TiO_2 com:

- Òxid de zinc (ZnO) (*Sotero et al., 2019*):
 1. Band gap de 3.37 eV.
 2. Baixa toxicitat.

3. Capacitat de ser ancorat per grups d'ancoratge com els grups carboxils.
 4. Tipus n
- Òxid de níquel (II) (NiO) (Sotero et al., 2019):
 1. Band gap de 3.6 – 4 eV.
 2. Bona estabilitat tèrmica i química.
 3. Tipus p
 - Òxid d'estany (IV) (SnO₂) (Allam et al., 2014):
 1. Band gap de 3.6 eV.
 2. Bones propietats òptiques i electròniques.
 3. Tipus n

Contraelèctrode

2.1.4.3 Electròlit

Definició

Una substància, generalment líquida, composta per químics en forma de ions, per la qual pot passar l'electricitat o que es separa en les seves parts quan l'electricitat la travessa. En la DSSC s'utilitza de mediador.

Funció

La feina de l'electròlit és la de connectar els dos elèctrodes per tal de tancar el circuit, aniquilant el forat amb l'electró (Magalhães et al., 2008). Aquesta tasca es pot subdividir en tres activitats que l'electròlit du a terme (Ho, Li i Lee, 2017):

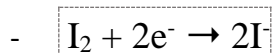
1. Actuar com un mitjà conductor o com un mediador entre fotoànode i el contraelèctrode. Usa els seus ions per tal de conduir l'electricitat.
2. Regenerar el sensibilitzador en estat oxidat, mitjançant l'ús d'una espècie reduïda d'una parella redox.
3. Ser regenerat pel catalitzador al contraelèctrode.

Com passava amb els components prèviament explicats, un electròlit adequat també és necessari perquè la cel·la pugui tenir una eficiència decent (Agarwal et al., 2021).

Funcionament

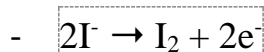
El mecanisme d'actuació de l'electròlit es basa en una reacció redox que implica intercanvis d'electrons entre dues molècules. Com és característic de les reaccions redox, aquest consta de dues semireaccions (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*):

✓ **Semireacció de reducció:**



Aquesta semireacció té lloc quan l'electròlit rep electrons del catalitzador.

✓ **Semireacció d'oxidació:**



Aquesta semireacció té lloc quan l'electròlit cedeix els electrons al sensibilitzador per oxidar-lo i aniquilar el forat.

Perquè es pugui donar a terme la reacció redox s'han de complir tres requisits:

1. Les dues semireaccions s'han de produir al mateix moment.
2. Una molècula A no es pot oxidar si no es redueix una molècula B.
3. El nombre d'electrons guanyats ha de ser igual al nombre d'electrons perduts.

Característiques

✓ **Elements**

Un electròlit ha de contenir els següents elements per poder ser utilitzat:

1. Parella redox.
2. Dissolvent.
3. Additius (poden ser orgànics)
4. Líquids iònics⁵³.
5. Cations⁵⁴.

⁵³ **Líquids iònics:** Components completament formats per ions amb punt de fusió inferior als 100°C.

⁵⁴ **Catió:** Ió amb càrrega positiva.

✓ Requisites

Per altra banda, un electròlit ha de complir els següents requisits (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*):

1. La parella redox ha de regenerar el sensibilitzador eficientment.
2. Ha de tenir una bona estabilitat (química, tèrmica i electroquímica) a llarg termini.
3. No ha de ser corrosiu amb altres components de la DSSC.
4. Ha de crear una bona conductivitat i una transferència efectiva entre fotoànode i contraelèctrode.
5. L'espectre d'absorció de l'electròlit no s'ha de superposar amb el del sensibilitzador.

Classificació

Segons l'estat físic, els electròlits es poden classificar en tres grans grups:

✓ Electròlits líquids

Aquest tipus d'electròlits estan basats en dissolvents orgànics i acostumen a presentar una alta conductivitat iònica i una excel·lent capacitat de connexió entre els dos elèctrodes. Malauradament, aquest tipus d'electròlit presenta moltíssims desavantatges que afecten l'eficiència total de la DSSC a llarg termini:

1. Fuites (*Rita, 2012*).
2. Els dissolvents orgànics dificulten el segellament de la cel·la (*Ho, Li i Lee, 2017*).
3. Volatilitat del dissolvent que provoca que s'evapori quan la cel·la està mal segellada (*Rita, 2012*).
4. La seva reacció amb aigua i molècules d'oxigen empitjoren el rendiment de la cel·la (*Rita, 2012*).
5. Dificultat en la construcció de mòduls de diverses DSSC degut a que s'han de connectar separades químicament (*Kusumawati et al., 2021*).
6. Provoca la desorció⁵⁵ del colorant del fotoànode (*Kusumawati et al., 2021*).

Per tots aquests inconvenients es van desenvolupar els altres tipus d'electròlits.

⁵⁵ **Desorció:** Procés consistent en l'alliberament de l'adsorbat de la superfície de l'adsorbent.

✓ **Electròlits sòlids**

En aquests electròlits es substitueix l'electròlit líquid per un semiconductor tipus p. D'aquesta manera es connecta el semiconductor (en aquest cas tipus n) amb l'electròlit. La problemàtica d'aquest tipus rau en el fet que és molt complicat per aconseguir una unió estreta entre els dos components. Això és degut a la rugositat del semiconductor i la impossibilitat de deposicions a alta temperatura de l'electròlit (*Mendes et al., 2008*).

✓ **Electròlits quasi sòlids**

Els electròlits quasi sòlids són líquids de polímers orgànics que han passat a tenir una forma d'un gel viscos mitjançant reaccions físiques i químiques (*Agarwal et al., 2021*). Aquests tenen una estructura en forma de xarxa híbrida, ja que tenen una xarxa de polímers que conté electròlits líquids (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*). En aquest procés han desenvolupat una naturalesa cohesionada (pròpia dels electròlits sòlids) i la capacitat de transport a partir de la difusió⁵⁶ (pròpia dels electròlits líquids).

Exemples destacables

✓ **Parella redox I^-/I_3^-**

Sense cap mena de dubte la parella redox més utilitzada és I^-/I_3^- , extreta d'un compost anomenat l'acetonitril. Els avantatges que ofereix són els següents:

1. Ràpida regeneració del sensibilitzador.
2. Lents processos de recombinació de la cel·la.

En contrapartida aquesta parella redox pateix de:

1. Mala absorció a la regió del visible (*Ho, Li i Lee, 2017*).
2. Corrosió dels altres components (*Ho, Li i Lee, 2017*).
3. Sublimació de l'electròlit (*Ho, Li i Lee, 2017*).
4. Errors electroquímics a llarg termini (*Ho, Li i Lee, 2017*).
5. És molt volàtil (*Rita, 2012*).
6. Desorció del sensibilitzador (*Rita, 2012*).
7. Mala estabilitat a llarg termini (*Rita, 2012*).

⁵⁶ **Difusió:** Procés resultant del moviment aleatori de molècules pel qual hi ha un flux net de matèria d'una regió d'alta concentració a una regió de baixa concentració.

Degut a això s'han desenvolupat alternatives com les següents parelles redox (Agarwal et al., 2021):

- ✓ $\text{Br}^-/\text{Br}_3^-$.
- ✓ $\text{SeCN}^-/(\text{SeCN})_2$.
- ✓ $\text{SCN}^-/(\text{SCN})_2$.
- ✓ $\text{Co (II)}/(\text{III})$.
- ✓ $\text{Cu (I)}/(\text{II})$.

El més prometedor és el $\text{Co (II)}/(\text{III})$ gràcies a la seva velocitat d'intercanvi d'electrons més eficaç que la parella I^-/I_3^- (Hupp et al., 2008).

2.1.4.4 Catalitzador

Definició

Substància que modifica la velocitat de reacció sense ser consumida en la reacció química. A la DSSC s'utilitza per augmentar la conductivitat elèctrica del contraelèctrode.

Funció

El catalitzador cobreix el substrat per augmentar-ne la conductivitat i reduir la resistència envers el transport d'electrons al contraelèctrode (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*). La funció del catalitzador és la de regenerar l'electròlit a partir dels electrons que arriben del circuit extern (Agarwal et al., 2021).

Funcionament

L'electròlit és molt reactiu degut a la seva falta d'electrons i pot fer perdre molta energia a la DSSC degut a la seva tendència a recombinar-se. El catalitzador s'encarrega de reduir de pressa l'electròlit per evitar aquesta pèrdua i aconseguir una bona eficiència total.

Característiques

El catalitzador ha de posseir les següents característiques (Ho, Li i Lee, 2017):

1. Bona capacitat de transferència de càrregues

2. Ser un material conductor
3. Alta resistència a la corrosió
4. Bona estabilitat electroquímica

Exemples destacables

✓ Platí

El platí és el millor catalitzador en DSSCs ja que la seva extraordinària capacitat electroanalítica en la reducció de l'electròlit brinda a la DSSC una major eficiència total. Tanmateix, el cas del platí és molt similar al de la parella redox I^-/I_3^- , donat que aquest material té desavantatges molt preocupants i, per tant, no és factible a llarg termini. Aquests desavantatges són els següents (*Nair et al., 2014*):

1. Es contamina fàcilment per iodur (electròlit). Això limita l'estabilitat a llarg termini de la cel·la.
2. Fabricació molt cara.
3. És un metall noble, rar i, per tant, té un alt cost elevat i és molt limitat.

Degut a aquests trets negatius, cal explorar alternatives que actuïn com a catalitzador a les DSSCs. Sobretot és necessari un baix cost per obrir les portes a la producció industrial de DSSCs. Les alternatives més prometedores són:

- ✓ Carboni.
- ✓ sulfur de carbonils (CoS).
- ✓ Ferroselita (FeSe).
- ✓ Níquel.
- ✓ Coure.
- ✓ Grafit.
- ✓ Polimers conductors (Pedot).

2.1.4.5 Substrat

Definició

Vidre conductor i transparent utilitzat per a la fabricació de capes de pel·lícula fina que es podrien utilitzar com a substrats d'òxid conductor transparent per desenvolupar un dispositiu.

Funció

Els dos substrats consisteixen en dos vidres de 2.5 mm d'amplada coberts per una capa conductiva. Aquesta capa és necessària ja que el vidre és un material aïllant i en la DSSC el substrat té la tasca de conduir les càrregues i, per tant, té la necessitat de ser un material conductor.

Funcionament

El substrat requereix les següents propietats (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*):

1. Transparència de més del 80% per permetre el pas de la llum solar òptima a la zona efectiva de la cel·la.
2. La màxima conductivitat possible per una transferència de càrrega eficient.

Exemples destacables

Les capes conductives més comunes són l'òxid d'estany banyat en fluor (FTO) i l'òxid d'indi dopat amb estany (ITO). Tot i això, pràcticament sempre s'usa FTO per les següents raons (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*):

1. Millor conducció de l'electricitat, estabilitat, durabilitat i menor toxicitat (*Agarwal et al., 2021*).
2. Millor estabilitat tèrmica a altes temperatures. Donat que en el procés de síntesis de les pel·lícules de TiO_2 s'ha d'escalfar l'elèctrode entre els 450-500 °C. Quan el ITO s'escalfa per sobre els 300°C, la seva resistència al pas d'electrons augmenta. En contrapartida, el FTO no pateix d'aquests defectes fins a temperatures superiors als 500°C (*Hyun et al., 2015*).

2.1.5 ESTRUCTURA

La típica estructura de la DSSC consisteix en una estructura tipus sandvitx. Per una banda, al fotoànode, el substrat està recobert pel semiconductor i aquest pel sensibilitzador que s'uneix a ell covalentment. Per altra banda, al contraelèctrode, el substrat es recobreix amb el catalitzador. Els dos elèctrodes s'uneixen amb aquesta estructura de sandvitx introduint l'electròlit entremig. Existeixen estructures menys

voluminoses que aquestes però amb una estabilitat a llarg termini menor (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*).

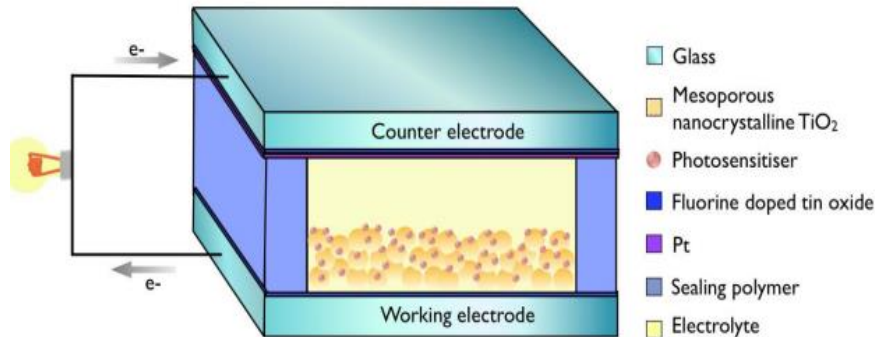


Figura 21. Esquema de l'estructura de la DSSC.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

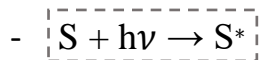
2.1.6 FUNCIONAMENT

Principi de funcionament

La manera més factible de comprendre en profunditat el principi de funcionament de la DSSC és entendre els 5 passos que aquest engloba (*Nair et al., 2014*):

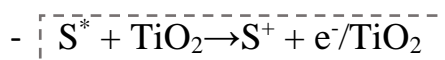
1. Absorció de la llum i fotoexcitació

El sensibilitzador absorbeix la llum incident (fotó) i passa de l'estat fonamental a l'estat excitat. Seguidament, per efecte fotovoltaic un electró passa de l'orbital HOMO al LUMO.



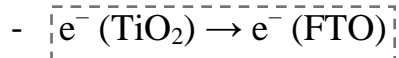
2. Injecció de l'electró

L'electró és injectat a la banda de conducció del semiconductor i, com a conseqüència, el sensibilitzador queda oxidat, és a dir, amb un forat que s'ha d'aniquilar amb un electró al final del cicle.



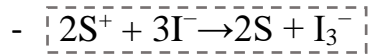
3. Transport de càrregues

Aquest electró és transportat a partir de les partícules de TiO₂ al substrat i, seguidament, mitjançant un circuit extern (on s'aprofita l'electricitat) aquest arriba al contraelectrode i passa del substrat al catalitzador (Agarwal *et al.*, 2021).



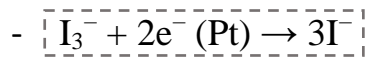
4. Regeneració del sensibilitzador

Acceptant l'electró de l'electròlit a l'orbital HOMO, el sensibilitzador es redueix i torna al seu estat fonamental aniquilant el forat.



5. Regeneració de l'electròlit

L'electròlit es redueix a partir de l'electró generat inicialment i que en aquest cas el catalitzador li brinda. Així l'electròlit es regenera i el cicle es tanca.



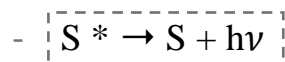
Reaccions de recombinació

Cal recalcar que degut a les reaccions de recombinació, aquest cicle no és ni molt menys perfecte. Les reaccions de recombinació són unes reaccions no desitjades que poden substituir les reaccions essencials i tallar el cicle. Aquestes reaccions poden reduir l'eficiència de la DSSC o fins i tot anul·lar-ne el funcionament. Les reaccions de recombinació s'aconsegueixen evitar gràcies al temps de reacció, és a dir, la velocitat amb la qual aquestes succeeixen. Mentre que les reaccions directes i útils succeeixen en una escala de temps molt més petita (10⁻⁹ a 10⁻³ s), les reaccions de recombinació succeeixen en una escala de temps molt més gran (10⁻⁶ a 1 s) i, per tant, succeeixen amb menor freqüència (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*).

Les tres reaccions de recombinació principals són les següents:

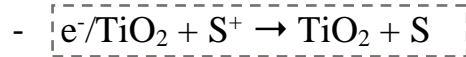
1. Relaxació del sensibilitzador

L'electró torna a l'orbital HOMO en comptes de ser injectat a la banda de conducció del semiconductor.



2. Regeneració del sensibilitzador per part del semiconductor

En comptes de passar a un circuit extern a través del substrat, l'electró torna de la banda de conducció del semiconductor a l'orbital HOMO del sensibilitzador recombinant-se amb el forat i regenerant el sensibilitzador.



3. Generació de l'electròlit per part del semiconductor

En aquest últim cas, l'electròlit és reduït per l'electró del semiconductor en comptes de pel catalitzador, trencant amb el cicle d'igual manera.

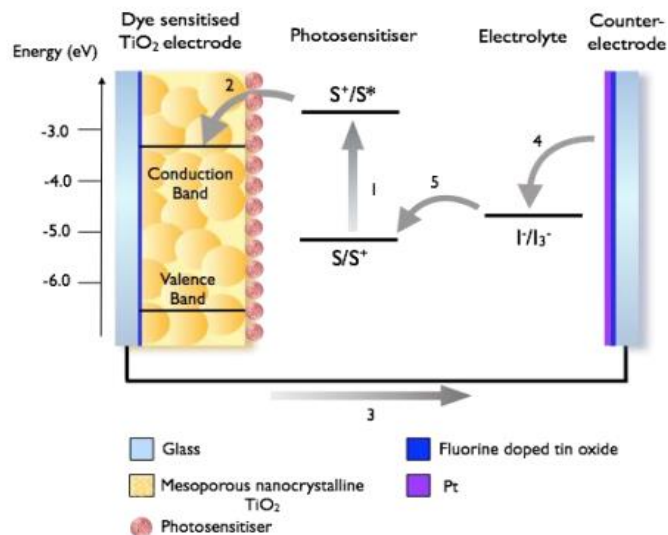
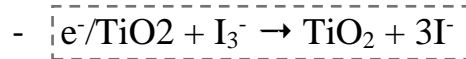


Figura 22. Principi de funcionament de la DSSC.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

2.1.7 SITUACIÓ ACTUAL

Estudis

En l'actualitat, els estudis es centren, d'una banda, en optimitzar la DSSC per assolir el seu màxim potencial i per l'altra banda en DSSCs sostenibles i viables. L'única manera per aconseguir una DSSC respectuosa amb el medi ambient és descobrir nous materials naturals. A més a més, per tal d'augmentar-ne l'eficiència s'intenten assolir els següents objectius (*Sharma, Sharma i Sharma, 2018*):

1. Reduir els temps de reacció de les reaccions de fotoexcitació i d'injecció.
2. Augmentar la porositat de les partícules del semiconductor TiO₂ amb el fi de millorar l'adherència del sensibilitzador.

3. Afegir una fina capa entre el fotoànode i l'electròlit per evitar la formació de corrent elèctric fosc⁵⁷.
4. Procurar que tota la capa de nanopartícules del semiconductor TiO₂ es cobreixi amb el colorant per evitar pèrdues d'electricitat.
5. Investigar i experimentar amb les noves propostes prometedores de components.
6. Estudiar en més profunditat la co-sensibilització.
7. Utilitzar una capa luminescent en el fotoànode per augmentar la luminescència del sensibilitzador.

Propostes innovadores

Co-sensibilització

Una nova manera d'aplicar els colorants naturals per tal de millorar-ne l'eficiència total és la preparació d'una barreja de colorants o còctel de colorants. La barreja dels colorants atorga a la cel·la (*Jun et al, 2021*):

1. Unes propietats electroquímiques molt millors (energia HOMO i LUMO).
2. Un espectre d'absorció molt més ampli.
3. Facilita la injecció de l'electró al semiconductor.
4. Un allargament de la vida de l'electró (temps en estat excitat del sensibilitzador).

Nous formats d'electròlits

A causa dels desavantatges dels electròlits actuals, com la seva toxicitat o el seu impacte mediambiental, han aparegut alternatives com les següents (*Mendes et al., 2008*):

1. Biopolímers:
Augmenten la conductivitat de l'electròlit amb polímers per acabar amb les fuites, la volatilització i la corrosió del catalitzador (*Ho, Li i Lee, 2017*).
2. Líquids iònics:
Una sal fosa orgànica formada per un catió gran i un anió deslocalitzat per càrrega. Tenen alta conductivitat elèctrica, estabilitat tèrmica i pressió molt baixa (*Ho, Li i Lee, 2017*).

⁵⁷ **Corrent elèctric fosc:** Corrent residual produït per un dispositiu fotoelèctric quan no està il·luminat.

3. Polímers que poden formar gels:

Són flexibles, presenten estabilitat a llarg termini i ràpida transferència de càrrega (Ho, Li i Lee, 2017).

Nous catalitzadors

Quant als catalitzadors, s'han descobert dos tipus de materials més econòmics, fàcils de fabricar, no agressius amb el medi ambient i, per tant, més accessibles en la industrialització de les DSSCs (Kusumawati et al., 2021):

1. Catalitzadors conductors basats en polímers:

Conductors orgànics que poden conduir els electrons mitjançant les seves cadenes de polímers conjugats. Són molt flexibles i transparents.

2. Materials carbonosos:

Els materials basats en el carboni compten amb una gran superfície, alta activitat catalítica, alta conductivitat elèctrica, excel·lent tèrmica, estabilitat i bona resistència a la corrosió.

Sensibilitzadors hidròfobs

Els sensibilitzadors amb grups d'ancoratge convencionals com els grups carboxílics són susceptibles a la desorció sota l'acció de l'aigua (que es pot trobar en el dissolvent de l'electròlit). Com és lògic, això té conseqüències sobre l'estabilitat a llarg termini de la DSSC. Per evitar-ho s'estan desenvolupant cadenes hidròfobes unides per adjuntar-les a l'estructura del sensibilitzador. Aquestes han demostrat una millor estabilitat sota aquestes condicions (Robertson, 2006).

Nanoestructures tridimensionals (3-D) com a semiconductors

Una possible solució per millorar l'eficiència de la DSSC són les estructures 3-D com: nanotubs, nanofils, pel·lícules compostes amb metall, etc. Malgrat que actualment les estructures 0-D que són les més usades i encara proporcionen millors eficiències, aquestes noves estructures són més prometedores degut al seu alt transport d'electrons i flexibilitat (que permeten reduir les reaccions de recombinació). Per millorar l'eficiència d'aquestes noves estructures i poder beneficiar-se d'aquestes dues característiques, cal millorar l'absorció de la llum. Una proposta molt recent per assolir aquest objectiu és emplenar les cavitats de les estructures 3-D amb les estructures 0-D (Mendes et al., 2008).

3 MARC PRÀCTIC

El marc pràctic d'aquest projecte és una ampliació de l'article científic: "Industrial Waste as Natural Sensitizer for Dye-Sensitized Solar Cell: The example of *Malus domestica*"⁵⁸. Aquest article va ser confeccionat per mi mateix com a tasca sol·licitada pel programa: "Joves i ciència" per tal d'accedir a la següent fase d'aquest. Aquest treball previ s'ha millorat substancialment amb la fi d'adaptar-ho a un format de treball de recerca de batxillerat.

EXPLICACIÓ I ESTRUCTURA

L'objectiu final del marc pràctic és el de verificar o desmentir les quatre hipòtesis plantejades al principi d'aquest treball mitjançant l'ús de diferents metodologies per extreure i analitzar resultats que posin a prova les hipòtesis.

El marc pràctic d'aquest projecte es divideix en quatre seccions independents. Com és lògic, cadascuna de les quatre seccions pretén analitzar una de les hipòtesis i addicionalment es centra en dos dels vuit objectius.

1. DSSCs basades en el rebuig de suc de poma (*Malus Domestica*)

- ✓ És possible extreure un sensibilitzador natural del residu recollit en l'elaboració de suc de poma i emprar-lo en la confecció d'una DSSC funcional.
 - Extreure quatre tipus sensibilitzadors naturals de *Malus domestica*: poma vermella, poma vermella podrida, poma verda i residu de poma vermella.
 - Fabricar quatre DSSCs cadascuna de les quals usi un dels sensibilitzadors prèviament extrets.

2. Caracterització de les DSSCs naturals basades en la poma (*Malus domestica*)

- ✓ La maduresa i el color de les pomes usades en l'extracció de sensibilitzador natural d'aquest fruit són variables que alteren el rendiment de la DSSC.

⁵⁸ **Enllaç a l'article:** <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:EU:0f0e248c-3dc5-464e-b442-119b0ef9321b>

- Caracteritzar les DSSCs a partir de paràmetres utilitzats en cel·les fotovoltaiques que estandarditzen les condicions de treball i en reflecteixen el rendiment.
- Caracteritzar els quatre sensibilitzadors i les quatre DSSCs mitjançant tècniques òptiques d'anàlisi.

3. Aplicació de les DSSCs basades en residu de suc de poma a la província de Girona

- ✓ És viable aplicar DSSCs basades en el residu de suc de poma com a font d'energia elèctrica a la província de Girona.
 - Recollir i analitzar dades referents a: la producció de residu de suc de poma, la radiació incident i el consum d'energia de la província de Girona.
 - Descobrir experimentalment quin volum de colorant absorbeix basada en residu de suc de poma.

4. Viabilitat de les DSSCs basades en residu de suc de poma com a cel·la fotovoltaica competent

- ✓ Les DSSCs basades en el residu de poma són una opció de cel·la fotovoltaica competent i amb un preu assequible.
 - Fer un seguiment de la DSSC basada en suc de poma per tal d'estudiar el seu rendiment a llarg termini.
 - Calcular el cost aproximat dels components d'un sistema a gran escala que utilitzi DSSCs basades en residu de suc de poma.

Les seccions engloben àmbits i mètodes d'estudi molt diferents entre ells, com ara l'entrevista, processos experimentals en el laboratori o l'anàlisi de gràfiques i paràmetres científics. Tanmateix, la primera i la segona secció es poden considerar de caràcter científic i en contrapartida la tercera i la quarta secció estan més orientades a l'àmbit socioeconòmic. Cal recalcar que, com és evident, l'èxit de la primera secció és vital per un desenvolupament adequat de les altres tres (sobretot la tercera i la quarta).

Adicionalment, cada secció recull els resultats obtinguts i la seva discussió per facilitar el seguiment del treball. Finalment, sí que es comparteixen unes conclusions després de les quatre seccions.

JUSTIFICACIÓ DE LES SECCIONS ESCOLLIDES

Malgrat que altres articles científics sí que havien utilitzat pomes per extreure sensibilitzadors naturals, aquest treball (junt amb l'article científic prèviament mencionat) és el primer en estudiar el residu de suc de poma en l'aplicació de DSSCs. Així mateix, també és el primer en analitzar la variació de l'eficiència de les DSSC basades en *Malus domestica* en funció de les variables color i maduresa.

Per una banda, la primera i la segona secció han estat creades principalment per investigar i aportar literatura en el sector de les DSSCs.

Per altra banda, la tercera i la quarta secció pretenen ser una aplicació de les dues primeres. El seu objectiu és el de portar a la pràctica la proposta experimental prèviament estudiada.

3.1 DSSCs basades en el rebuig de suc de poma (*Malus domestica*)

3.1.1 METODOLOGIA

Com és evident, per analitzar si es pot emprar el residu de suc de poma en l'elaboració de DSSCs es construirà una d'aquestes cel·les utilitzant aquest residu. Per fer-ho primer s'extraurà l'antocianina del residu. L'antocianina és el sensibilitzador natural predominant en la *Malus domestica* i, lògicament, com que el residu de suc de poma no deixa de ser una part restant del que era la poma si, el residu de poma continua conservant algun colorant natural, segur que serà aquest. Així doncs, es sintetitzarà una solució sensibilitzadora amb l'antocianina i seguidament s'usarà en la construcció d'una DSSC.

3.1.1.1 Conceptes previs

Abans de procedir, és necessari definir les tècniques i els materials usats en cadascun dels apartats d'aquesta secció.

Extracció de sensibilitzadors naturals

Breu descripció

Malgrat haver-hi diversos mètodes, l'extracció del sensibilitzador mitjançant un dissolvent és el mètode més viable i més utilitzat de tots. Aquest mètode consisteix a preparar una dissolució emprant el producte orgànic com a solut. A continuació, la mescla es filtra i la solució obtinguda es conserva per, posteriorment, ser utilitzada com a colorant de la DSSC.

Materials i eines emprades

Els materials utilitzats en aquest procediment són els següents (veure fotos a l'Annex 1):

- Etanol (96%).
- Pomes:
 - Vermelles.
 - Vermelles podrides.
 - Verdes.

- Liquidadora de suc.
- Pots de vidre fosc d'uns 200 mL.
- Bosses de plàstic per a mostres.
- Vasos de precipitats de 250 mL i 600 mL.
- Suport universal.
- Paper de filtre.
- Forn de cuina convencional.
- Paper vegetal sulfuritzat.
- Ganivets.
- Embut de vidre de 50 mm de diàmetre.
- Morter.
- Probeta de plàstic 250 mL.
- Vareta de vidre.
- Placa calefactora.
- Etiquetes adhesives.
- Retolador permanent.
- Nevera.
- Balança

Fabricació de DSSCs

Breu descripció

El procediment utilitzat per confeccionar una DSSC es pot dividir en quatre passos:

1. Preparació dels substrats

Els dos vidres es netegen i es localitza el pol conductor de cadascun.

2. Preparació del fotoànode

Un dels substrats es cobreix amb el semiconductor i es submergeix en el colorant prèviament extret per impregnar-lo.

3. Preparació del contraelèctrode

L'altre substrat es cobreix amb el catalitzador i es reserva.

4. Assemblatge de la DSSC

Els dos elèctrodes s'ajunten i es fixen a partir del circuit extern. Finalment, s'afegeix l'electròlit entre els dos elèctrodes amb una pipeta.

Materials i eines emprades

Els materials utilitzats en aquest procediment són els següents:

- ✓ Sensibilitzadors (extrets anteriorment).
- ✓ Cinta adhesiva.
- ✓ Nevera.
- ✓ Paper de diari.
- ✓ Llapis de grafit.
- ✓ Pinceres porta notes.
- ✓ Paella.
- ✓ Vitroceràmica convencional.
- ✓ Multímetre.
- ✓ Pipetes de plàstic de 2 mL de volum.
- ✓ Pinceres de plàstic.
- ✓ Electròlit P6-2100-14 amb parella redox iodur/triiodur (I^-/I_3^-) format per:
 - 89.2% de propilenglicol: núm. CAS 57-55-6
 - 9.0% de iode de potassi: núm. CAS 7681-11-0
 - 1.8% de iode: núm. CAS 7553-56-2
- ✓ Pasta de dispersió d'òxid de titani formada per:
 - 57.6% d'aigua: núm. CAS 7732-18-5
 - 32.0% d'òxid de titani (IV): núm. CAS 13463-67-7
 - 6.4% d'acetilacetona: núm. CAS 123-54-6
 - 3.1% de èter octilfenil de polietilenglicol: núm. CAS 9036-19-5
 - 0.9% d'òxid d'etilè: núm. CAS 5322-68-3
- ✓ Vidres coberts amb òxid d'estany banyat en fluor (FTO) de mida 2 cm x 2.5 cm x 0.3 cm.
- ✓ Aigua i sabó.
- ✓ Pinceres de cocodrill⁵⁹.

⁵⁹ **Pinceres de cocodrill:** Pinceres metàl·liques connectades a cables utilitzades en l'elaboració de circuits elèctrics.

Aclariment

És important recalcar que tot i que el procediment portat a terme en aquesta primera secció pretén investigar la possible aplicació del residu de suc de poma en la DSSC, es du a terme simultàniament el mateix experiment en 3 mostres addicionals de *Malus domestica*: poma vermella, poma verda i poma vermella podrida. Aquestes assumiran un paper imprescindible en la segona secció.

3.1.1.2 Procediment

Extracció del sensibilitzador natural de les pomes

Malus domestica (poma)

Justificació de la tria

S'ha escollit l'espècie *Malus domestica* i el seu rebuig, entre les altres fruites i verdures pel desenvolupament del projecte, degut a la seva abundància a la província de Girona i el seu ús en l'elaboració de suc de poma. El clima mediterrani característic de la província afavoreix el creixement de pomeres i la producció de pomes.

La província de Girona gaudeix d'una indicació geogràfica protegida⁶⁰ (IGP) pròpia per les pomes produïdes a les comarques de:

- ✓ L'Alt Empordà.
- ✓ El Baix Empordà.
- ✓ La Selva.
- ✓ El Gironès.
- ✓ El Pla de l'Estany.

Aquesta IGP s'anomena poma de Girona i compta amb aproximadament 2000 hectàrees de cultiu i està formada per 78 famílies productores per les empreses:

- ✓ Girona Fruits, de Bordils (Gironès).
- ✓ Giropoma Costa Brava, d'Ullà (Baix Empordà).
- ✓ Fructícola Empordà, de Sant Pere Pescador (Alt Empordà).

⁶⁰ **Indicació Geogràfica Protegida (IGP):** Règim de qualitat de la Unió Europea que identifica que un producte és provinent d'un lloc determinat perquè posseeix alguna característica d'aquest indret.

La producció de poma de Girona de l'any passat (2021) va ser de 101750 tones, el rècord en la seva història. Aquest any es preveu recollir 88500 tones de poma, la tercera xifra més alta en l'última dècada. La producció de poma de Girona representa un 39% de la producció de Catalunya i gairebé un 20% de l'Estat espanyol i, per tant, una de cada cinc pomes produïdes a Espanya són de Girona. A més a més, poma de Girona exporta un 25% - 30% a l'estranger (uns 25 milions de quilos) (*Comarques Gironines, 2022*) i és el màxim exportador de pomes Golden d'Europa (*Xerrada a la sidreria Mooma, 2022*).

Els quatre tipus de poma més produïts per poma de Girona són els següents:

1. Golden (28.310 tones).
2. Gala (20.940 tones).
3. Granny Smith (13.430 tones).
4. Red Delicious

En conclusió, la poma de Girona és mundialment reconeguda com un producte de qualitat, segur, sostenible i de confiança (*Diari de Girona, 2022*).⁶¹

Obtenció de les pomes

Les pomes utilitzades van ser adquirides al mercat km 0 de la ciutat de Figueres. Es van seleccionar vuit pomes diferents dividides en quatre grups de dues pomes cadascun amb unes característiques pròpies:

1. Pomes vermelles:

Es va escollir la classe Gala pel seu característic i intens pigment vermell.

2. Pomes per fer suc:

També es va optar per les pomes Gala per la mateixa raó que abans i per la seva alta producció. Com es pot observar a l'apartat posterior, el procediment emprat amb aquestes pomes va ser diferent respecte a la resta

3. Pomes vermelles podrides:

En aquest cas també es van escollir pomes Gala però en un avançat estat de maduresa.

⁶¹ Més informació a:
<https://pomadegirona.cat/es/>

4. Pomes verdes

En aquest darrer grup es van triar les pomes Granny Smith també pel seu color verd intens.

	POMA VERMELLA	RESIDUS DE SUC POMA VERMELLA	POMA VERDA	POMA VERMELLA PODRIDA
COLOR	VERMELL	VERMELL	VERD	VERMELL
GRAU DE MADURESA	IDEAL	IDEAL	IDEAL	PODRIT
PART DE LA POMA	PELA	RESTES DE LA POMA SENCERA	PELA	PELA

Taula 2. Característiques de les mostres usades.

Font: Elaboració pròpia.

Preparació de les mostres

El procediment emprat per preparar les mostres i per sintetitzar la solució sensibilitzadora (en el següent apartat) es va inspirar en l'article científic: "*Investigating the effect of various extracting solvents on the potential use of red-apple skin (Malus domestica) as natural sensitizer for dye-sensitized solar cell*"⁶². Tot i això, es van haver de realitzar diverses modificacions, d'una banda, per falta d'equipament més complex i especialitzat i, d'altra banda, per poder adaptar el procediment experimental al residu de suc de poma. Així doncs, el procediment dut a terme és el següent:

1. Es van extreure les següents parts de les pomes:

⁶² **Article utilitzat de guia:** A. Saputro, A. Mizan, N. Sofyan, and A. H. Yuwono, "Investigating the effect of various extracting solvents on the potential use of red-apple skin (Malus domestica) as natural sensitizer for dye-sensitized solar cell," AIP Conf. Proc., vol.1826, no. 1, p. 20006, Mar. 2017.

- a. La pela de les dues pomes verdes, les dues pomes vermelles i les dues pomes vermelles podrides amb l'ajuda d'un ganivet.
 - b. De les dues darreres pomes, el residu de fer-ne suc amb una liquidadora.
2. Totes les mostres es van assecar a 100°C durant sis hores al forn sobre paper vegetal sulfuritzat i separades per quatre ganivets per tal que no es barreassin.
 3. Es van triturar les quatre mostres utilitzant el morter.
 4. Es van tornar a assecar a 100°C durant quatre hores més seguint el mateix procediment.
 5. Les mostres es van polvoritzar a una mida aproximada de 40 de malla (0.040 mm).
 6. Les quatre mostres resultants es van desar en bosses de plàstic per a mostres, es van retolar amb retolador permanent i es van reservar.

El sensibilitzador (antocianina)

Selecció del dissolvent

El sensibilitzador natural amb més presència a les pomes i el que s'intentarà extreure en aquest projecte és l'antocianina. Com a dissolvent es va triar l'etanol (C₂H₅OH) perquè segons va concloure l'article científic mencionat anteriorment⁶⁸, després d'haver-lo comparat amb altres dissolvents, és el que proporcionava millor solució sensibilitzadora.

Malgrat l'eficàcia que l'etanol demostra en dissoldre l'antocianina, alguns estudis han determinat que aquest dissolvent produeix la corrosió del semiconductor quan està exposat a llum solar durant un llarg termini. Això provoca una severa reducció de l'eficiència total de la cel·la, (posteriorment es corroborarà) (*Jun et al, 2021*). En definitiva, l'etanol és un bon dissolvent per fer estudis provisionals, però mai serà un candidat vàlid per projectes no experimentals.

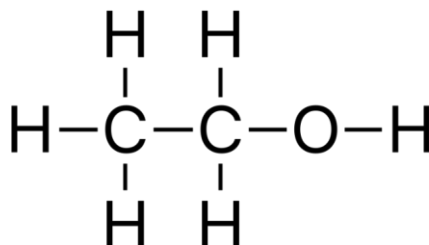


Figura 23. Estructura de l'etanol.

Font: Elaboració pròpia.

Preparació de la solució sensibilitzadora

El procediment dut a terme va ser el següent:

1. Es van pesar quatre vasos de precipitats buits en una balança.
2. Es va abocar el contingut de cadascuna de les quatre bosses de plàstic a dins d'un vas de precipitat diferent.
3. Es van tornar a pesar els quatre vasos de precipitats plens. Es va trobar el pes de les mostres a partir de la diferència entre aquests dos valors.
4. Mitjançant un factor de conversió es va calcular el volum d'etanol 96% necessari per preparar una dissolució d'una proporció d'1:20 p/v (concentració de 5% en massa/volum).
5. El volum d'etanol es va mesurar amb l'ajuda d'una proveta de 250 mL.
6. Es va abocar el contingut pertinent d'etanol (càlcul a l'Annex 2) a cada vas de precipitat obtenint les següents concentracions.
7. Les solucions aconseguides es van escalfar durant 15 minuts a 50°C sobre una placa calefactors mentre al mateix temps s'agitaven amb una vareta de vidre.
8. Es va col·locar un embut de vidre de 5 mm diàmetre, a un suport universal i dintre de l'embut es va col·locar un paper de filtre. Amb aquest muntatge es van filtrar les solucions.
9. Les quatre solucions obtingudes es van desar en quatre pots de vidre fosc (d'uns 200 mL).
10. Es van retolar els quatre pots amb etiquetes adhesives.
11. Es van emmagatzemar els quatre pots dintre una nevera.

Cal recalcar que per conservar l'estabilitat del sensibilitzador és necessari que s'emmagatzemi en absència de llum i en una temperatura idònia. Per aquest motiu, es van desar les solucions en pots de vidre de foscos i dintre una nevera (*Bhuiyan et al., 2019*).

$$m_{mostra} = m - m_0$$

Equació 5. Equació per mesurar la massa de les mostres.

On:

- m_{mostra} : Massa mostra.

- m_0 : Massa inicial (vas precipitats buit).

- m : Massa final (vas precipitats amb mostra).

$$V_{\text{etanol}} = m_{\text{mostra}} \cdot \frac{100 \text{ ml etanol}}{5 \text{ g mostra}}$$

Equació 6. Equació per mesurar el volum d'etanol.

On:

- V_{etanol} : Volum d'etanol necessari.

- m : Massa de la mostra.

Els càlculs explícits del procediment es troben a l'Annex 2.

Fabricació de les DSSCs orgàniques

Obtenció dels materials

Els materials utilitzats en aquest apartat són més especialitzats i, per tant, menys habituals i més difícils d'aconseguir. Es van comprar els materials a l'empresa "Arbor Scientific" seguint la recomanació del meu tutor de l'article científic Camilo Arturo Mesa. Arbor Scientific és un proveïdor líder d'equips d'ensenyament de Física i Química provats i aprovats per educadors reconeguts per la seva experiència. El preu va ser de 145 \$ (125 € en el seu moment) però, degut a la gran distància de l'enviament des dels EUA es va pujar fins als 339.98 \$ (293.9 € en el seu moment). Afortunadament, com que els materials eren abundants es va poder pagar únicament la meitat del preu (146.54 €) cedint la meitat dels materials a una altra persona amb interessos semblants.

El lot que es va comprar incorporava els següents materials (sense dividir-los entre dos encara):

- ✓ 5 multímetres digitals.
- ✓ 10 pinces de cocodril.
- ✓ 15 mL de solució d'electròlit de iodur/triiodur.
- ✓ 25 mL de pasta de diòxid de titani.
- ✓ 30 elèctrodes de vidre FTO (2 cm x 2.5 cm x 0.3 cm).
- ✓ 30 pipetes de 2 mL.
- ✓ 30 clips de carpeta.
- ✓ 15 llapis de grafit.

- ✓ 15 pinces.
- ✓ 15 bosses de plàstic per mostres.
- ✓ 1 rotllo de cinta adhesiva.
- ✓ 5 Ampolles de plàstic per a mostres.
- ✓ 10 LED vermells.
- ✓ 1 cèl·lula solar de 5 V i 400 mA.

Preparació dels substrats

Els substrats es van preparar de la següent manera:

1. Els vuit vidres FTO (dos per cada DSSC) es van netejar amb aigua i sabó ordinari.
2. Es va localitzar la cara conductiva de cadascun dels vuit vidres mitjançant la funció resistència (200Ω) del multímetre mitjançant el següent mètode: es van connectar els cables al multímetre i a continuació es van posar al mateix costat del vidre FTO (un a prop de l'altre però sense tocar-se) i es va llegir el valor de resistència donat seguint aquest protocol:
 - a. Si el voltímetre dona una resistència igual a l'infinit ($R = \infty \Omega$) correspon al costat no conductor del vidre FTO.
 - b. Si obtenim un valor de resistència raonable ($R \neq \infty \Omega$) correspon al conductor costat del vidre FTO.

Preparació dels fotoànodes

La preparació del fotoànode consisteix a recobrir el vidre FTO amb la pasta de dispersió de TiO_2 i seguidament banyar-lo en la solució sensibilitzadora.

Recobriment del vidre FTO amb la pasta de TiO_2

Existeixen principalment dues tècniques per dur a terme aquesta tasca:

1. *Doctor blade*

La tècnica es basa a fixar la superfície que es vol cobrir i, a continuació, la solució de recobriment (pasta de TiO_2 en aquest cas) es col·loca sobre el substrat i es mou en línia amb la superfície, creant una pel·lícula humida. Idealment, la tècnica hauria de tenir pèrdues de solució d'un 5% (Roberts, 2016).

2. Recobriments per rotació

Es col·loca una petita quantitat del material de recobriments (pasta de TiO₂ en aquest cas) sobre el substrat. Seguidament, es fa girar el substrat a gran velocitat perquè el material es difongui per tot el substrat degut a la força centrífuga (Agarwal *et al.*, 2021).

Es va escollir la tècnica doctor blade donat que els materials necessaris per aplicar-la eren fàcils d'aconseguir. Així doncs, es van seguir els següents passos amb quatre dels vuit vidres FTO:

1. Es va fixar el substrat sobre un paper de diari amb el costat conductor cap per amunt mitjançant dues tires de cinta adhesiva. La primera tira va cobrir 0.5 cm del vidre i la segona simplement va servir de suport en el costat oposat del vidre. Així doncs, la part funcional del vidre va ser de 4 cm²,
2. Un cop fixat el vidre sobre el paper de diari, es van dipositar dues gotes de la pasta de TiO₂ sobre aquest.
3. Es va passar unes dues vegades la pipeta per escampar la pasta de TiO₂ fins que va quedar una capa uniforme i homogènia.
4. Es van desenganxar els vidres del paper de diari i es van transportar a una paella amb l'ajuda d'unes pinces.
5. Els vidres es van escalfar a la vitroceràmica amb la capa de TiO₂ cap per amunt fins que el tensioactiu⁶³ del TiO₂ i el dissolvent es van evaporar i van deixar enrere les partícules de TiO₂. Es va poder notar perquè els vidres van adquirir un color groc i marró (inicialment eren blancs).
6. La temperatura es va disminuir progressivament per evitar que els vidres es trenquessin.

⁶³ **Tensioactiu:** Substància que influeix en la superfície de contacte de dues fases i és capaç de disminuir de manera notable la tensió interfacial en una interfície.

Cal notar que en l'escalfament dels vidres FTO amb el TiO_2 no es necessita una temperatura exacta. Mentre més alta sigui la temperatura, més ràpid serà el procés. En aquest cas la temperatura va rondar els 180°C .

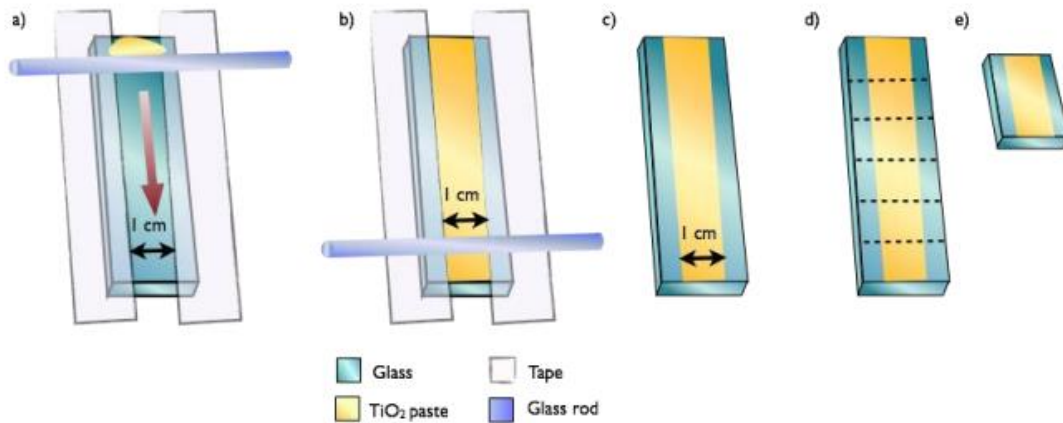


Figura 24. Esquema de recobriments del vidre FTO.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

Impregnació dels substrats amb el sensibilitzador

Seguidament es van banyar els substrats amb el sensibilitzador de la següent manera.

1. Els quatre substrats es van retirar amb unes pinces i es van col·locar amb la cara recoberta amb TiO_2 cap per amunt dintre d'un dels pots de vidre amb sensibilitzador.
2. Els vidres es van deixar reposar dins dels pots durant 12 hores a la nevera.
3. Seguidament, es van deixar assecar a temperatura ambient traient-los dels pots amb l'ajuda de pinces.

Actualment, el temps d'absorció dels fotoànodes en els sensibilitzadors no està molt ben definit. Per una banda, alguns estudis han registrat millors resultats amb temps d'1 hora (*Krawczak i Zdyb, 2019*)⁶⁴, però, per altra banda, altres estudis registren millors resultats amb temps de 24 hores. Aquestes discussions sobre un temps d'immersió ideal es deuen al fet que, aquest, no existeix sinó que cada tipus de sensibilitzador en té un de diferent.

⁶⁴ Més informació: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/26/e3sconf_eko-dok2019_00040/e3sconf_eko-dok2019_00040.html

En aquest cas es va apostar per una mitjana entre els temps que habitualment són els millors (12 hores).



Figura 25. Esquema de impregnació dels substrats amb sensibilitzadors.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

Preparació dels contraelèctrodes

En el cas dels quatre contraelèctrodes, simplement es va cobrir la superfície de la cara conductora amb grafit (catalitzador) utilitzant la mina del llapis per pintar els vidres FTO. D'igual manera que en els fotoànodes, es va començar a pintar a partir dels 0.5 cm, deixant els mateixos 4 cm² funcionals.

Assemblatge de la DSSC

Es va ajuntar el contraelèctrode i el fotoànode de les quatre DSSCs de la següent manera:

1. Les dues parts es van ajuntar amb la característica estructura de sandvitx de la DSSC. Les dues parts recobertes es tocaven de tal manera que el TiO₂ i el grafit estaven en contacte. Es van deixar els 0.5 cm de llargada (1 cm²) sense recobrir de cada vidre com a contactes de les cèl·lules solars.
2. Es va fixar aquesta situació dels components mitjançant una pinça porta notes a un dels costats de les cel·les (veure figura 26), deixant així una obertura a l'altre costat.
3. Es van introduir dues gotes de la solució d'electròlit de iodur/triiodur (I⁻/I₃⁻) entre els dos elèctrodes amb l'ajuda d'una pipeta.
4. Es van fixar definitivament les DSSC amb una pinça porta notes al costat oposat.

5. Es va prémer la cel·la lleugerament amb l'objectiu que l'electròlit es difongués adequadament.

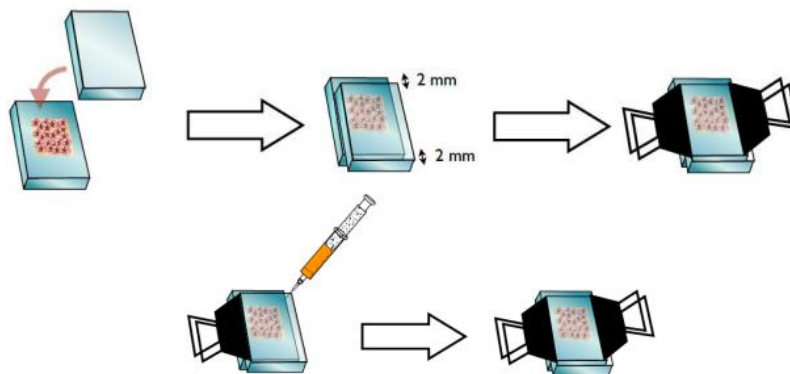


Figura 26. Esquema d'assemblatge de les DSSCs.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

Finalment es van connectar dues pinces de cocodrill al multímetre i seguidament, als extrems de la DSSC, mentre s'utilitzava, una de les funcions de voltatge (V).

3.1.2 RESULTATS

Per aquests primers resultats no s'ha elaborat cap mena de gràfic. Simplement, consisteixen en imatges, una taula resum de les característiques de les DSSCs construïdes i l'anàlisi d'un valor de voltatge.

Es poden consultar altres fotografies del procediment a l'Annex 1.

3.1.2.1 Anàlisi de resultats

Colorants sintetitzats

Els colorants sintetitzats es poden veure a les següents imatges:

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA



Il·lustració 2. Resum de tot el procediment.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.



Il·lustració 3. Sensibilitzadors sintetitzats.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

DSSCs construïdes

Després d'haver sintetitzat el colorant natural i haver construït les quatre DSSCs orgàniques amb aquest, el resultat aconseguit és el següent:



Il·lustració 5. DSSCs construïdes.

Font: Elaboració pròpia



Il·lustració 4. Fotoànodes construïts.

Font: Elaboració pròpia

Funcionament de les DSSCs

En el següent vídeo es pot apreciar l'exitós funcionament d'una de les cel·les:



<https://youtube.com/shorts/wsGtp2uKecA?feature=share>

Voltatge de les DSSCs

El voltatge marcat en les 4 cel·les va ser:

- ✓ Diferent de zero ($V \neq 0 V$)
- ✓ Variable en funció de la llum solar incident. A més llum més voltatge, és a dir que les dues variables eren directament proporcionals.

3.1.3 DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

Amb aquests resultats es demostra científicament que les DSSCs basades en residu de suc de poma són funcionals. Partint d'aquest enunciat, a continuació es caracteritzarà aquesta cel·la per estudiar-ne el potencial i s'investigarà la factibilitat de la seva possible aplicació.

3.2 Caracterització de les DSSCs naturals basades en la poma (*Malus domestica*)

3.2.1 METODOLOGIA

Amb l'objectiu d'avaluar el potencial de la DSSC construïda com a cel·la fotovoltaica i investigar si les variables de la maduresa i el color afecten el rendiment d'una DSSC basada en *Malus domestica*, es caracteritzaran el màxim possible les quatre cel·les construïdes en la secció prèvia.

D'una banda, es mesuraran els paràmetres elèctrics bàsics i més comuns en la caracterització de cel·les solars.

D'altra banda, es mesuraran les DSSCs i els sensibilitzadors mitjançant tècniques òptiques d'anàlisi. En aquestes mesures conceptes com la llum, l'ona electromagnètica i l'energia d'aquestes prendran una gran importància.

3.2.1.1 Conceptes previs

Per comprendre la caracterització de les quatre DSSCs i els quatre colorants cal fer una breu descripció de la llum i les magnituds relacionades. Addicionalment, és important analitzar els fenòmens de la coloració i la putrefacció per poder fer unes prediccions abans de procedir. Finalment, cal detallar les tècniques emprades, els materials i les condicions de l'experiment.

La llum

Breu descripció

La llum es pot entendre com un conjunt de radiacions electromagnètiques. Així per exemple, es defineix la llum visible com tota radiació electromagnètica capaç de ser percebuda per l'ull humà o dit d'altra manera tota radiació electromagnètica que pertany a l'espectre visible. En canvi, el conjunt de radiacions que formen la llum solar inclouen l'espectre visible, infraroig i ultraviolada.

Cal destacar que la llum està formada per fotons, unes partícules elementals, i que, segons la dualitat ona-corpúscle, a vegades es poden comportar com una ona i a vegades com una partícula.

Característiques d'una radiació electromagnètica

Una radiació electromagnètica està composta per un conjunt d'ones amb un component elèctric perpendicular a un altre component elèctric que es propaguen per l'espai transportant energia. Malgrat que tota ona posseeix una amplitud i una longitud, com s'ha vist anteriorment, és la longitud la que està directament relacionada amb l'energia de l'ona. Les característiques més importants d'una ona són les següents (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*):

✓ Longitud d'ona (λ):

Distància entre dos punts d'una ona que han passat per un cicle complet. Les unitats de la longitud d'ona són nanòmetres.

✓ Freqüència (ν):

Nombre de cicles complets d'una ona per unitat de temps. Les unitats de freqüència són s^{-1} .

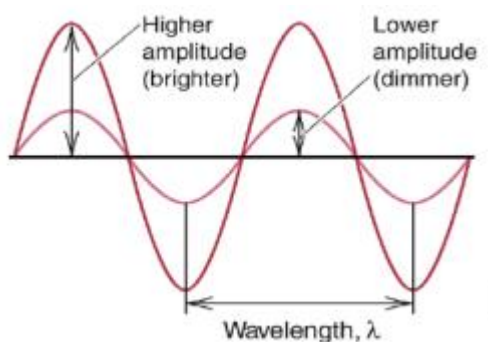


Figura 27. Representació gràfica d'una ona.

Font: *From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*.

A més a més, la freqüència i la longitud d'ona estan relacionades entre elles a partir de la constant de la llum⁶⁵ (c) segons l'equació 7.

⁶⁵ **Constant de la llum:** 2.998×10^8 m/s.

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Equació 7. Relació entre la longitud d'ona i la freqüència d'una ona.

On:

- c: Constant de la llum.
- λ : Longitud d'ona.
- ν : Freqüència.

L'energia d'una radiació electromagnètica ve donada pel producte de la freqüència per la constant de Planck⁶⁶ (h) (equació 8).

$$E = h \cdot \nu$$

Equació 8. Equació de l'energia d'una radiació electromagnètica.

On:

- E: Energia.
- h: Constant de Planck.
- ν : Freqüència.

Substituint la freqüència a la segona equació mencionada es dedueix l'expressió que demostra que l'energia i la longitud d'ona estan relacionades i que defineix l'energia d'un fotó (equació 9).

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda_{(m)}} \rightarrow E(eV) = \frac{1.24}{\lambda_{(\mu m)}}$$

Equació 9. Energia en funció de la longitud d'ona.

On:

- E: Energia.
- h: Constant de Planck.
- c: Constant de la llum.
- λ : Longitud d'ona

⁶⁶ Constant de Planck: 6.626×10^{-34} joule · s.

Flux de fotons (Φ)

El flux de fotons es defineix com el nombre de fotons per unitat de temps per unitat d'àrea que impacten sobre una superfície segons l'equació 10. La unitat és $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

$$\Phi = \frac{\# \text{ de fotons}}{t \cdot A}$$

Equació 10. Definició del flux de fotons.

On:

- Φ : Flux de fotons.
- # de fotons: Nombre de fotons.
- t: Temps en segons.
- A: Superfície en m^2 .

Aquest paràmetre és important per conèixer el nombre de fotons captats i conseqüentment el corrent produït per una cel·la solar (*C.B.Honsberg i S.G.Bowden, 2019*).

Densitat de potència radiant (H) o irradiància

La densitat de potència radiant es calcula com el producte de l'energia d'un fotó a una determinada longitud d'ona multiplicat pel flux de fotons (equació 11). La unitat és W/m^2 .

$$H = \Phi \cdot E = \Phi \cdot \frac{hc}{\lambda}$$

Equació 11. Definició de la densitat de potència radiant.

On:

- H: Irradiància.
- Φ : Nombre de fotons.
- E: Energia d'un fotó
- h: Constant de Planck.
- c: Constant de la llum.
- λ : Longitud d'ona.

Atès que el flux de fotons indica el nombre de fotons que impacten una superfície en un temps determinat, el producte del nombre de fotons per unitat de temps per l'energia d'un fotó resulta en l'energia que impacta contra una superfície per unitat de temps, en altres paraules, la densitat de potència radiant.

Cal entendre que la densitat de la potència radiant es manté constant en totes les longituds d'ona. Per tant, per un fotó de menys energia serà necessari un flux de fotons més gran que per un fotó de major energia.

La densitat de potència radiant o irradiància del sol és 1000 W/m^2 (C.B.Honsberg i S.G.Bowden, 2019).

Irradiància espectral ($F(\lambda)$)

La irradiància espectral es pot determinar com el quocient de la densitat de potència radiant entre una longitud d'ona donada en funció d'aquesta longitud d'ona. La seva unitat és $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$.

$$F(\lambda) = \Phi E \frac{1}{\lambda}$$

Equació 12. Definició de la irradiància espectral.

On:

- F: Irradiància espectral.
- E: Energia d'un fotó
- Φ : Flux de fotons.
- λ : Longitud d'ona.

La gràfica d'aquesta funció (irradiància espectral en funció de la longitud d'ona) dona la irradiància espectral per a cada longitud d'ona i és la forma més comuna de caracteritzar una font de llum.

La irradiància espectral del sol és la següent:

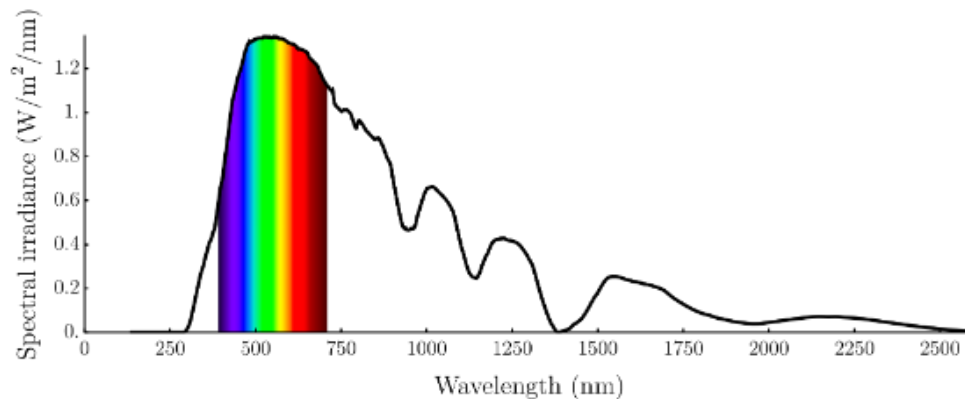


Figura 10. Espectre d'emissió solar dels 0 nm als 3000 nm (irradiància en funció de la longitud d'ona).

Font: Brilliant.

Entenent el concepte d'irradiància espectral es pot deduir que si es suma la irradiància espectral de totes les longituds d'ona o en altres paraules es calcula l'àrea de la seva funció entre les longituds d'ona 0 nm i ∞ nm el resultat obtingut serà la densitat de potència radiant. Així doncs, aquesta es pot calcular amb la següent integral (*C.B.Honsberg i S.G.Bowden, 2019*):

$$H = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda$$

Equació 13. Equació per calcular la densitat de potència radiant.

On:

- H: Irradiància.
- $F(\lambda)$: Irradiància espectral.

Coefficient de massa d'aire (AM)

La massa d'aire és la relació entre la longitud del camí que fa la llum a través de l'atmosfera i la longitud del camí més curt possible (és a dir, quan el sol està directament a sobre de la cel·la). D'altra banda, la massa d'aire quantifica la reducció de la potència de la llum quan travessa l'atmosfera i és absorbida per l'aire i la pols. La massa d'aire es defineix com:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} = \frac{Y}{X}$$

Equació 14. Definició del coeficient de massa d'aire.

On:

- AM: Massa d'aire.
- θ : Angle entre la vertical (X) i la distància del sol (Y).
- Y: Camí real que fa la llum (vertical).
- X: Camí més curt possible (distància del sol).

Les seves unitats són AM.

Aquesta mesura s'utilitza molt habitualment per caracteritzar cel·les solars en condicions estàndards. La mesura en condicions estàndards és 1.5 AM (C.B.Honsberg i S.G.Bowden, 2019).

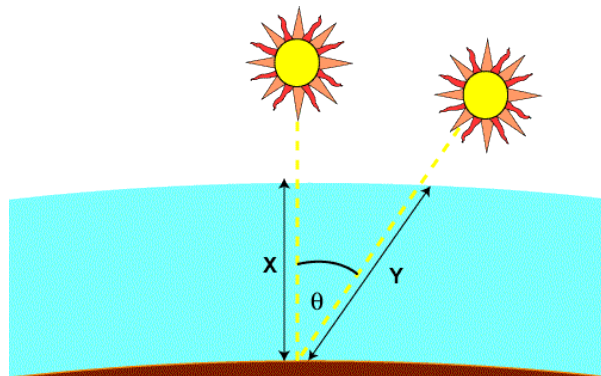


Figura 28. Representació gràfica de l'angle θ .

Font: PV education.

Característiques de les mostres i prediccions

Color

Existeixen pomes de diferent color a causa d'un gen anomenat MYB10. Com més quantitat d'aquest gen tingui un individu de l'espècie *Malus domestica*, més gran serà el seu nivell d'enzims⁶⁷. Aquests enzims treballen per convertir una sèrie de molècules de la *Malus domestica* en pigments d'antocianina. Com més antocianina té un individu de

⁶⁷ **Enzims:** Són proteïnes que catalitzen reaccions químiques en els éssers vius.

Malus domestica, més vermell serà. Aleshores, es pot concloure que a major quantitat de gen MYB10, més vermella serà la pela de la *Malus domestica* (BBC NEWS, 2019).

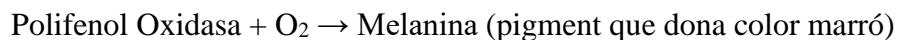
Una altra variable important és la temperatura. Quan la *Malus domestica* es troba per sobre els 40°C de temperatura, els seus nivells de gens MYB10 i, conseqüentment, els d'antocianina es reduiran.

Finalment, cal destacar una altra variable, la llum. En totes les reaccions mencionades anteriorment, la llum és necessària (especialment la ultraviolada), per tant a major quantitat de llum rebuda major nivell d'antocianina (*Extensión en Español*, 2021).

Així doncs, és d'esperar, que la DSSC vermella mostrarà millors resultats en aquesta caracterització al tenir majors nivells d'antocianina.

Putrefacció

Un individu de *Malus domestica* s'oxida quan està exposat a l'aire, ja que l'oxigen activa un enzim químic anomenat Polifenol Oxidasa. Aquest enzim provoca la següent reacció química enzimàtica:



A diferència de l'altre explicació, en aquest cas no es poden formular prediccions de cara a l'experiment.

Condicions de l'experiment

Totes les mesures es van dur a terme en condicions estàndards exceptuant la irradiància (densitat de potència radiant):

- ✓ Coeficient de massa d'aire 1.5 (AM 1.5). Així doncs, seguint l'equació 13 amb 1.5 AM i aïllant l'angle zenital (θ) s'obté que el valor d'aquest angle és de 48.19°. En conclusió totes les mesures s'han realitzat amb un angle de 48.19° entre la distància de la DSSC i la font lluminosa i la normal de la superfície estant situada sobre la cel·la. Aquesta última mesura la distància de la font lluminosa a terra.
- ✓ Irradiància característica de la làmpada utilitzada mesurada posteriorment.
- ✓ Temperatura entre uns 21°C i 25°C (temperatura ambient).
- ✓ Foscor absoluta exceptuant la font de llum.

Tècniques òptiques d'anàlisi

Breu descripció

Aquests procediments experimentals es centren en analitzar les interaccions entre les radiacions electromagnètiques i la matèria i l'intercanvi d'energia en aquests processos a partir de les lleis de l'òptica. Aquestes interaccions són principalment quatre:

1. Absorció.
2. Reflexió.
3. Refracció.
4. Emissió.
5. Transformació d'energia calorífica a energia lumínica.

Aquestes tècniques es basen en el rang òptic de les longituds d'ones que formen l'espectre electromagnètic (*Thermopedia, 2018*). L'ull humà és capaç de percebre aquestes interaccions amb radiacions dintre de l'espectre visible. Alguns exemples de tècniques òptiques d'anàlisi són l'espectroscòpia, la microscòpia, la interferometria, etc (*Nature portafolio, 2022*).

Materials i eines emprades

Els materials utilitzats en aquest procediment són els següents (veure fotos a l'Annex 3):

- Les quatre DSSCs naturals.
- Els quatre sensibilitzadors.
- Pots de vidre petits (5 cm x 5 cm x 8 cm).
- Espectrofotòmetre construït emprant:
 - Papers de cel·lofana de colors (lila, verd, blau, groc, vermell, taronja).
 - Fotodíode.⁶⁸
 - Multímetre.
 - Pinceres de cocodril.
 - Làmpada LED (ADEO).

⁶⁸ **Fotodíode:** és un dispositiu semiconductor amb una unió P-N que actua com a sensor de llum convertint l'energia lumínica (fotons) en energia elèctrica (electrons).

Paràmetres elèctrics

Breu descripció

Els paràmetres elèctrics comunament usats per analitzar el rendiment de les DSSCs permeten conèixer el seu potencial i comparar-les amb altres dispositius fotovoltaics. Aquests paràmetres són de vital importància donat que:

- ✓ S'usen amb qualsevol dispositiu fotovoltaic.
- ✓ Es mesuren en condicions estàndards.

Aquestes dues darreres característiques converteixen la informació donada per aquests paràmetres en imprescindible pel desenvolupament del sector de l'energia solar.

Materials i eines emprades

Els materials utilitzats en aquest procediment són els següents (veure fotos a l'Annex 3):

- Quatre DSSCs naturals.
- Fotodíode.
- Resistències elèctriques de:
 - 1000 Ω .
 - 10000 Ω .
 - 47000 Ω .
 - 100000 Ω .
 - 470000 Ω .
 - 1000000 Ω .
- Multímetre.
- Pines de cocodril.
- Làmpada LED (ADEO).

3.2.1.2 Procediment

Caracterització de la font lluminosa

La làmpada

Justificació de la tria

La mesura de la densitat de potència radiant del sol global, 1000 W/m^2 , és una aproximació només vàlida al migdia i pot variar en funció de la ubicació geogràfica i la climatologia.

Els laboratoris, en canvi, sí que disposen de làmpades d'“1 sol” que simulen a la perfecció els 1000 W/m^2 i els 1.5 AM. A causa de no comptar amb un equip amb aquest grau de precisió i comprovar que les mesures utilitzant el sol com a font de llum eren molt arbitràries, es va optar per usar una làmpada LED⁶⁹ com a font de llum per aconseguir la màxima precisió possible amb els recursos disponibles.

Característiques

Segons el manual d'usuari⁷⁰ les característiques de la làmpada són les següents:

- ✓ Flux lluminós: 620 lúmens
- ✓ Potència: 6.5 Watts
- ✓ Color del LED: Blanc

Potència de la llum incident

La potència de la llum incident de les cel·les és equivalent a la densitat de potència radiant que rep una DSSC proporcionada per la làmpada. Aquesta es va poder mesurar segons l'equació 15 a partir del producte de:

- ✓ L'àrea activa de la cèl·lula solar de colorant (A_{DSSC}) mesurada en cm^2 . En aquest cas 4 cm^2
- ✓ La densitat de potència òptica de la llum que il·lumina la superfície activa (p_{pd}) mesurada en mW/cm^2 .

⁶⁹ Làmpada d'escriptori amb LED integrada model 0074KD-165x50x270mm-WH.

⁷⁰ Manual d'usuari:

<https://media.adeo.com/marketplace/82042749/3f417801-5de1-4863-8ec8-3807bec333e6.pdf>.

$$P_{in} = p_{pd} \cdot A_{DSSC}$$

Equació 15. Equació per calcular la potència incident d'una cel·la.

On:

- P_{in} : Potència incident.
- p_{pd} : Densitat de potència òptica.
- A_{DSSC} : Àrea activa de la DSSC.

D'altra banda, el p_{pd} es va aconseguir esbrinar a partir de l'equació on:

- ✓ La densitat de corrent generada mesurada (i_{pd}) en mA/cm² es va trobar realitzant el següent muntatge.
 - Es va connectar un fotodíode a un multímetre amb pinces de cocodrill i es va situar sota la làmpada amb les condicions ja descrites prèviament (1.5 AM o 48.19°) per registrar una intensitat.
 - Es va dividir el valor d'intensitat entre la superfície activa del fotodíode per convertir-lo en un valor de densitat d'intensitat.

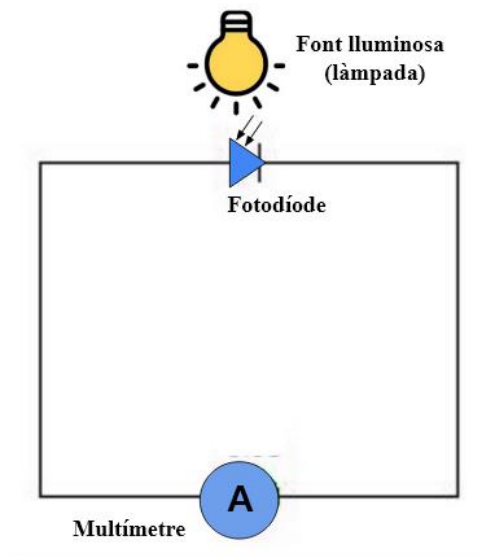


Figura 29. Senzill esquema del circuit emprat per mesurar la i_{pd} de la font lluminosa.

Font: Elaboració pròpia.

- ✓ La responsivitat de fotodíode (R_{pd}) mesurada en mA/W es va suposar 1 mA/W a causa de la llum blanca del LED i basat en les conclusions de l'article científic⁷¹ de Martin Kowalczyk i col·laboradors.

$$p_{pd} = R_{pd} \cdot i_{pd}$$

Equació 16. Equació per calcular la densitat de potència òptica a partir d'un fotodíode.

On:

- p_{pd} : Densitat de potència òptica.

- i_{pd} : Densitat de corrent generada.

- R_{pd} : Responsivitat d'un fotodíode.

Com que el cap del fotodíode tenia forma de cilindre amb una semiesfera a dalt, es va calcular la superfície a partir de l'equació següent:

$$A = \pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot h \cdot r + \frac{4\pi \cdot r^2}{2}$$

Equació 17. Càlcul de la superfície del fotodíode.

On:

- A: Àrea del fotodíode.

- h: altura del fotodíode.

- r: radi.

Les dades necessàries es van trobar al lloc web⁷² on es va comprar el fotodíode:

- ✓ Radi: 25 mm (5 mm de diàmetre)
- ✓ Llargada: 5 mm

Finalment la P_{in} es va tornar a dividir entre la superfície activa de la DSSC (4 cm^2) per transformar el valor de potència (W) en valor de densitat d'intensitat (W/cm^2) i així obtenir la unitat característica de la potència incident.

⁷¹ **Article científic de Martin Kowalczyk:** Kowalczyk, Martin & Siuzdak, J.. (2017). Photo-reception properties of common LEDs. Opto-Electronics Review. 25. 222-228. 10.1016/j.opelre.2017.06.009.

⁷² https://www.amazon.es/dp/B00M1PMHO4?psc=1&ref=ppx_pop_dt_b_asin_title

Caracterització amb paràmetres elèctrics

Paràmetres elèctrics importants

Voltatge de circuit obert (V_{oc})

El voltatge de circuit obert (V_{oc}) ve determinat per la diferència de potencial entre el nivell de Fermi dels electrons de la pel·lícula del semiconductor (TiO_2) i el potencial de la parella redox de l'electròlit (I_3^-/I^-) segons l'equació 18 (*JoVE Science Education Database, 2022*). Es mesura en volts.

$$V_{oc} = \frac{(E_f - E_{redox})}{q}$$

Equació 18. Definició del voltatge de circuit obert.

On:

- V_{oc} : Voltatge de circuit obert.
- E_f : Energia del semiconductor.
- E_{redox} : Energia de l'electròlit.
- q : Càrrega d'un electró.

Aquesta tensió és la màxima que és capaç de produir la cel·la i només es pot aconseguir quan la resistència és infinita ($R = \infty \Omega$). Conseqüentment, segons la llei d'Ohm (equació 19), la intensitat val zero amperes ($I = 0 A$). Un circuit amb aquestes característiques s'anomena circuit obert.

$$V = R \cdot I$$

Equació 19. Llei d'Ohm.

On:

- V : Voltatge.
- I : Intensitat.
- R : Resistència.

El màxim voltatge de circuit possible és 1.6 V, tot i que en la pràctica aquest és molt difícil d'aconseguir (*Kusumawati et al., 2021*).

Existeixen únicament dues maneres de millorar el V_{oc} (*Hupp et al., 2008*):

1. Augmentant el nivell de Fermi mitjançant l'augment de la velocitat d'injecció dels electrons al semiconductor o reduint les possibles reaccions de recombinació. La diferència entre el nivell de Fermi i la banda de conducció sol ser aproximadament 200 mV. Per tant, el marge de millora és d'uns 200 mV.
2. Fer que la parella redox de l'electròlit sigui més elèctricament positiva mitjançant additius. En aquest cas el marge de millora és d'uns 550 mV.

Intensitat de circuit curt (I_{sc})

És la intensitat màxima capaç de produir una cel·la solar i només es pot aconseguir quan la resistència val zero ($R = 0 \Omega$). Aplicant la llei d'Ohm (equació 19), el voltatge val zero volts ($V = 0 V$). Un circuit amb aquestes característiques s'anomena circuit curt (*Garcia, 2021*). Es mesura en amperes.

Densitat d'intensitat de circuit curt (J_{sc})

La densitat de circuit obert es defineix com la relació entre la intensitat de circuit obert i la superfície activa de la cel·la (equació 20). Es mesura en mAcm^{-2} .

$$J_{sc} = \frac{I_{sc}}{A_{DSSC}}$$

Equació 20. Definició de la densitat d'intensitat de circuit curt.

On:

- J_{sc} : Densitat d'intensitat de circuit curt.

- I_{sc} : Intensitat de circuit curt.

- A_{DSSC} : Superfície de la DSSC.

Aquest paràmetre varia en funció del rendiment del fotoànode i el contraelectrode i pot ser millorat mitjançant:

1. Augmentant el rendiment del catalitzador en el transport de càrrega i reduint la seva resistència.

2. Augmentant la captació de la llum, per exemple amb un sensibilitzador capaç d'adherir-se millor al semiconductor.

Potència màxima (P_{max})

És la màxima potència capaç de proporcionar una cel·la solar. Es mesura en W/m^2 .

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max}$$

Equació 21. Definició de la potència màxima.

On:

- P_{max} : Potència màxima.

- I_{max} : Intensitat màxima.

- V_{max} : Voltatge màxim.

Aquesta no s'aconsegueix amb el producte del voltatge més alt (V_{oc}) i la densitat d'intensitat més alta (J_{sc}) sinó amb el producte d'una densitat d'intensitat i un voltatge que tot i no ser les més altes possibles, multiplicats sí que donen la densitat de potència radiant més alta (equació 21). Aquest voltatge i aquesta densitat d'intensitat s'anomenen:

- ✓ Densitat d'intensitat màxima (J_{max})
- ✓ Voltatge màxim (V_{max})

Potència teòrica (P_{theo})

És la màxima densitat de potència radiant hipotètica que la cel·la solar podria aconseguir. Es defineix com el producte del màxim voltatge (V_{oc}) i la màxima densitat d'intensitat (J_{sc}) (equació 22). La seva unitat és el W/m^2 .

$$P_{theo} = I_{sc} \cdot V_{oc}$$

Equació 22. Definició de la potència teòrica.

On:

- P_{theo} : Potència teòrica.

- I_{sc} : Intensitat de circuit curt.

- V_{oc} : Voltatge de circuit obert.

Aquest paràmetre és molt important per conèixer el potencial de la cel·la.

Potència incident (P_{in})

És la densitat de potència radiant o irradiància de la font lumínica (calculada prèviament).

La del sol és 100 W/cm^2 . La seva unitat és W/m^2 .

Factor d'emplenament (FF)

El factor d'emplenament es defineix com la relació entre la potència màxima real que es pot obtenir (P_{max}) i la potència que la cel·la té el potencial de proporcionar (P_{theo}) (equació 23). També es pot entendre com la relació entre l'àrea A i l'àrea B de la imatge. No té unitats, però es sol representar com un percentatge (%).

És una mesura essencial perquè reflecteix la qualitat de la cel·la solar i com de lluny està d'assolir el seu potencial. Els valors habitualment es troben entre 0.4 i 0.8.

$$FF(\%) = \frac{P_{max}}{P_{theo}} \cdot 100$$

Equació 23. Definició del factor d'emplenament.

On:

- FF: Factor de filtre.
- P_{max} : Potència màxima.
- P_{theo} : Potència teòrica.

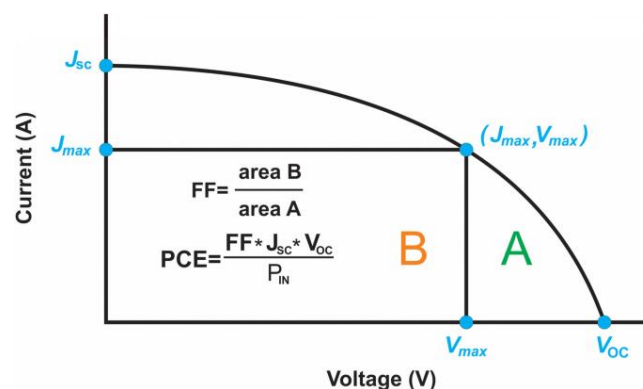


Figura 30. Representació gràfica del FF.

Font: Sharma, Sharma i Sharma, 2018.

Eficiència total o eficiència de conversió elèctrica (PCE⁷³ o η)

L'eficiència total es defineix com la relació entre la potència màxima real que es pot obtenir (P_{max}) i la potència de la llum incident (P_{in}). No té unitats, però s'expressa com un percentatge (%).

Es pot entendre com el percentatge d'energia lumínica (fotons) absorbida de la font lluminosa convertida en energia elèctrica (electrons) en forma de corrent elèctric.

L'eficiència de conversió elèctrica pot millorar-se optimitzant el V_{oc} , el FF i el J_{sc} . Tots els estudis es centren, en definitiva, a millorar aquest paràmetre.

$$PCE(\%) = \eta(\%) = \frac{P_{max}}{P_{in}} \cdot 100$$

Equació 24. Definició de l'eficiència de conversió elèctrica.

On:

- PCE: Eficiència de conversió elèctrica.
- η : Eficiència total.
- P_{max} : Potència màxima.
- P_{theo} : Potència teòrica.

Corbes de caracterització

Les corbes de caracterització són unes gràfiques vitals en l'estudi d'una cel·la solar perquè representen el seu funcionament.

Corba I-V

Aquesta corba descriu els valors d'intensitat en funció de valors de voltatge. Sempre s'inclou el I_{sc} amb un voltatge associat de zero (a causa del circuit curt) i el V_{oc} amb una intensitat associada de zero (a causa del circuit obert).

⁷³ "Power conversion efficiency".

Corba J-V

És el mateix que la corba descrita prèviament però dividint els valors d'intensitat (I) entre la superfície activa de la cel·la per convertir-los en valors de densitat d'intensitat (J) (Equació 20). (Veure exemple a la figura 30).

Corba P-V

Aquesta última és igual que les dues anteriors amb la diferència que es substitueixen els valors d'intensitat (I) o densitat d'intensitat (J) per valors de densitat de potència radiant (P) obtinguts de multiplicar els valors J pels valors V.

$$P = J \cdot V$$

Equació 25. Definició de la densitat de potència.

On:

- P: Densitat de potència.

- V: Voltatge.

- J: Densitat d'intensitat.

Aquesta última és molt important perquè permet calcular el P_{\max} .

Obtenció de les mesures

Voltatge de circuit obert (V_{oc}) i intensitat de circuit curt (I_{sc})

Per mesurar el V_{oc} i el I_{sc} de les quatre DSSCs es van col·locar les cel·les, una per una, sota la làmpada LED amb les condicions indicades anteriorment i es van connectar amb un multímetre mitjançant pinces de cocodril. Es va trobar el V_{oc} i el I_{sc} mitjançant la funció voltatge (establint un circuit obert) i intensitat (establint un circuit curt) del multímetre respectivament. Seguidament, es va trobar el J_{sc} dividint el I_{sc} entre la superfície (4 cm^2) i el P_{theo} segons el producte del J_{sc} i el V_{oc} .

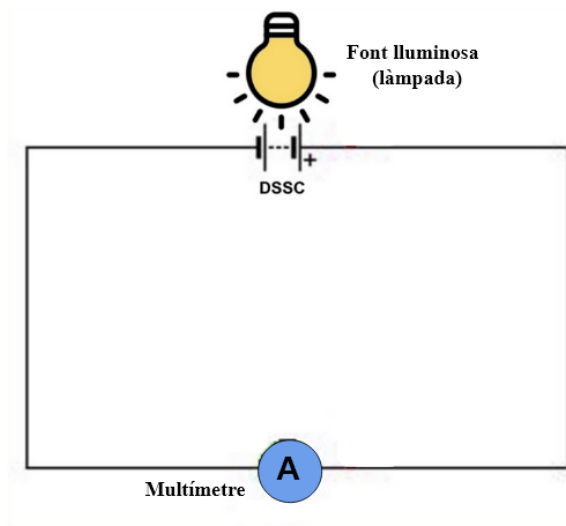


Figura 31. Senzill esquema del circuit emprat per mesurar valors de V_{oc} i I_{sc} de les quatre DSSCs.

Font: Elaboració pròpia.

Corba I-V

Malgrat que, per traçar una corba I-V existeixen mètodes molt diversos tots, excepte un, requereixen d'equipament molt tècnic i precís com poden ser màquines i ordinadors i, per tant, equipament car. Com és evident, degut als recursos d'aquest projecte es va optar pel mètode que prescindeix d'aquest tipus d'eines.

El mètode de la resistència variable

Aquest mètode provat per M.S. Yatnatti i col·laboradors l'any 2013⁷⁴, consisteix en:

- ✓ Mesurar diferents valors de voltatge mitjançant diferents resistències connectades en sèrie amb la DSSC i un multímetre connectat en paral·lel.
- ✓ Posteriorment, calcular els valors d'intensitat mitjançant la llei d'Ohm (equació 19).
- ✓ Dibuixar la gràfica entrant els valors a l'ordinador.

Les resistències utilitzades van ser:

- 1000 Ω .

⁷⁴ **Article de Yatnatti:** I-V Characterization of Dye Sensitized Solar Cell Using Cost Effective Automated Load Variable Method, M. S. Yatnatti, Ravi K. Lingnagoudar, J. S. Kadadevarmath Global Journal for Research Analysis: Volume-2 | Issue-6 | June2013.

- 10000 Ω .
- 47000 Ω .
- 100000 Ω .
- 470000 Ω .
- 1000000 Ω .

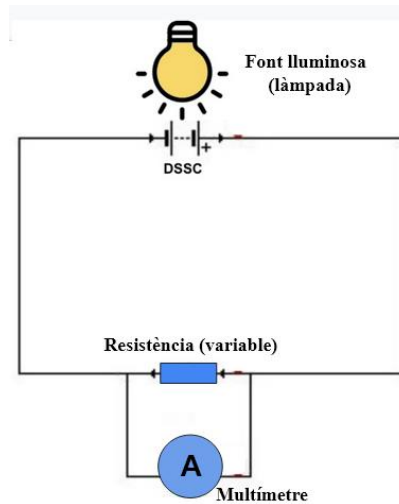


Figura 32. Senzill esquema del circuit emprat per mesurar els diferents valors de voltatge en una determinada resistència.

Font: Elaboració pròpia.

Corbes J-V, P-V i resta de paràmetres

En les dues altres corbes es van obtenir els valors J i els valors P com s'ha especificat prèviament i seguidament es van introduir aquests a l'ordinador per dibuixar-les. Es va extreure el P_{\max} de les corbes P-V i finalment es va calcular el FF i el PCE amb les equacions detallades.

Caracterització amb tècniques òptiques d'anàlisi

La tècnica òptica d'anàlisi usada en aquest apartat s'anomena espectroscòpia d'absorció UV-visible i es centra en l'absorció de la llum. Es requerirà, doncs, un espectrofotòmetre. S'estudiaran tres paràmetres, dos dels quals es centraran en l'estudi dels colorants i el restant en l'estudi de les DSSCs.

Paràmetres utilitzats en els colorants

Absorbància

L'absorció es produeix quan la radiació electromagnètica produeix una excitació de la mostra provocant una transició entre diferents nivells d'energia en comptes de, per exemple, alliberar-se en forma de calor. Així doncs, quan un feix de radiació monocromàtica⁷⁵ és absorbida per una mostra, la intensitat del feix (P_0) es redueix a una intensitat (P). La intensitat perduda en el procés és la que ha sigut absorbida. L'absorció s'expressa com un percentatge (%).

Mesurant l'absorció d'una mostra en diferents longituds d'ona, amb un espectrofotòmetre, s'obté el que s'anomena l'espectre d'absorció.

Hi ha diverses equacions per calcular l'absorbància:

$$A (\%) = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) \cdot 100$$

Equació 26. Equació per calcular l'absorbància.

On:

- A: Absorbància.
- P_0 : Intensitat del feix inicial.
- P: Intensitat del feix.

$$A = 2 - \log(T(\%))$$

Equació 27. Equació per calcular l'absorbància.

On:

- A: Absorbància.
- T(%): Transmittància (en percentatge).

⁷⁵ **Radiació monocromàtica:** Radiació electromagnètica d'una sola longitud d'ona.

La transmitància es calcula a partir de la següent expressió:

$$T(\%) = \frac{P}{P_0} \cdot 100$$

Equació 28. Equació per calcular la transmitància.

On:

- T(%): Transmitància (en percentatge).
- P_0 : Intensitat del feix inicial.
- P: Intensitat del feix.

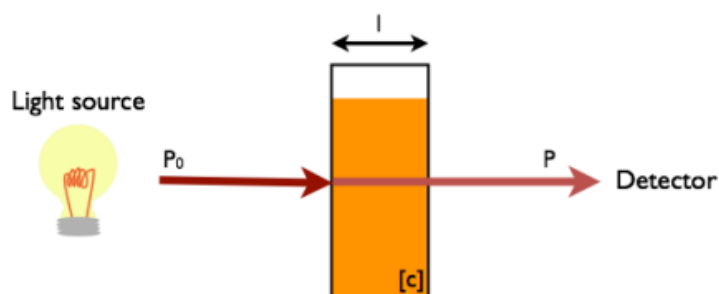


Figura 33. Representació gràfica de l'absorbància i les magnituds esmentades.

Font: From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021.

Coefficient d'extinció molar

És una constant que determina amb quina força una substància absorbeix la llum a una determinada longitud d'ona. La seva unitat de mesura en el sistema internacional és m^2/mol , tot i que es sol utilitzar $\text{M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. En aquest cas per falta de la coneixença de la massa molar del sensibilitzador, donat que el sensibilitzador és un nou compost orgànic, es va utilitzar les unitats $\text{L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. El coeficient d'extinció molar està relacionat amb l'absorbància a partir de la llei de Lambert-Beer:

$$A = c \cdot l \cdot \varepsilon$$

Equació 29. Llei de Lambert-Beer.

On:

- A: Absorbància.
- ε : Coeficient d'extinció molar.
- l: Llargada del recipient.
- c: Concentració.

Paràmetres utilitzats en les DSSCs

Eficiència de conversió de fotons incidents (IPCE⁷⁶)

Malgrat que amb radiació monocromàtica l'eficiència total de les cel·les és constant, amb radiació policromàtica⁷⁷ aquesta varia en funció de la longitud d'ona incident. L'eficiència de conversió de fotons incidents és un paràmetre que sorgeix amb la finalitat d'estudiar la llum policromàtica. Així doncs, tan el IPCE com el PCE es defineixen com la relació entre els electrons produïts i els fotons incidents. Com que s'aplica a cada longitud d'ona, es representa en una gràfica del IPCE en funció de la longitud d'ona. Els valors de IPCE s'expressen en percentatge (%). Cal destacar que el IPCE varia segons l'absorció del sensibilitzador. El IPCE es pot calcular de diverses maneres, però l'equació més simple és la següent:

$$IPCE(\lambda) = \frac{\text{Electrons produïts}}{\text{Fotons incidents}} = \frac{1240 \cdot J_{sc}}{\lambda \cdot P_{in}}$$

Equació 30. Definició del IPCE.

On:

- IPCE(λ): IPCE en funció de la longitud d'ona.
- P_{in} : Potència incident.
- J_{sc} : Densitat d'intensitat de circuit curt.
- λ : Longitud d'ona.

⁷⁶ **IPCE:** "Incident photon conversion efficiency".

⁷⁷ **Radiació policromàtica:** Radiació electromagnètica de més d'una longitud d'ona.

Espectrofotòmetre

Per poder calcular valors d'absorbància i IPCE s'utilitza un espectrofotòmetre. En aquest cas, els laboratoris també solen utilitzar un aparell digital precís però, amb els recursos d'aquest projecte es va construir un senzill espectrofotòmetre amb materials molt comuns.



Il·lustració 6. Espectrofotòmetre de laboratori.

Font: LibreTexts Chemistry.

Breu descripció

L'espectrofotòmetre és un instrument que mesura, en una longitud d'ona determinada, la quantitat de fotons (la intensitat de la llum) després de passar per una solució de mostra. Segons el rang de longitud d'ona que mesuri l'espectrofotòmetre, aquest es pot classificar en dos tipus:

- ✓ Espectrofotòmetre UV-visible:
Mesura el rang ultraviolat (185 nm - 400 nm) i el rang visible (400 - 700 nm) de l'espectre de radiació electromagnètica.
- ✓ Espectrofotòmetre IR:
Mesura la llum sobre el rang infraroig (780 nm – 1 mm) de l'espectre de radiació electromagnètica.

Un espectrofotòmetre està conformat per dues parts:

✓ Espectròmetre:

Produeix llum de diferents longituds d'ones a partir d'una font lluminosa, i aquesta llum seguidament passa per un filtre que la converteix en una radiació monocromàtica eliminant les altres longituds d'ones.

✓ Fotòmetre:

Conté la mostra que absorbeix una part de la radiació monocromàtica i un detector de fotons.

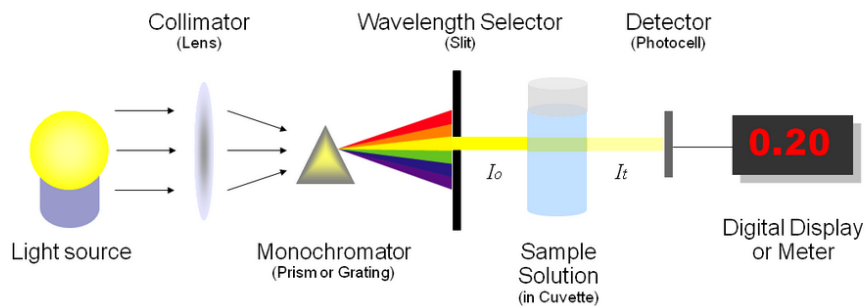


Figura 34. Esquema d'un espectrofotòmetre.

Font: LibreTexts Chemistry.

Construcció

L'espectrofotòmetre es va construir amb els següents materials:

- ✓ Papers de cel·lofana de colors (lila, verd, blau, groc, vermell, taronja).
- ✓ Fotodíode.
- ✓ Multímetre.
- ✓ Pines de cocodril.
- ✓ Làmpada LED (ADEO).

L'espectròmetre està format per la làmpada prèviament caracteritzada com a font lluminosa i per un paper de cel·lofana d'un color determinat que s'utilitza com a filtre monocromàtic de la llum. Per escollir una longitud d'ona s'utilitza el paper amb el color associat a aquella longitud d'ona.

El fotòmetre està format per la mostra i per un fotodíode connectat a un multímetre amb pines de cocodril emprat per captar la llum. Es va usar la funció intensitat del multímetre en totes les mesures.

Obtenció de les mesures

Absorbància

Per mesurar l'absorbància, es van col·locar els sensibilitzadors en pots de vidre petits transparents (5 cm x 5 cm x 8 cm) i es van situar a l'espai de la mostra de l'espectrofotòmetre un per un, per mesurar $I(\lambda)$ (intensitat de la llum que la mostra no és capaç d'absorbir així que es transmet) en diferents longituds d'ona.

A continuació, es va mesurar $I_0(\lambda)$ (intensitat de la llum transmesa per la font de llum en una determinada longitud d'ona) utilitzant l'espectròmetre sense cap mostra, només amb el fotodíode.

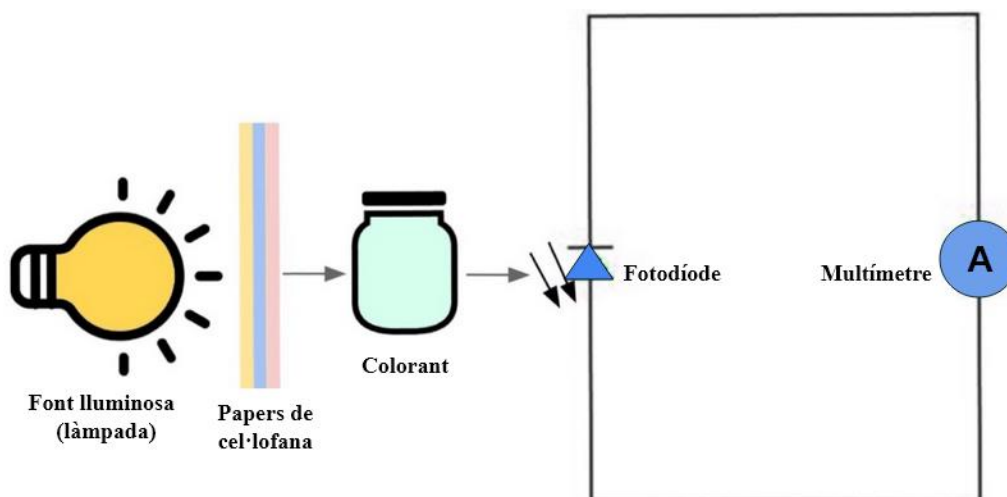


Figura 35. Senzill esquema del circuit emprat per mesurar els diferents valors de I_0 i I per cada longitud d'ona.

Font: Elaboració pròpia.

Finalment, es va procedir amb l'equació 26 per a cel·lular l'absorbància.

Coefficient d'extinció molar

Es va calcular a partir de la llei de Lambert-Beer (equació 29) simplement substituint els valors per a cada longitud d'ona:

1. l : 5 cm (longitud dels pots de vidre).
2. c : $50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (concentració de cadascuna de les dissolucions).
3. A : Valors calculats a l'apartat anterior.

Eficiència de conversió de fotons (IPCE)

El IPCE es va calcular per a diferents longituds d'ona substituint els valors a l'equació 30. Per calcular el J_{sc} en una determinada longitud d'ona es va tornar a fer ús de l'espectrofotòmetre. Es van col·locar les DSSCs en la posició de la mostra i es va retirar el fotodiode de l'espectrofotòmetre. Seguidament, es van connectar les cel·les al multímetre mitjançant pinces de cocodril. Els valors I_{sc} obtinguts de cada mostra a cada longitud d'ona es van dividir entre la superfície activa de la cel·la (4 cm^2) per convertir-los en valors J_{sc} . Per la variable P_{in} , es va prendre el valor mesurat anteriorment a cada longitud d'ona.

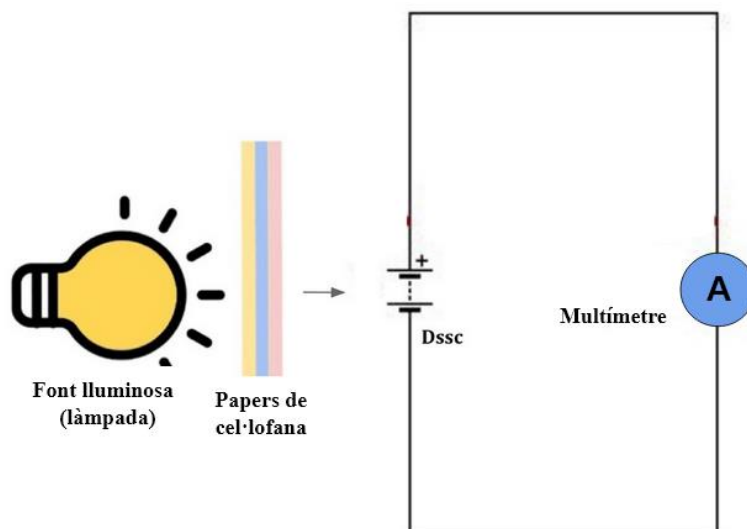


Figura 36. Senzill esquema del circuit emprat per mesurar els diferents valors de I_{sc} per cada longitud d'ona.

Font: Elaboració pròpia.

3.2.2 RESULTATS

La major part dels resultats obtinguts s'han expressat en forma de gràfiques i taules simples i concises amb la finalitat de poder-ne fer una discussió amb la màxima precisió i detall. L'ús de gràfiques també permet al lector comparar les quatre mostres estudiades de manera més visual i, a partir dels conceptes teòrics explicats en aquest projecte, poder entendre amb rigor els punts forts i els febles de les quatre DSSCs.

Els gràfics i les taules han estat dissenyats a partir del programa "Excel". Els fulls de càlcul amb tots els resultats extrets a partir de les equacions i les columnes d'Excel utilitzades per dissenyar els gràfics es poden consultar a l'Annex 4.

3.2.2.1 Anàlisi de resultats

La font lluminosa

En aquesta secció es calcula la potència de la llum incident de la font lluminosa. Així doncs, es donen tots els resultats que s'han anat calculant fins a arribar a aquest paràmetre, el qual és imprescindible per aconseguir els altres resultats.

Potència de la llum incident

Superfície activa del fotodíode

Aplicant la fórmula de la superfície d'un cos format per la suma d'una semiesfera i un cilindre, s'ha registrat una àrea de 1.37 cm^2 .

Densitat de corrent generada mesurada (i_{pd})

Amb el espectrofotòmetre s'ha mesurat una intensitat de 0.001 mA , la qual es va dividir entre la superfície per obtenir un i_{pd} de $7.276 \cdot 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$.

Densitat de potència òptica de la llum que il·lumina la superfície activa (p_{pd})

Calculant amb el i_{pd} obtingut a partir del fotodíode de 0.001 mA i suposant un R_{pd} de 1 mA/W s'ha registrat el mateix valor que en l'apartat anterior ($7.276 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2$).

Potència de la llum incident (P_{in})

Finalment, com que es va multiplicar pels 4 cm^2 del A_{DSSC} i es va tornar a dividir entre el mateix valor per fer quadrar les unitats finals, es va tornar a obtenir el mateix resultat. Així doncs, el P_{in} de l'experiment s'ha establert com $7.276 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2$.

Caracterització amb paràmetres elèctrics

Corbes de caracterització

Corbes I-V

A continuació es donen les corbes I-V de cada una de les DSSCs fabricades obtingudes a partir del mètode de resistència variable, amb resistències de: 1000Ω , 10000Ω , 47000Ω , 100000Ω , 470000Ω , 1000000Ω .

✓ Poma vermella

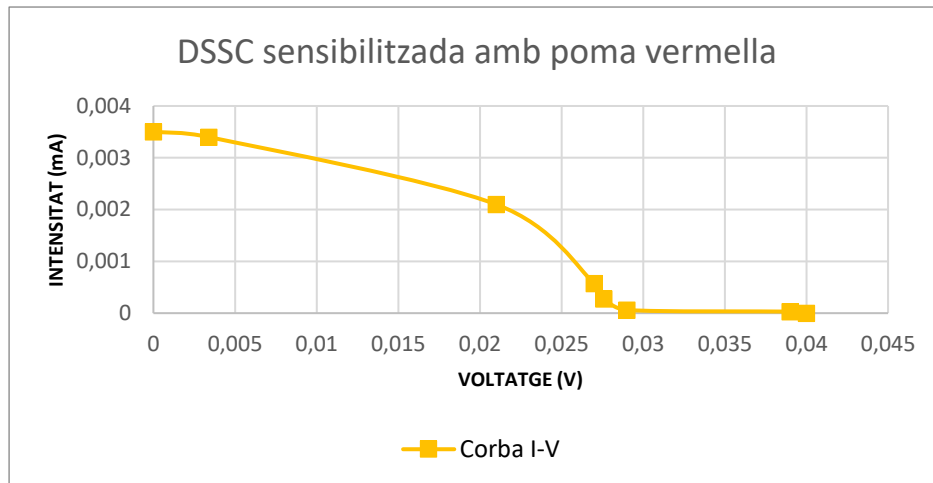


Figura 37. Corba de la intensitat (mesurada en mA) en funció del voltatge (mesurat en V) per diferents resistències de la DSSC confeccionada a partir de sensibilitzador de poma vermella.

Font: Elaboració pròpia.

✓ Residu de suc de poma

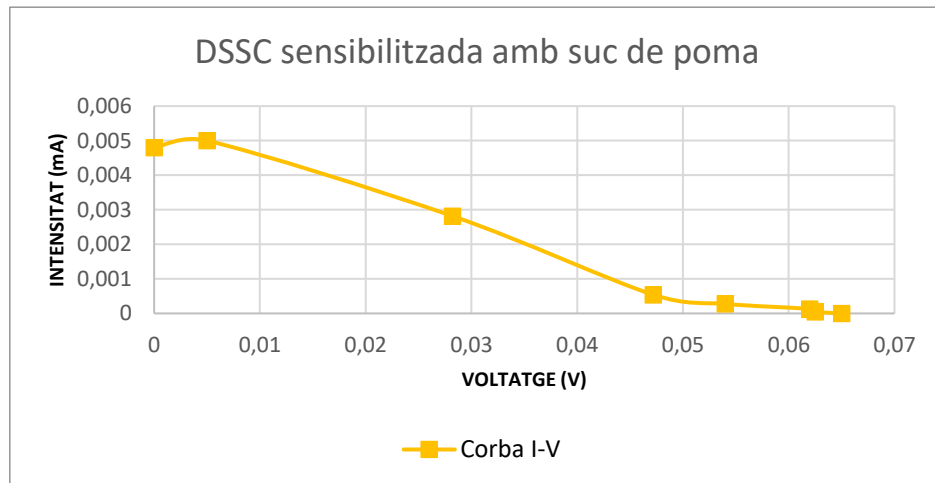


Figura 38. Corba de la intensitat (mesurada en mA) en funció del voltatge (mesurat en V) per diferents resistències de la DSSC confeccionada a partir de sensibilitzador de residu de suc de poma vermella.

Font: Elaboració pròpia.

✓ Poma verda

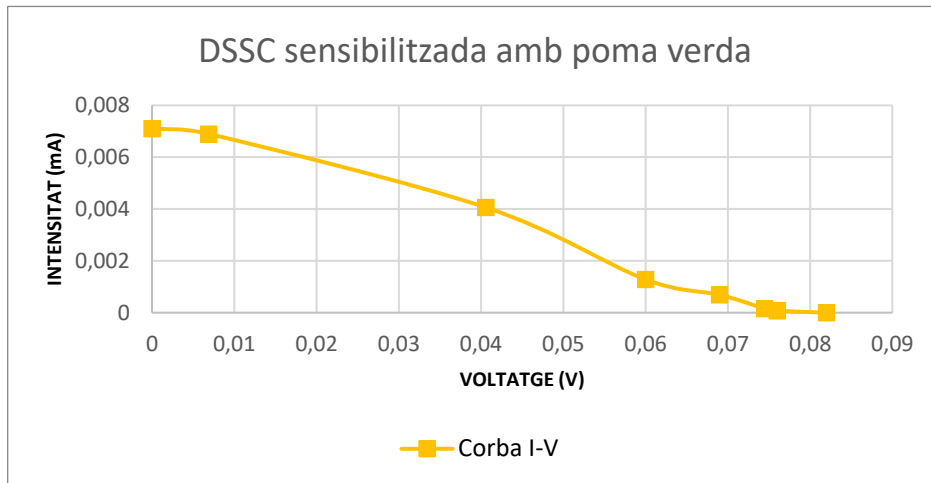


Figura 39. Corba de la intensitat (mesurada en mA) en funció del voltatge (mesurat en V) per diferents resistències de la DSSC confeccionada a partir de sensibilitzador de poma verda.

Font: Elaboració pròpia.

✓ Poma vermella podrida

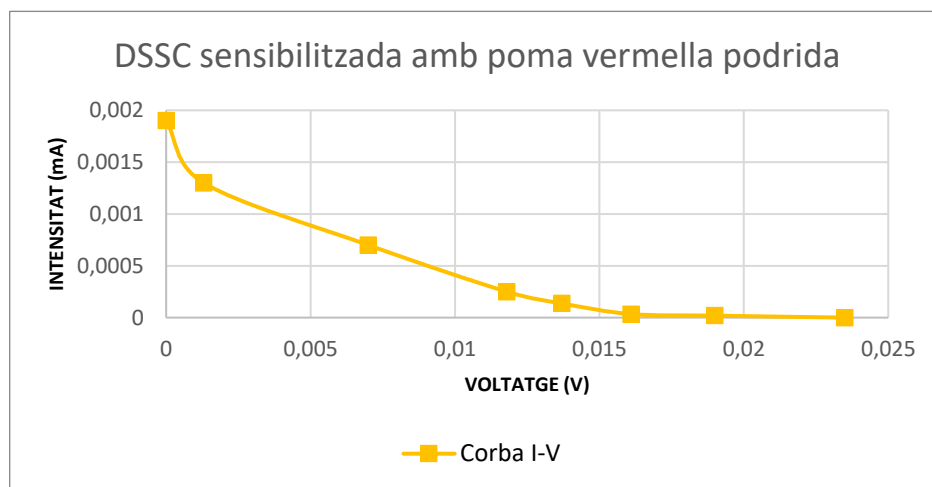


Figura 40. Corba de la intensitat (mesurada en mA) en funció del voltatge (mesurat en V) per diferents resistències de la DSSC confeccionada a partir de sensibilitzador de poma vermella podrida.

Font: Elaboració pròpia.

En aquests quatre gràfics es pot observar, per una banda, com la corba de residu de suc de poma i especialment la de poma verda destaquen respecte a les altres dues per tenir

valors molt més elevats. Això és un clar indicatiu d'un millor PCE. D'altra banda, respecte a la forma, també es pot apreciar com la corba de la DSSC de poma vermella és notablement més quadrada que la resta. Aquesta observació és més important del que pot semblar, donat que és un indicatiu d'un bon FF.

Corbes J-V i Corbes P-V

A partir de la informació dels quatre gràfics mostrats a continuació i els procediments indicats anteriorment, s'han aconseguit les corbes J-V i P-V.

✓ Poma vermella

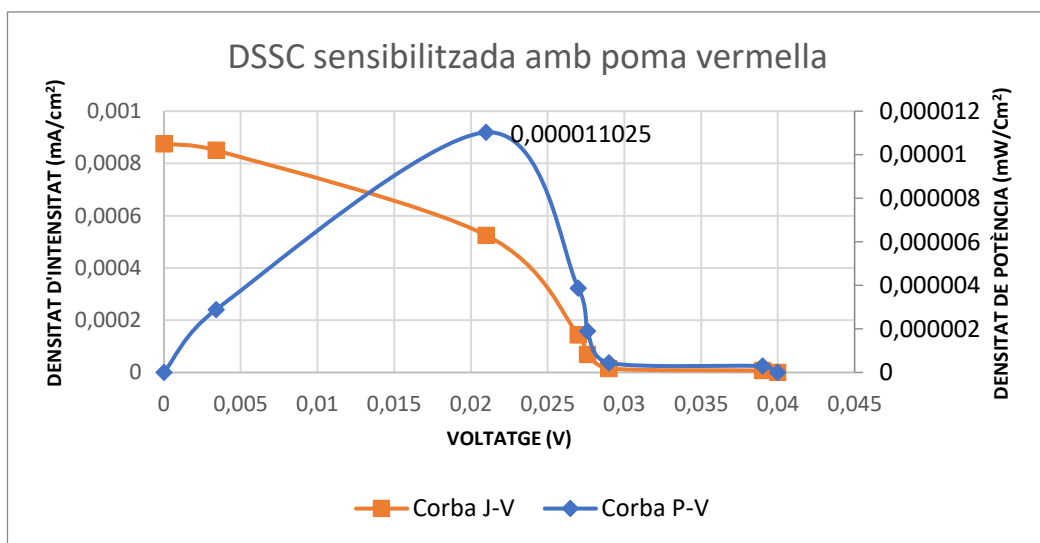


Figura 41. Corba de la densitat d'intensitat (mesurada en mA/cm²) i la densitat de potència (mesurada en mW/cm²) en funció del voltatge (mesurat en V) de la DSSC confeccionada a partir de sensibilitzador de poma vermella.

Font: Elaboració pròpia.

✓ Residu de suc de poma

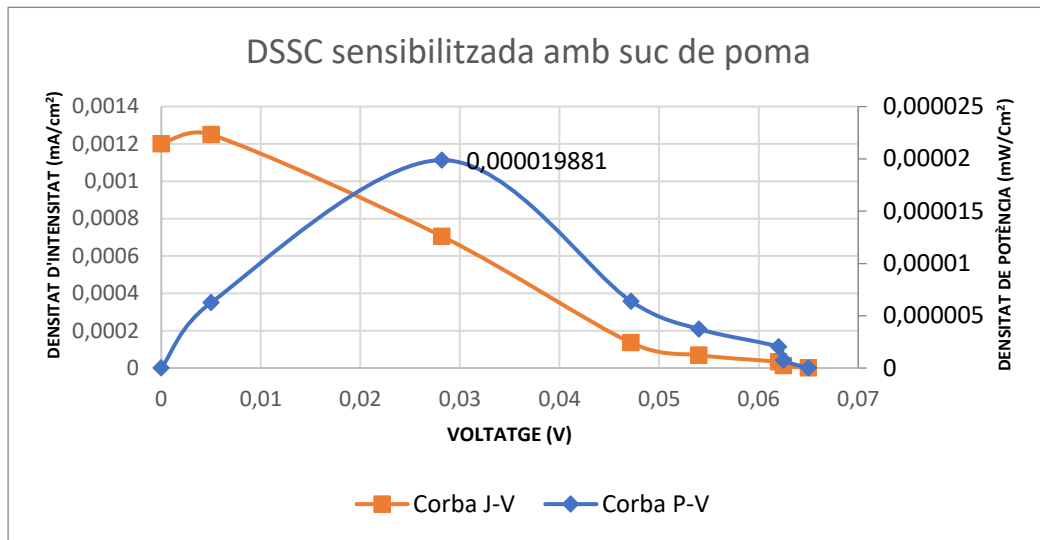


Figura 42. Corba de la densitat d'intensitat (mesurada en mA/cm²) i la densitat de potència (mesurada en mW/cm²) en funció del voltatge (mesurat en V) de la DSSC confeccionada a partir de sensibilitzador de residu de suc de poma vermella.

Font: Elaboració pròpia.

✓ Poma verda

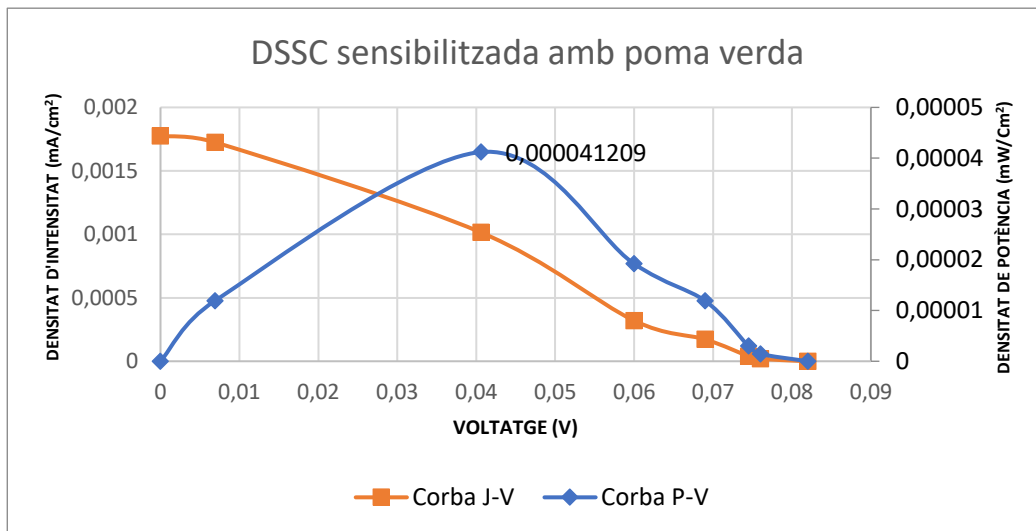


Figura 43. Corba de la densitat d'intensitat (mesurada en mA/cm²) i la densitat de potència (mesurada en mW/cm²) en funció del voltatge (mesurat en V) de la DSSC confeccionada a partir de sensibilitzador de poma verda.

Font: Elaboració pròpia.

✓ Poma vermella podrida

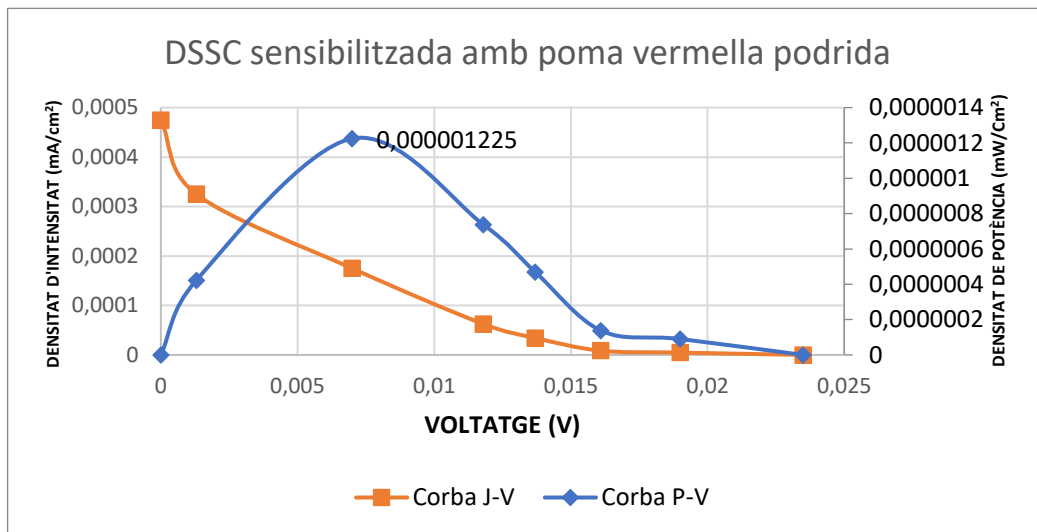


Figura 44. Corba de la densitat d'intensitat (mesurada en mA/cm²) i la densitat de potència (mesurada en mW/cm²) en funció del voltatge (mesurat en V) de la DSSC confeccionada a partir de sensibilitzador de poma vermella podrida.

Font: Elaboració pròpia.

Pel que fa a les corbes J-V, com que es divideixen tots els resultats de la corba I-V (4 cm²), es mantenen les proporcions i, conseqüentment, no es poden extreure més observacions. Tot i això, la verdadera utilitat d'aquesta corba és la de confeccionar la corba P-V, la qual sí que és possible d'analitzar.

Primer de tot es pot observar que les corbes P-V de la poma verda i el residu de suc de poma són considerablement més estables que les altres dues, ja que aquestes tenen una gran caiguda de potència en els valors de voltatge més elevats. Pel que fa a la potència màxima (P_{\max}), que és la informació més important que proporciona la corba. En les quatre corbes s'ha registrat el màxim valor de potència en el tercer punt començant per l'esquerra i en un voltatge considerablement semblant (entre 0,007 V i 0,0406 V). El P_{\max} més alt registrat és el de la DSSC de poma verda, 0,000041209 mW i el més baix el de la poma vermella podrida, 0,000001225 mW.

Paràmetres elèctrics importants

Els paràmetres elèctrics mesurats i calculats durant tot l'experiment s'han registrat i resumit a la Taula 3 per poder-ne facilitar la seva comparació, anàlisi i discussió. En conseqüència, aquesta taula actua com a resum final i descriu els rendiments fotoelectroquímics de les 4 DSSCs.

Mostra	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	P_{max} (μW/cm ²)	P_{theo} (μW/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
Poma vermella	0.0040	0.0010	0.0315	0.0110	0.0315	35.000	0.0015
Residu de suc de poma	0.0048	0.0012	0.0625	0.0199	0.0750	26.530	0.0027
Poma verda	0.0071	0.0018	0.0820	0.0412	0.1476	27.910	0.0057
Poma vermella podrida	0.0019	0.0005	0.0235	0.0012	0.0118	10.170	0.0002

Taula 3. Recull final de tots els resultats fotoelectroquímics obtinguts.

Font: Elaboració pròpia.

En tots els paràmetres, excepte el FF, la DSSC de poma verda ha aconseguit els millors resultats amb una diferència notable diferència els millors resultats, seguida de la de residu de suc de poma, la de poma vermella i finalment la de poma vermella podrida. Especialment, cal ressaltar l'eficiència total de 0.0057% de la poma verda, el valor que l'acredita definitivament com la millor cel·la solar d'aquest projecte. D'altra banda, pel que fa al FF, sorprenentment la DSSC de poma vermella ha obtingut el millor resultat (35%).

Així doncs, el PCE ha oscil·lat des del 0.0002% al 0.0057%, el factor d'ompliment des del 10.17% al 35% i finalment el J_{sc} i el V_{oc} han variat entre el 0.0005 mA/cm² i el 0.0018 mA/cm² i el 0.0235 V i el 0.0820 V, respectivament.

Caracterització amb tècniques òptiques d'anàlisi

En aquest apartat, es presenten tots els resultats registrats que fan referència a la llum i no al corrent elèctric. Aquests resultats s'han registrat tots a partir d'un espectrofotòmetre i, per tant, tots els valors estan expressats en funció d'una longitud d'ona formant un gràfic.

Paràmetres dels sensibilitzadors

Absorbància

Per aconseguir mesurar l'absorbància, la longitud d'ona s'ha variat amb els papers de cel·lofana, la llum s'ha captat i transformat en corrent elèctric a través d'un fotodíode i finalment s'ha mesurat el corrent elèctric a través d'un multímetre. Al tractar-se d'una relació, l'absorbància dels sensibilitzadors s'ha multiplicat per cent per expressar-la en forma de percentatge.

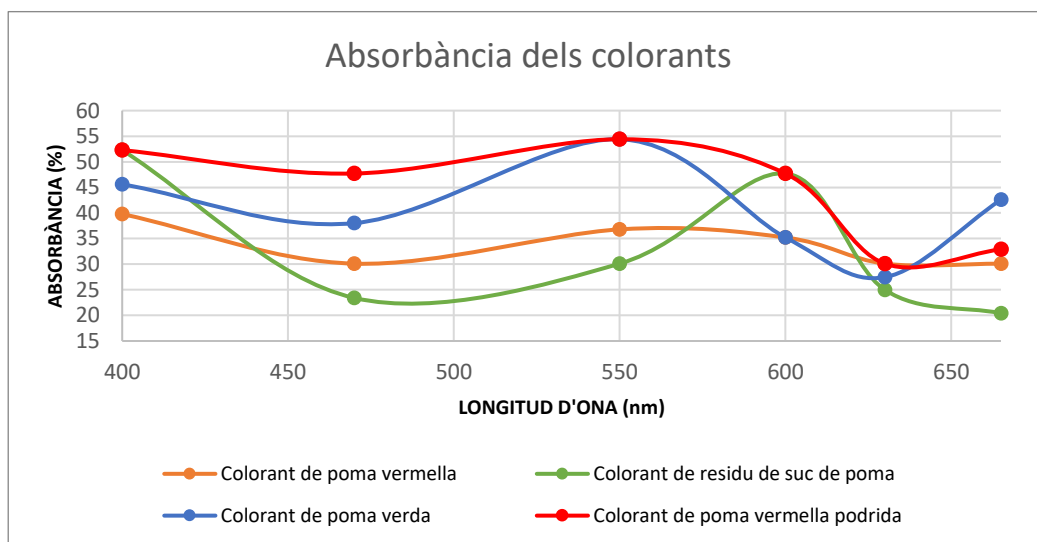


Figura 45. Absorbància (%) dels quatre colorants estudiats en funció de la longitud d'ona (mesurada en nm), concretament a l'interval de l'espectre visible (400 nm – 665 nm).

Font: Elaboració pròpia.

Es poden observar pics d'absorció amplis i notables a la regió visible entre 470 nm - 630 nm per als colorants de poma vermella, verda i podrida, mentre que els residus de poma mostren un pic d'absorció més desplaçat cap a la regió del vermell. El colorant de poma vermella podrida ha mostrat una absorbància relativament més alta en comparació als

altres sensibilitzadors, amb una longitud d'ona d'absorció màxima a 550 nm (54.41%). Aquesta dada és molt curiosa ja que la DSSC de residu de suc de poma ha demostrat tenir la pitjor eficiència total de totes. Finalment, també es pot notar que a diferència dels paràmetres elèctrics, la poma vermella ha donat un millor espectre d'absorbància que el residu de suc de poma.

Coeficient d'extinció molar

El coeficient d'extinció molar s'ha calculat a partir dels valors d'absorbància i aplicant la Llei de Beer-Lambert.

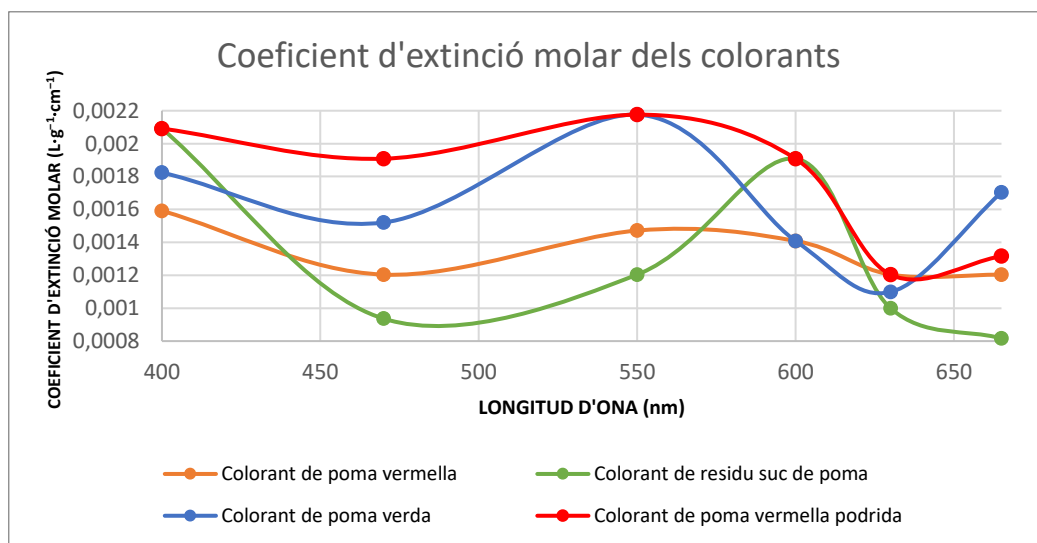


Figura 46. Coeficient d'extinció molar dels quatre colorants estudiants ($L \cdot g^{-1} \cdot cm^{-1}$) en funció de la longitud d'ona (mesurada en nm), concretament a l'interval de l'espectre visible (400 nm – 665 nm).

Font: Elaboració pròpia.

Pel que fa al coeficient d'extinció molar, com que s'han dividit tots els valors d'absorbància entre les mateixes dades, el gràfic es manté igual i simplement s'observa que tots els colorants absorbeixen llum amb més força a la regió visible entre 470 nm - 630 nm pel que fa als colorants de poma vermella, verda i podrida, i entre 550 nm – 630 nm pel que fa als residus de poma.

Paràmetres de les DSSCs

Eficiència de conversió de fotons incidents (IPCE)

Aquest paràmetre s'ha obtingut amb el mateix procediment que els anteriors, però utilitzant les DSSCs per calcular els J_{sc} per cada longitud d'ona i seguidament s'ha aplicat l'equació del IPCE. En aquest cas els resultats també s'han expressat com a percentatges.

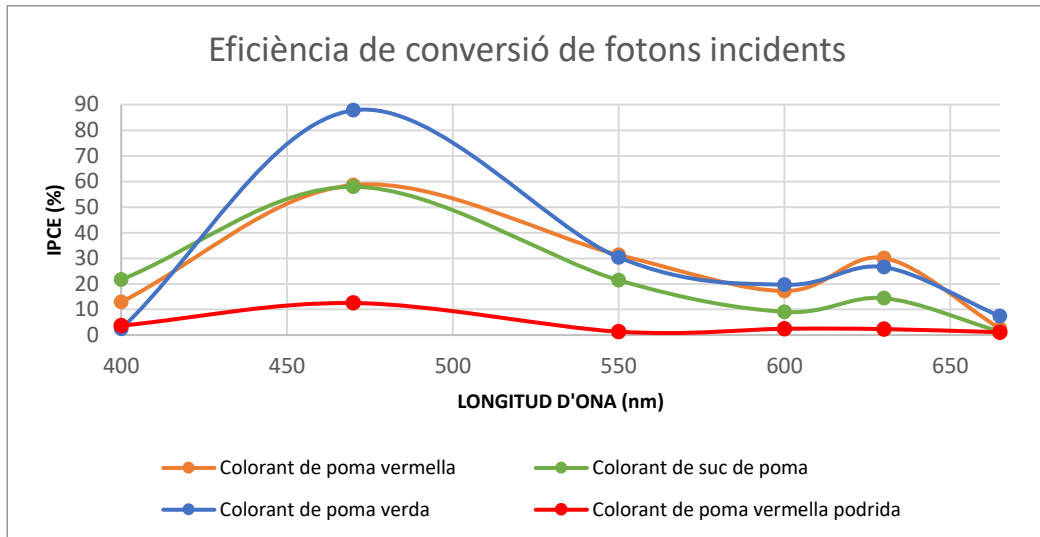


Figura 47. Eficiència de conversió de fotons incidents dels quatre colorants (%) estudiats en funció de la longitud d'ona (mesurada en nm), concretament a l'interval de l'espectre visible (400 nm – 665 nm).

Font: Elaboració pròpia.

Es pot apreciar com els quatre espectres de IPCE tenen una forma similar en els quatre es pot observar un pic més significatiu de IPCE a la regió visible entre 400-550 nm que correspon a les regions violeta, blava i verda de l'espectre visible. Addicionalment, en tots els casos, el percentatge màxim aconseguït es va localitzar als 470 nm.

La DSSC tenyida de colorant de poma verda ha aconseguït el valor IPCE% més alt, del 87.81%.

Finalment, els resultats obtinguts coincideixen perfectament amb les mesures fotoelectroquímiques preses a partir dels paràmetres elèctrics. Els millors resultats són per la poma verda seguida del residu de suc de poma, la poma vermella i finalment la poma vermella podrida. Tot i això, hi ha una petita variació a la regió entre els 440 nm – 550 nm on la poma vermella mostra millors resultats que el residu de poma vermella.

3.2.3 DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

Primer de tot quant als **paràmetres elèctrics** cal recalcar que el DSSC tenyit de poma verda ha assolit els millors resultats en pràcticament totes les mesures, proporcionant: un V_{oc} de 0.082 V, un J_{sc} de 0.0018 mA/cm², un P_{max} de 0.0412 (μW/cm²), un P_{theo} de 0.1476 (μW/cm²), un FF del 27.91% i un PCE de 0.0057%. El rendiment d'aquesta DSSC ha sigut tan satisfactori en comparació a les altres que, fins i tot, ha duplicat el segon millor PCE (0.0057% contra 0.0027%). En definitiva, la poma verda ha demostrat ser la millor en aprofitar la llum o els fotons i convertir-los en electrons o corrent elèctric i, per tant, la millor opció en la construcció de DSSCs fetes de *Malus domestica*. Aquest resultat no quadra amb les prediccions proposades anteriorment, ja que com més vermell sigui el fruit més antocianina té i, per tant, més capacitat té d'absorbir la llum (*BBC NEWS, 2019*). Aquesta contradicció es pot donar principalment per dos motius:

- ✓ Per un costat la varietat de la poma verda escollida, la Granny Smith, en podria ser la causa. La biologia no és una ciència perfectament exacta i una excepció d'aquest tipus es pot donar perfectament. De fet, el rang d'absorció de l'antocianina és molt ampli (450 nm - 580 nm) i engloba molts colors, com a resultat l'antocianina es pot trobar en molts elements: tiges, flors, fruits... Addicionalment, el pic de l'antocianina es troba als 520 nm (*Jun et al, 2021*), coincidint amb la regió del verd de l'espectre visible. Per tot això la varietat Granny Smith pot ser capaç d'absorbir millor l'antocianina que altres varietats vermelles.
- ✓ Un error en la part experimental com a conseqüència de no tenir a l'abast material de laboratori més complex podria ser l'altre motiu.

Pel que fa a la cel·la de residu de suc de poma, ha mostrat característiques fotoelectroquímiques una mica més elevades que la poma vermella (V_{oc} : 0.0625V comparat a 0.0315V, J_{sc} : 0.0012 mA/cm² comparat a 0.0010 mA/cm²,) (η : 0.0027% comparat a 0.0015%). A més de demostrar que és capaç d'aprofitar més la llum per convertir-la en corrent elèctric amb un PCE de 0.0027% i que és capaç de desenvolupar una potència molt més gran (P_{max} :0.0199 (μW/cm²)), també ha demostrat tenir un major potencial amb una potència màxima teòrica de 0.0750 (μW/cm²). Aquests resultats semblen indicar que la quantitat més gran d'antocianina que té la poma es troba concentrada en les parts que queden una vegada fet el suc de poma. Així, si s'agafen dues

mostres iguals, una de residu de suc de poma i l'altre de la pela, la mostra de residu de suc de poma tindrà més concentració d'antocianina i proporcionarà millors resultats.

Finalment, la DSSC de poma tenyida podrida ha mostrat el pitjor rendiment en totes les mesures anteriors: una tensió de circuit obert de 0.0235 V, una densitat de corrent de curtcircuit de 0.0005 mA/cm², un P_{\max} de 0.0012 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$), un P_{theo} de 0.0118 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$), un FF del 10.17% i una eficiència del 0.0002%.

En relació al **factor d'ompliment**, simplement destacar que a diferència de les altres mesures, curiosament el de la poma vermella supera al del residu de suc de poma vermella (35% en front el 26.53%). Això indica que malgrat que la DSSC de poma vermella necessita menys tensió per mantenir les càrregues separades i fer ús d'electrons gràcies al seu alt FF, la DSSC de residus té més potencial per extreure antocianina. Això es deu al fet que el FF indica com la DSSC està de lluny d'assolir el seu màxim potencial. Un alt FF qualifica la DSSC com a dispositiu de bona qualitat i proper a funcionar al seu màxim potencial. En contrapartida, un baix FF indica que la DSSC té molt més potencial a llarg termini sempre i quan aquest s'aconsegueixi desbloquejar.

Les mesures fotoelectroquímiques observades són significativament inferiors a les d'altres estudis, els DSSC dels quals, es van sensibilitzar mitjançant sensibilitzadors sintètics com els sensibilitzadors basats en ruteni inorgànic (Ru)⁷⁸. Tot i això, aquests resultats són més normals amb colorants naturals, ja que amb aquests ni tan sols s'ha superat l'eficiència total record del 2 (*Kusumawati et al., 2021*).

Quant a l'**absorbància**, sobretot cal fer especial èmfasi en la DSSC de poma vermella podrida. Aquesta DSSC ha registrat uns resultats excel·lents, ja que s'observa un pic d'absorció màxim als 550 nm de 54.41%. Aquests resultats es troben relativament per damunt de la resta de les altres mostres i semblen contradir els valors nefastos que aquesta DSSC ha obtingut en les anteriors mesures. Una explicació raonable podria ser que, realment, la reacció química de putrefacció sí que augmenta la capacitat del fruit d'absorbir la llum, però a l'entrar en contacte amb els altres elements de la DSSC, algun agent químic, que no era present abans que la poma es podrís, pot fer malbé algun dels components, ja sigui per corrosió, degradació, etc. D'aquesta manera, malgrat que el

⁷⁸ Exemple d'estudi de sensibilitzadors sintètics: Qin, Yuancheng & Peng, Qiang. (2012). Ruthenium Sensitizers and Their Applications in Dye-Sensitized Solar Cells. *International Journal of Photoenergy*. 2012. 10.1155/2012/291579.

sensibilitzador mostra uns òptims valors d'absorció, el PCE i els altres paràmetres elèctrics mesurats en la DSSC són substancialment baixos.

En referència al residu de suc de poma i la poma vermella, encara que aquesta última ha mostrat millors valors en la major part de l'espectre, la DSSC de residu de suc de poma ha mostrat uns pics màxims molt més alts als 400 nm (40%) i als 600 nm (47.71%). D'aquesta manera, els espectres pràcticament es compensen, donant sentit als resultats força similars i equilibrats que han mostrat les dues DSSC, on mentre una assolía un millor FF l'altra un millor PCE.

A causa de tenir la mateixa gràfica, del **coeficient d'extinció molar**, només es pot extreure que quatre colorants absorbeixen més fortament la llum a la regió dels 450 nm - 625 nm (blau, verd, groc, taronja).

Finalment, el **IPCE** ha conservat la mateixa jerarquia establerta pels resultats en els paràmetres elèctrics (excepte el FF): poma verda > residu de suc de poma vermella > poma vermella > poma vermella podrida; corroborant així els punts anteriors. Simplement, és necessari afegir que els quatre espectres presenten una similitud satisfactòria amb l'espectre d'absorció de l'antocianina, amb una zona d'absorció màxima entre els 450 nm i els 580 nm.

En definitiva, s'ha arribat a la conclusió que tant el color de la poma com la seva maduració, afecten el rendiment de la DSSC i, per tant, són dues variables que s'han de tenir en compte.

3.3 Aplicació de les DSSCs basades en residu de suc de poma a la província de Girona

3.3.1 METODOLOGIA

En aquesta secció es portarà a terme l'aplicació del prototip de DSSC construït i caracteritzat en les seccions anteriors. Per fer-ho es dissenyarà i s'estudiarà un sistema de reaprofitament del residu de suc de poma per l'elaboració d'energia elèctrica mitjançant DSSCs a la província de Girona.

El primer pas consistirà en fer una recerca de dades que ens aportin informació necessària. Aquestes dades seran:

- ✓ La producció de residu de suc de poma anual de la província de Girona.
- ✓ La irradiància (densitat de potència radiant) de la província de Girona.
- ✓ El consum energètic anual de la província de Girona.

S'empraran diferents mètodes per aconseguir aquestes dades:

- ✓ La consulta en bases de dades
- ✓ Entrevista a un expert.
- ✓ Contacte amb entitats especialitzades.

Finalment, es realitzarà un experiment per conèixer el volum de sensibilitzador consumit per cm^2 .

3.3.1.1 Conceptes previs

Abans de procedir amb l'estudi del sistema. És rellevant conèixer els avantatges de l'energia solar per sobre de les altres energies renovables. A part d'això, com a les altres dues seccions cal detallar els materials utilitzats en el procediment experimental.

L'energia solar

Breu descripció

L'energia del sol és l'origen de tota l'energia de la terra i, per tant, de la vida en aquesta. Pràcticament, totes les fonts d'energia són conseqüència del sol:

✓ Energia hidroelèctrica:

Com que el sol escalfa l'aigua, l'evapora i seguidament amb la pluja emplena les preses.

✓ Energia eòlica:

Quan el sol escalfa parts de l'atmosfera provoca que corrents d'aire es moguin creant el vent.

✓ Combustibles fòssils:

Existeixen segut a la descomposició de plantes de fa milions d'anys que emmagatzemaven energia obtinguda de la fotosíntesi natural en forma d'enllaços de carboni.

Potencial

Constantment el sol subministra al nostre planeta una potència de 174000 TW que es redueixen fins a 120000 TW nets degut a l'absorció i la dispersió produïda a l'atmosfera (*Jean et al., 2015*). Aquesta xifra és quatre mil vegades més gran a la demanda energètica prevista per l'any 2050 (tant elèctrica com de combustibles), entre 26.4 i 32.9 TW i deu mil vegades més gran que el consum d'energia actual.

Actualment, la humanitat només és capaç d'aprofitar 15 TW d'aquesta potència.

Avantatges

L'energia solar destaca per sobre de les altres fonts renovables en els següents aspectes:

1. Abundant:

Durant els següents milions d'anys el sol és inesgotable i això el converteix en un recurs cent per cent sostenible (exceptuant el cost de materials) (*Jean et al., 2015*).

2. Equitatiu:

Malgrat que la irradiància del sol varia segons la ubicació geogràfica, aquesta variació és molt lleugera. Al haver-hi sol per tot, l'energia solar és un recurs repartit amb molta igualtat (*JoVE Science Education Database, 2022*).

3. Respectuosa amb el medi ambient:

Permetrà reduir el consum de combustibles fòssils, la quantitat de gasos tòxics alliberats a l'atmosfera i al mateix temps l'efecte hivernacle (*From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència, 2021*).

Degut a aquests avantatges, tot i que encara no pugui competir econòmicament amb els combustibles fòssils, sense cap dubte, l'energia solar jugarà un paper essencial en el mix energètic del futur (Hupp *et al.*, 2008).

Materials

S'han utilitzat els següents materials en el procediment experimental:

- ✓ Sensibilitzador de residu de suc de poma.
- ✓ Tub d'assaig.
- ✓ Suport de tubs d'assaig.
- ✓ Placa de petri.
- ✓ 8 vidres FTO coberts amb TiO_2 en 4 cm^2 d'una de les cares (com anteriorment s'ha fet).
- ✓ Pipeta aforada.
- ✓ Pera de goma.
- ✓ Pines.

Aclariment

En aquesta secció no es contemplen possibles complicacions com ara la degradació de les DSSCs per temperatura o massa llum. Aquests desavantatges es tindran en compte en la quarta secció.

3.3.1.2 Procediment

Irradiància (densitat de potència radiant)

Variables

Tot i que per mesurar cel·les solars s'utilitza una irradiància de 1000 W/m^2 per simular el sol, com s'ha comentat abans, aquesta només és vàlida en alguns indrets durant poques hores del migdia sense presència de núvols. A causa d'aquests requisits, no es pot usar aquesta constant a la lleugera. Si s'utilitza per simular la producció d'una cel·la solar en un any, per exemple, els resultats no seran gens fiables, ja que no es tindrien en compte ni tan sols les hores de nit, quan no hi ha sol.

Per tots aquests motius, primer cal entendre les variables que alteren la irradiància:

✓ Latitud:

En funció de la latitud o en altres paraules la situació geogràfica, la irradiància serà més alta o més baixa.

✓ Temps:

Segons el mes i l'hora, la irradiància varia molt. Des de passar per exemple de 0 W/m² a la nit a 1000 W/m² al migdia del mes d'agost.

Càlcul de la potència incident (irradiància)

Simulador d'irradiància

Alguns llocs web com per exemple “*pv education*⁷⁹”, tenen calculadores que simulen la irradiància. Introduint el dia de l'any i la latitud, elaboren una gràfica amb forma semblant a la campana de gauss que dona la irradiància en funció de l'hora.

Malgrat la seva utilitat, aquests gràfics teòrics no s'utilitzen en el dimensionament de sistemes a causa dels següents motius:

1. No inclouen efectes meteorològics locals.
2. No tenen en compte el canvi climàtic i l'augment de la irradiància de cada any que aquest provoca.

Bases de dades

En aquest projecte s'ha extret la irradiància de la base de dades “*Photovoltaic Geographical Information System*⁸⁰”. Aquesta eina proporciona informació sobre diverses dades pel desenvolupament de cel·les fotovoltaïques en qualsevol indret del món. Entre elles proporciona la irradiació mitjana registrada a cada mes des de l'any 2005 a l'any 2020.

Cal diferenciar la irradiació de la irradiància. Mentre la irradiància és una magnitud de potència mesurada en watts per metre quadrat (W/m²), la irradiació és una magnitud d'energia en kilowatts hora per metre quadrat (kWh/m²).

Així doncs, es van introduir les coordenades de Girona i escollir les dades d'irradiació mitjana de cada mes de l'any 2020, el més recent possible. Seguidament, es va passar

⁷⁹ Simulador pv education:

<https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/calculation-of-solar-insolation>

⁸⁰ Base de dades:

https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

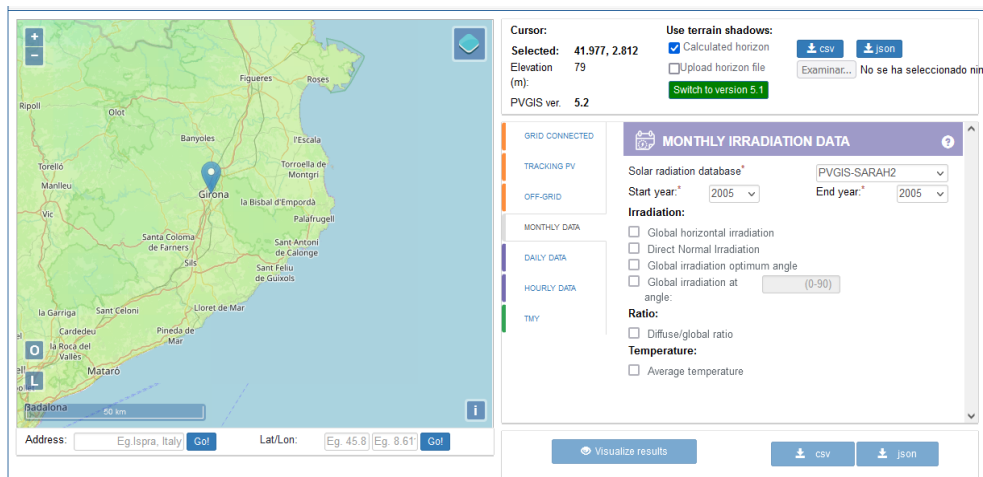
l'energia de cada un dels mesos a unitats del Sistema Internacional i es va dividir entre el temps segons l'equació 31 per obtenir la irradiància. Els càlculs es poden consultar a l'Annex 9.

$$P = \frac{E}{t}$$

Equació 31. Definició de potència.

On:

- P: Potència.
- E: Energia.
- t: Temps.



Il·lustració 7. Captura de pantalla de la pàgina web Photovoltaic Geographical Information System.

Font: Elaboració pròpia.

Càlcul de la potència màxima de la cel·la

Com és evident, el fet que la potència incident no serà la d'una làmpada sinó la del sol, la potència màxima que proporcionarà la cel·la no serà la mateixa que en la secció anterior del projecte.

Al conèixer l'eficiència total de la cel·la i saber que es manté constant, calcular-ne la potència màxima es va poder fer amb un simple càlcul. Es va introduir a l'equació 24 del PCE la potència incident trobada a l'apartat anterior per a cadascun dels mesos i es va

aïllar P_{\max} . Així es va trobar la potència proporcionada per la cel·la per unitat de superfície per a cadascun dels dotze mesos de l'any.

Residu de suc de poma produït a Girona

Mooma

Descripció

Mooma és una empresa familiar (de tercera generació) del Baix Empordà dedicada al cultiu i a la comercialització de la poma. A més a més, Mooma és la creadora de la primera sidra catalana i l'única productora de suc de poma en tota la província de Girona. Aquesta última dada ha facilitat molt el desenvolupament del treball. Els tipus de poma utilitzats en la producció de suc són:

- ✓ Gala
- ✓ Pink Rosée
- ✓ Fuji
- ✓ Granny Smith

Mooma utilitza les pomes km 0 produïdes per ells mateixos per l'elaboració de suc.

La filosofia de l'empresa consisteix a unir valors com la salut, la sostenibilitat i la tradició amb la fructicultura de precisió aplicant els últims avenços tecnològics i sistemes de producció sostenibles i eco-responsables. El seu punt de partida és el d'adaptar als arbres a les màquines, donat que és més simple que no fent-ho a la inversa.

Contacte

Al ser l'única empresa productora de residu de suc de poma es va contactar amb Llorenç Frigola director gerent de Mooma i enginyer agrònom via correu electrònic. Primer es va concertar una trucada i seguidament es van visitar les instal·lacions per fer-hi una visita guiada, un tast i realitzar una entrevista a en Llorenç. Aquesta entrevista pretén completar el treball i aprendre més sobre el funcionament i la disposició de l'empresa a participar en una proposta com la que es planteja en aquesta secció. A part d'això, es van consultar dades de vital importància pel desenvolupament del treball com per exemple la quantitat de residus de suc de poma produïda en un any o les pomes invertides a fer suc.

L'entrevista es pot consultar a l'Annex 6 i les fotos de la visita a Mooma a l'Annex 5.

Ús actual del residu de suc de poma

Actualment Mooma utilitza aquest residu en:

- ✓ Empreses farmacèutiques i cosmètiques, que l'utilitzen en l'elaboració de perfums i medicaments gràcies al seu component antioxidant.
- ✓ Per l'elaboració de galetes amb gust de poma.
- ✓ D'adob per les pomes.

D'altra banda, al pòsit del suc encara no li donen cap ús (*Xerrada a la sidreria Mooma, 2022*).

Volum de sensibilitzador consumit per unitat de superfície

El volum de sensibilitzador consumit per unitat de superfície es va trobar mitjançant un procés experimental (es poden consultar els materials i les imatges d'aquest a l'Annex 7).

1. Es va mesurar 30 mL del colorant de residu de suc de poma amb l'ajuda d'una pipeta aforada i una pera de plàstic.
2. Es van introduir els 30 mL del colorant en un tub d'assaig.
3. Es va submergir amb l'ajuda de pinces els vuit vidres FTO coberts de TiO_2 .
4. Es va guardar el tub d'assaig al suport de tubs d'assaig i es va cobrir el pot amb una placa de petri, per enfosquir el colorant i evitar els efectes de l'ambient.
5. Es va guardar el suport de tubs d'assaig a la nevera durant 24 h (tal com s'ha fet a la primera secció).
6. Es va retirar el tub d'assaig de la nevera i els vuit vidres FTO de dintre amb pinces.
7. Es va mesurar el volum, es va aplicar la fórmula 32 per conèixer el volum consumit per les 8 cel·les i es va dividir pels cm^2 de vidres FTO coberts amb TiO_2 .

$$v_{\text{consumit}} = v_0 - v$$

Equació 32. Equació per mesurar la massa de les mostres.

On:

- v: Volum final.

- v_0 : Volum inicial.

- v_{consumit} : Volum consumit.

Energia total generada en un any

Finalment es van ajuntar totes les dades recollides prèviament en 12 factors de conversió, un de particular per cada mes, ja que a cada mes es generaria una energia diferent segons el sol que hi hagués. A més, cada mes té diferents dies (31, 30 o 28 dies) i també és necessari tenir-ho en compte.

Consum d'energia de la província de Girona

Institut Català d'Energia (ICAEN)

Per conèixer la demanda energètica de la província i descobrir si el residu de suc de poma sobrant de la província la satisfaria, es va contactar amb l'Institut Català d'Energia mitjançant una sol·licitud d'ajuda a la seva pàgina oficial. Berenice Abuin Ibañez de la divisió de planificació energètica, va proporcionar les dades del consum d'energia elèctrica del 2020 per sectors en format de full de càlcul. El full de càlcul es pot consultar a l'Annex 8.

Base de dades

Malauradament, com que un municipi de la província estava afectat per secret estadístic, Berenice no va poder proporcionar el total del sector terciari. Per superar aquesta dificultat es va optar per consultar la base de dades obertes del ICAEN i sumar els consums energètics del 2020 del sector terciari de tots els municipis de la província de Girona (obviant l'afectat per secret estadístic).

3.3.2 RESULTATS

Igual que en la secció anterior, l'exposició dels resultats s'ha basat en l'ús de gràfiques elaborades amb "Excel" per a poder resumir i ordenar la gran quantitat de dades amb les quals s'ha treballat. En aquest cas s'ha optat principalment pels gràfics de barres per la facilitat que brinden al l'hora de comparar resultats.

Els fulls de càlcul amb totes les taules de valors i els factors de conversió usats es poden consultar a l'Annex 9.

3.3.2.1 Anàlisi de resultats

Irradiància de Girona en un any

Primerament es donen els resultats de la irradiància de Girona per poder conèixer la P_{in} que la DSSC rebria i així, posteriorment, poder calcular el P_{max} que la DSSC produiria.

Irradiació

Introduint les coordenades de Girona a la base de dades “*Photovoltaic Geographical Information System*” i filtrant els resultats als mesos de l’any 2020, s’ha aconseguit la següent gràfica:

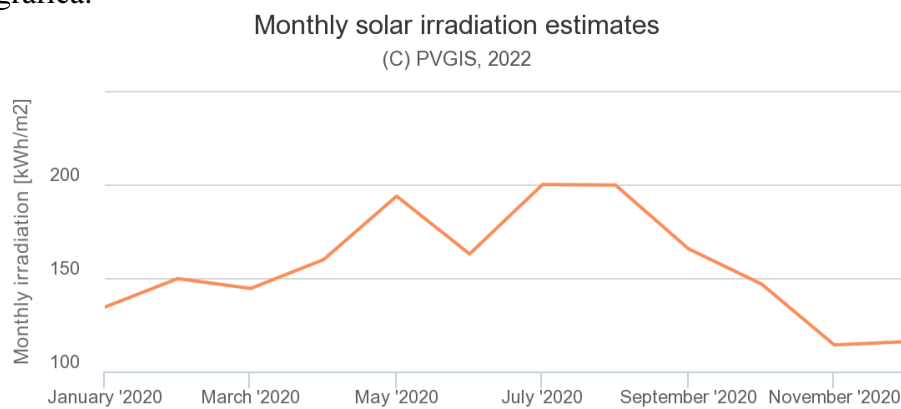


Figura 48. Irradiació (mesurada en kWh/m²) en funció del temps (els 12 mesos de l’any) a la província de Girona.

Font: Photovoltaic Geographical Information System.

En aquest gràfic es pot observar clarament com en els dos mesos més calorosos de l’any, juliol i agost s’assoleix els dos pics màxims d’irradiació: 200 kWh/m². Per altra banda, es pot apreciar com en els mesos més freds com ara el novembre i el desembre, la irradiació ni tan sols assoleix els 125 kWh/m².

Irradiància

Un cop aquests valors de densitat d'energia extrets del gràfic anterior es van dividir entre el temps (1 mes), es van convertir en valors de densitat de potència. D'aquesta manera la irradiància de la província de Girona o dit d'altra manera la P_{in} que rebria una DSSC a cada mes queda resumida en el següent gràfic de barres.

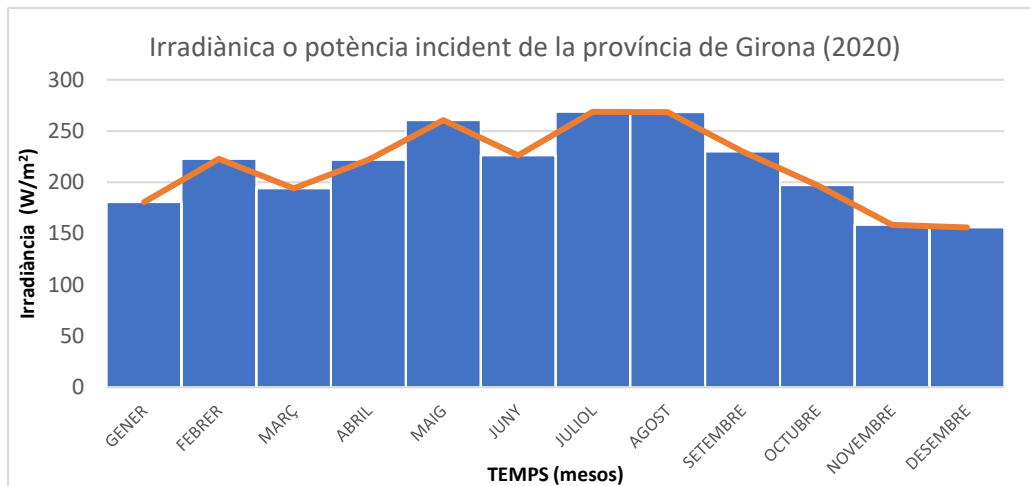


Figura 49. Irradiància (mesurada en W/m^2) en funció del temps (els 12 mesos de l'any) a la província de Girona.

Font: Elaboració pròpia.

Al operar amb pràcticament les mateixes constants (exceptuant els diferents dies que té cada mes) per canviar les unitats de les dades anteriors, les proporcions es mantenen i tan sols es poden obtenir les mateixes condicions que anteriorment: hi haurà més irradiància als mesos més calorosos i menys als més freds.

Potència màxima de la DSSC (P_{max})

Tenint com a dades el PCE de la DSSC de residu de suc de poma i els P_{in} per cada mes, s'ha aïllat el P_{max} de l'equació del PCE. S'han obtingut 12 valors, un per a cada valor de P_{in} i, per tant, un per cada mes.

En aquest cas, d'igual manera s'han multiplicat tots els valors pel mateix paràmetre, el qual és l'eficiència total de la DSSC de residu de suc de poma (0.0027%) i, per tant, la forma de la gràfica tampoc s'ha alterat.

Residu de suc de poma produït a Girona en un any

Mitjançant l'entrevista s'ha conegut que el Mooma produeix 4000 tones de pomes a l'any, de les quals un 20% (800 tones) es premsen. A aquestes 800 tones se'ls hi ha d'afegir 400 tones més de pomes provinents d'altres conreus, sumant així 1200 tones de pomes. D'aquestes 1200 pomes es produeix 600000 L de suc i **600 tones** de residu de suc de poma.

Volum de sensibilitzador consumit per unitat de superfície

Un cop aplicada la fórmula s'ha mesurat una diferència entre el volum inicial i el final de 2 mL, que dividida entre 32 cm^2 (8 substrats x 4 cm^2 per substrat) de substrat cobert de TiO_2 s'ha mesurat un volum consumit per cm^2 de **0.0625 mL/cm²**.

Energia total generada en un any

Finalment, ajuntant totes aquestes dades a partir d'un factor de conversió específic per cada mes (amb un P_{max} i uns dies diferents) s'ha calculat l'energia elèctrica hipotètica produïda en cada mes d'un any (concretament 2020).

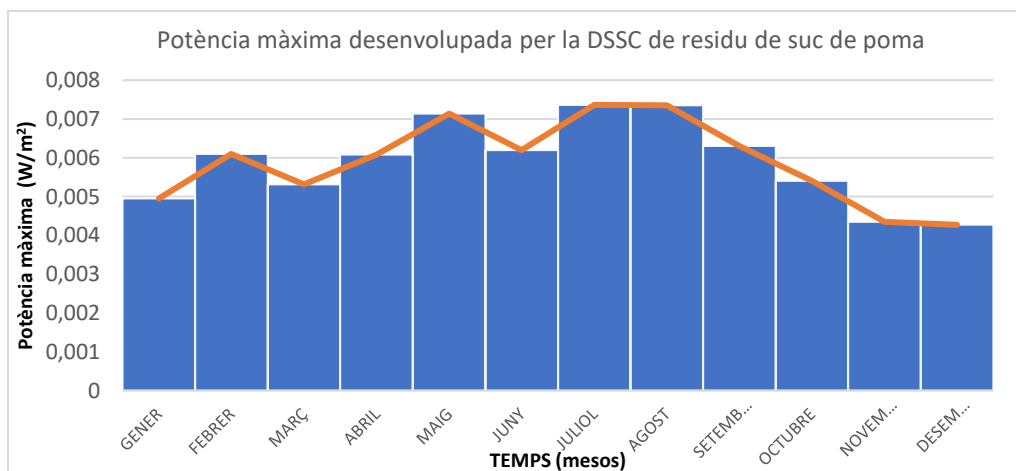


Figura 50. Potència màxima desenvolupada per metre quadrat de DSSC a cada mes de l'any.

Font: Elaboració pròpia.

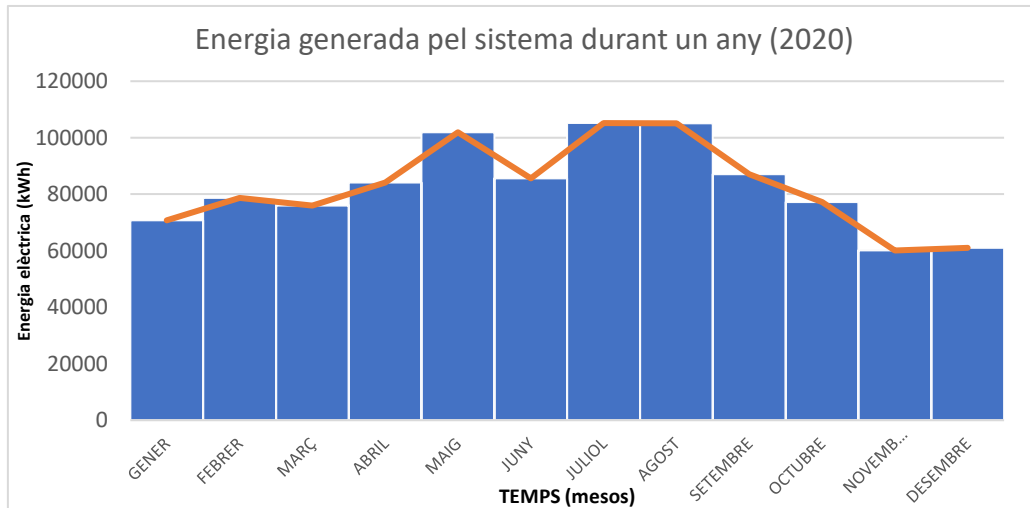


Figura 51. Energia desenvolupada per l'hipotètic sistema plantejat per cada mes de l'any.

Font: Elaboració pròpia.

Pels mateixos motius que abans, la gràfica encara manté la mateixa forma. Es pot observar com l'irradiància i l'energia produïda són directament proporcionals, ja que els mesos amb més sol, són en els que es produeix més quantitat d'energia.

El sumatori de l'energia de cada mes i , per tant, el total d'energia elèctrica produïda en un any utilitzant els residus de suc de poma produïts per la província de Girona és: **992749.786 kWh.**

Consum d'energia de la província de Girona

Un cop sumats els consums energètics del sector terciari de tots els municipis de la província s'han utilitzat totes les dades per elaborar un gràfic sobre el consum energètic de tots els sectors durant l'any 2020.

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA

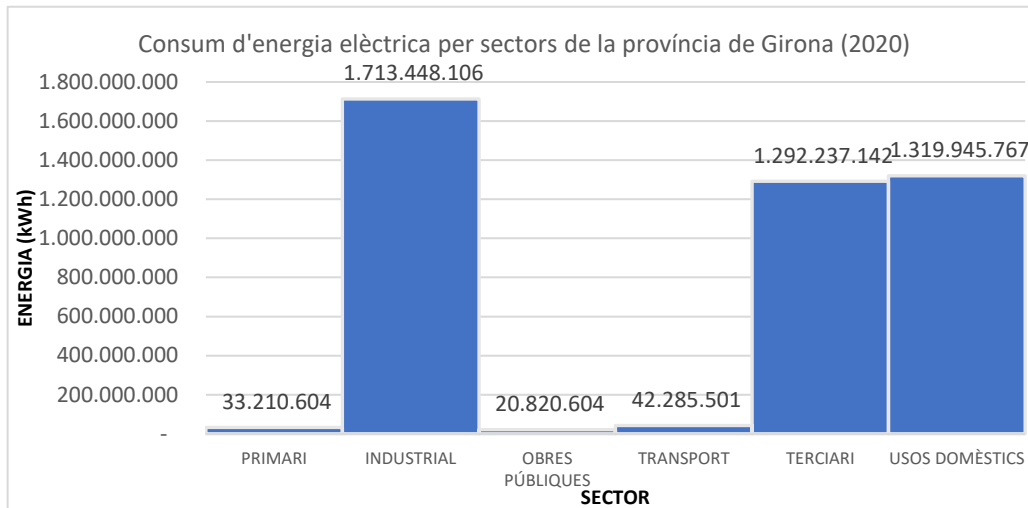


Figura 52. Energia elèctrica consumida per cada sector de la província de Girona.

Font: Elaboració pròpia.

Es pot observar que el sector industrial, el terciari i el dels usos domèstics són els que, amb diferència, tenen una demanda molt més alta. En canvi, els altres tres requereixen una quantitat extremadament menor d'energia. La suma de tots els valors i, per tant, el consum total d'energia de la província en un any és de: **4.421.947.724 kWh**.

Comparació entre el consum energètic i l'energia produïda

El següent diagrama, és una conclusió final que compara l'energia que produiria el sistema de DSSCs de residu de suc de poma plantejat un any en front de la demanda energètica de la província d'un any.

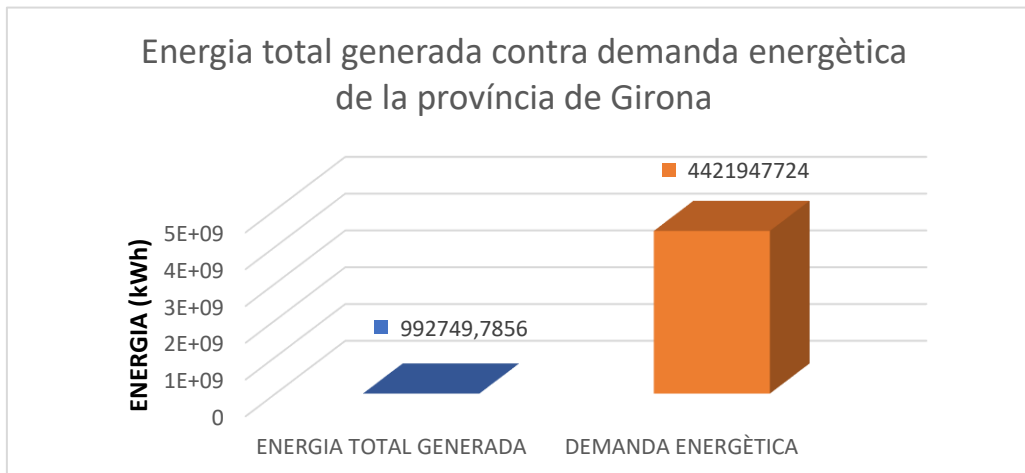


Figura 53. Comparativa final entre l'energia total produïda i la demanda energètica en un any.

Font: Elaboració pròpia.

Es pot observar com l'energia generada és pràcticament inapreciable en comparació a la demanda energètica. Concretament, el sistema plantejat tan sols cobriria un **0.0225%** de la demanda energètica.

3.3.3 DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

Referent a **la irradiància**, la província de Girona té uns resultats més que acceptables gràcies a la seva excel·lent latitud (N 41° 58' 59.2"). Tot i que aquests resultats no es poden comparar amb els de regions de l'hemisferi sud, són molt superiors als de la majoria de zones d'Europa, Àsia i els Estats Units. Especialment, durant el juliol i l'agost, la província de Girona és un indret ideal per la instal·lació de cel·les fotovoltaïques.

Envers la **potència màxima generada pel sistema de DSSCs**, els seus resultats són pèssims a causa del baix PCE (0.0027%) de la DSSC de residu de suc de poma. Cal destacar que un equip d'investigadors especialitzats en la recerca de DSSCs, sense cap dubte hagués pogut assolir un PCE molt millor i en conseqüència uns resultats molt millors en aquesta secció. Addicionalment, és segur que al cap d'uns anys quan es coneguin nous materials que puguin actuar com a components millors de la DSSC, serà possible augmentar encara més aquests resultats.

Respecte **al residu de suc de poma produït a la província de Girona**, 600 tones és una quantitat molt generosa per una sola província i amb molt de potencial per emprar-la en DSSCs. Si s'aconseguissin DSSCs amb un major PCE, aquestes restes infravalorades podrien suposar una gran diferència.

Pel que fa al **volum de sensibilitzador consumit per unitat de superfície**, 0.0625 mL/cm² és una quantitat molt ínfima i es pot considerar un altre punt a favor en l'aplicació del sistema.

Finalment, quant a **l'energia total generada en un any** i la seva comparativa amb la demanda energètica de la província de Girona, desgraciadament, s'han assolit uns resultats molt poc satisfactoris. Malgrat que 992749.786 kWh és una xifra molt alta comparada per exemple als 9.922 kWh⁸¹ que consumeix una casa espanyola en un any, no es pot ni comparar amb la demanda energètica de la província de Girona. Ni tan sols es cobreix una vintena part del sector d'obres públiques, el que té menys demanda de tots

⁸¹ Extret de: <https://www.mipodo.com/blog/informacion/factura-media-luz-hogar-espana/>

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA

(9927497.86 kWh contra 20820604 kWh). D'altra banda, aquesta xifra sí que podria resultar més significativa en una ciutat o una comarca petita.

A partir d'aquests resultats queda clar que, actualment, no és viable portar a la pràctica aquest sistema per ajudar a cobrir la demanda elèctrica de la província de Girona.

3.4 Viabilitat de les DSSCs basades en residu de suc de poma com a cel·la fotovoltaica competent

3.4.1 METODOLOGIA

En l'última secció del marc pràctic s'analitzarà des d'una perspectiva més realista, que en la tercera secció, l'aplicació de les DSSCs construïdes. Una producció energètica acceptable no és més que una de les moltes dificultats que sorgirien en l'aplicació de l'ambiciosa idea proposada en aquest projecte. Algunes d'aquestes dificultats són:

- ✓ Problemes econòmics com:
 - El preu dels materials.
 - Els beneficis esperats per intermediaris (com els productors de suc de poma).
- ✓ Problemes tècnics com:
 - La temperatura.
 - La constant incidència de llum sobre les cel·les.

Amb la fi d'estudiar algunes d'aquestes complicacions es farà un seguiment de la DSSC de residu de suc de poma. L'objectiu del seguiment serà el d'analitzar com varia el I_{sc} , el V_{oc} de la cel·la, el PCE i el FF amb el pas dels dies.

D'altra banda, s'estudiarà un possible cost aproximat dels components necessaris en funció dels m^2 de DSSC utilitzats en el sistema desenvolupat a la secció anterior.

Finalment, s'entrevistarà un enginyer per tal de conèixer la seva opinió sobre el futur de les cel·les fotovoltaïques.

3.4.1.1 Conceptes previs

Abans d'entrar en matèria, es donaran unes nocions bàsiques sobre les generacions de cel·les solars per tal de conèixer la posició actual de les DSSCs al mercat, les principals limitacions que dificulten la seva aplicació i els avantatges que brinden respecte a altres tipus de cel·les solars.

Generacions de cel·les solars

Totes les cel·les solars creades fins al moment es classifiquen en tres o quatre grans grups (segons la font) anomenats generacions segons les seves característiques.

Primera generació

En primer lloc, es troben les cel·les solars de silici cristal·lí conegudes també com a cel·les convencionals o tradicionals són les cel·les solars que han demostrat la millor eficiència total, un 26%, i actualment dominen el mercat.

Estan formades per làmines de semiconductors i a diferència de, per exemple les DSSCs, no contenen cap substrat extra. El seu funcionament es basa en una unió de semiconductors p-n, és a dir, uns de tipus n i uns altres de tipus p.

La problemàtica d'aquesta generació de cel·les recau en l'alt cost de la producció. Al ser una tecnologia relativament antiga, el cost d'aquestes cel·les depèn molt del cost del material i addicionalment es requereixen procediments a altes temperatures que augmenten aquest cost.

D'altra banda, les cel·les de primera generació estan a punt de superar el seu límit teòric d'eficiència (31% - 41%) i tenen un temps d'amortització molt curt (5 – 7 anys) (*Agarwal et al., 2021*).

Segona generació

La segona generació engloba les cel·les solars formades per pel·lícules fines de semiconductor sobre substrats de vidre o ceràmica. A l'emprar menys material en la construcció de les pel·lícules, el seu cost també es redueix envers les cel·les solars de primera generació. El seu PCE es troba entre el 10% - 15%. Aquesta generació inclou:

- ✓ Cel·les solars de silici amorf (no cristal·litzat).
- ✓ Cel·les solars de pel·lícula fina de tel·lurur de cadmi (CdTe).
- ✓ cèl·lules solars de pel·lícula fina de diselenur de gal·li i coure (CIGS).

Malauradament, els processos requerits i els materials requerits en aquests dispositius continuen essent molt cars (*Jean et al., 2015*).

Tercera i quarta generació

Finalment, la tercera i la quarta sorgeixen amb el nom de cel·les de nova generació degut a les limitacions de preu i disponibilitat de materials de les dues primeres, així com la toxicitat d'aquestes. Les cel·les de tercera i quarta generació són les següents:

Tercera generació

- ✓ Cel·les solars sensibilitzades amb colorant (DSSC)
- ✓ Cel·les de punt quàntic (QDSC).
- ✓ Cel·les orgàniques (OSC).
- ✓ Altres projectes innovadors en desenvolupament.

Quarta generació

- ✓ Cel·les solars de perovskita.

Aquestes també utilitzen pel·lícules fines i també es poden anomenar amb el nom de pel·lícules fines avançades. El funcionament de cadascuna d'aquestes cel·les i l'estratègia per augmentar l'eficiència varia molt, però totes superen de sobres l'eficiència teòrica màxima de les cel·les de primera i segona generació amb un cost molt més baix (Sánchez i Beltran, 2015).

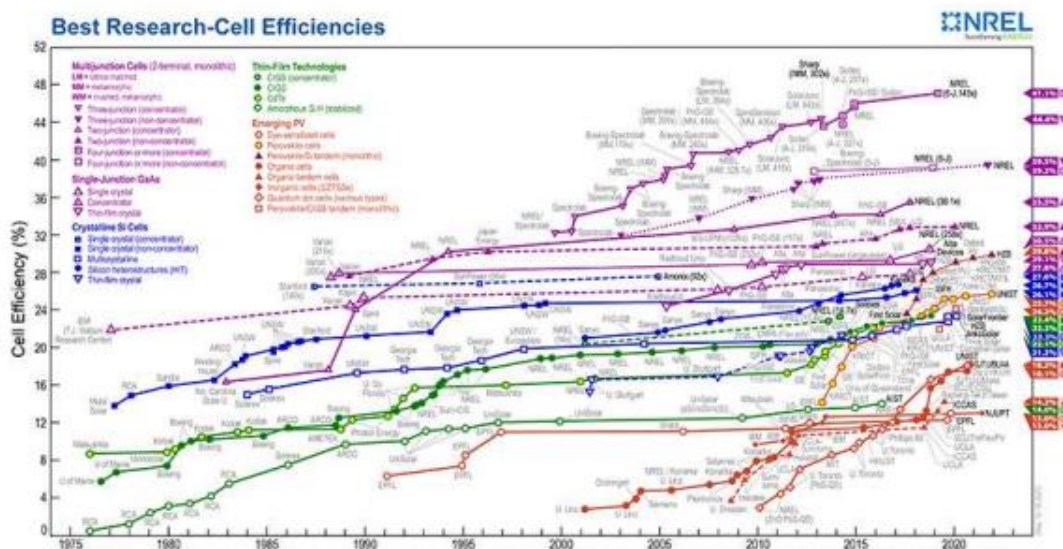


Figura 54. Gràfic de rècords d'eficiències de totes les cel·les solars.

Font: NREL.

Limitacions en l'aplicació de les DSSCs

Les limitacions actuals de les DSSCs que no en permeten la seva industrialització i comercialització són les següents:

Estabilitat a llarg termini

En l'actualitat, malgrat tenir molt de marge de millora, les millors DSSCs poden funcionar durant 20000 hores sense mostrar signes de degradació, una xifra relativament baixa comparades a les cel·les de silici que tenen una vida útil de més de 30 anys. Els principals motius de degradació són a causa els components interiors de la cel·la però també:

1. Les altes temperatures

- a. En l'antocianina, el sensibilitzador estudiat en aquest treball, s'ha comprovat científicament que una temperatura alta accelera la seva degradació (*Worku, Yazie i Asteraye, 2020*).
- b. L'electròlit es pot congelar a temperatures molt baixes i a altes temperatures es pot expandir per la cel·la evitant que els components es segellin. Això provoca una disminució del I_3 (parella redox) que s'anomena blanqueig degut al canvi de color de groc a transparent de l'electròlit (*Liu, 2020*).

2. La incidència constant de llum

Altres estudis han demostrat que en el cas de l'antocianina la llum constant accelera la seva destrucció (*Worku, Yazie i Asteraye, 2020*).

3. La humitat

Pot entrar aigua dins del mecanisme i espatllar el seu funcionament.

3.4.1.2 Procediment

Degradació de la DSSC

Seguiment

Intensitat de circuit curt i voltatge de circuit obert

Per poder avaluar la degradació de la cel·la a llarg termini es va fer un seguiment de la DSSC de residu de suc de poma durant set dies a partir, de l'estudi dels següents paràmetres elèctrics:

- ✓ el V_{oc} .
- ✓ el I_{sc} .

Es va aplicar el mateix mètode que s'ha usat en la segona secció, és a dir, connectar les DSSCs a un multímetre i col·locar-les sota la font lluminosa amb les condicions especificades anteriorment (1.5 AM).

En aquest cas, l'ús de la làmpada LED en comptes del sol, va resultar una tria molt encertada donat que es van poder mantenir les mateixes condicions el màxim possible en cadascuna de les mesures.

Potència (P)

A més també es va analitzar la potència (P) multiplicant el V_{oc} i el I_{sc} . És a dir, la potència teòrica, però utilitzant el I_{sc} en comptes del J_{sc} i obtenint un valor amb W i no en W/m^2 .

Preu dels materials del sistema proposat

Superfície o quantitat de DSSCs

Abans de calcular els preus dels materials de manera aproximada, primerament es van calcular els m^2 de DSSC que farien falta per poder emprar tots els residus de suc de poma. Per calcular-ho es va utilitzar un factor de conversió tal com s'ha fet a la secció anterior per calcular l'energia produïda.

Consulta dels preus

Es van consultar els preus dels vidres FTO, del TiO_2 i de l'electròlit al mateix lloc web (*Arbor Scientific*) on es van comprar els materials per construir les quatre DSSCs. Tot i que per a ús industrial el cost probablement disminuiria, consultar aquests preus a recursos web és l'única manera d'aproximar el cost total.

D'altra banda, pel que fa a l'etanol per extreure el sensibilitzador, es va prendre el preu de mercat del distribuïdor en línia de material de laboratori "*letslab*". El cost del residu de suc de poma es va negligir en aquest cas.

Finalment, quant al catalitzador (grafit), com que no es pot calcular-ne una quantitat exacta i a més a més, es tracta d'una quantitat ínfima, el seu preu també es va negligir.

Escalada dels preus

Finalment els preus del TiO_2 , l'electròlit, els vidres FTO i l'etanol utilitzat es van escalar a les quantitats necessàries per cobrir la superfície prèviament calculada a partir de: factors de conversió, les dades trobades en els dos apartats anteriors i utilitzant la següent aproximació:

- ✓ 1 mL = 20 gotes.

Tots aquests càlculs sintetitzats en forma de factors de conversió es poden veure a l'Annex 10.

Comparativa del sistema proposat amb l'actualitat

Amb la finalitat de comparar els preus hipotètics de l'extensió coberta per DSSCs amb els d'aquesta mateixa extensió però coberta amb cel·les de silici convencionals, es va contactar amb "Green Elèctric" per demanar els €/m² d'una cel·la comercial.

Green Elèctric

Descripció

Green Elèctric és una companyia energètica dedicada a la venda de cel·les solars i conscienciada amb la reducció d'emissions i la supressió de les fonts d'energia no renovables. Els productes que venen són els següents

- ✓ Cel·la solar tèrmica⁸².
- ✓ Cel·la solar fotovoltaica (de silici).

Contacte

Es va contactar amb Josep Maria Solà, enginyer en telecomunicacions de Green elèctric, per sol·licitar-hi una entrevista i conèixer l'opinió d'un expert sobre el model energètic del futur i el possible paper de les DSSCs. També se li van fer les consultes necessàries sobre les cel·les que venen actualment i sobre el preu d'aquestes per m². Aquesta relació es va usar per trobar el preu dels m² necessaris per cobrir l'extensió de terreny prèviament calculada. Finalment, es va comparar aquest preu amb el de la suma dels components de la DSSC necessaris per cobrir la mateixa extensió de terreny.

⁸² **Cel·la solar tèrmica:** Dispositiu que transforma l'energia solar en calor.

L'entrevista es pot consultar a l'Annex 11.

3.4.2 RESULTATS

Els resultats d'aquesta secció es reflecteixen en, per una banda, gràfics de corbes de dispersió per estudiar el seguiment de la DSSC, i per altra banda, diagrames de barres per estudiar els preus dels components.

D'igual manera, els fulls de càlcul amb totes les taules de valors i els factors de conversió utilitzats es poden consultar a l'Annex 10.

3.4.2.1 Anàlisi de resultats

Degradació de la DSSC

Per estudiar com reacciona la DSSC al pas del temps, s'ha fet el seguiment del dispositiu durant set dies i s'han utilitzat les mesures per dissenyar gràfics en funció del temps. D'aquesta manera s'han pogut analitzar els resultats obtinguts i extreure'n conclusions de la manera més visual i precisa possible.

Intensitat de circuit curt i voltatge de circuit obert

Les dues mesures s'han pres a partir del multímetre connectat a la DSSC amb unes pinces de cocodrill i usant les funcions de voltatge i intensitat. El diagrama mostrat a continuació descriu el comportament de les magnituds voltatge i intensitat en funció del temps.

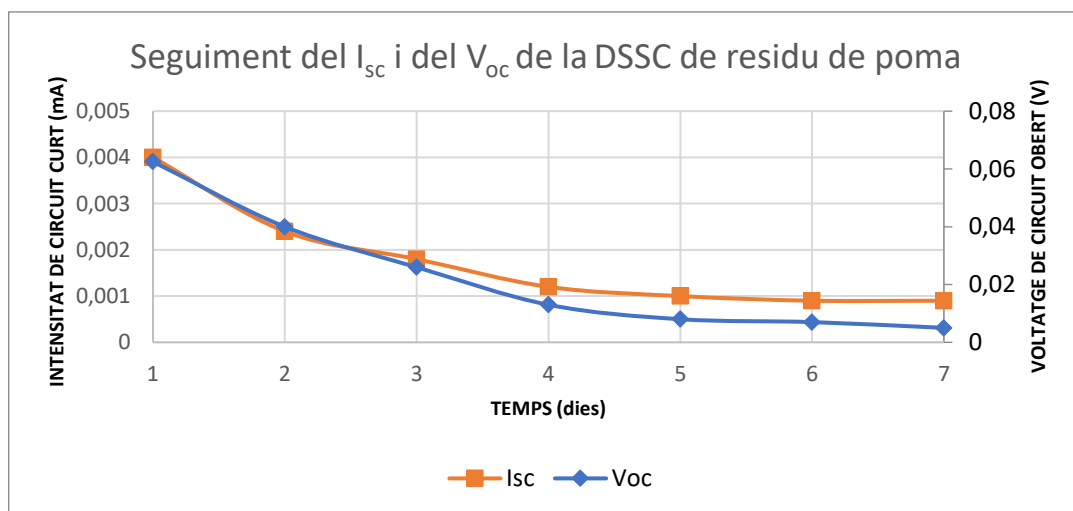


Figura 55. Intensitat de circuit curt (mA) i voltatge de circuit obert (V) en funció del temps (dies).

Font: Elaboració pròpia.

Es pot distingir que tant el V_{oc} i el I_{sc} es redueixen significativament, concretament a la tretzena i la cinquena part respectivament. Durant els primers quatre dies, les dues funcions decreixen exponencialment, però en els tres últims, malgrat que els valors continuen decreixent ho fan d'una manera menys brusca fins a estabilitzar-se.

Potència

S'ha obtingut el gràfic de la potència a partir del producte de les dues magnituds anteriors.

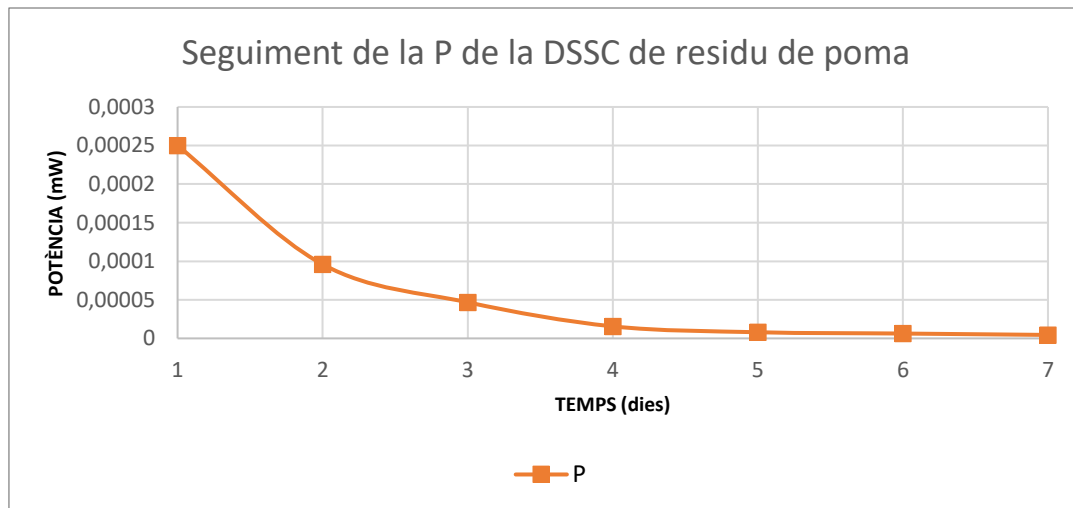


Figura 56. Potència (en mW) en funció del temps (dies).

Font: Elaboració pròpia.

Igual que en els dos gràfics anteriors, en aquest darrer es pot apreciar com la potència també decreix desorbitadament en tan sols set dies, concretament és **55 vegades menor**. A més a més, aquest decreixement també s'accentua en els primers quatre dies.

Preu dels materials del sistema proposat

Per calcular el cost total hipotètic dels materials necessaris per consumir tot el residu de suc de poma produït en la construcció de DSSCs s'han calculat els següents valors:

Superfície

L'extensió total calculada de m^2 de DSSCs de residu de suc de poma per gastar tot el residu és de **19200000 m^2** .

Preus utilitzats

Els preus trobats i usats són els següents:

- ✓ 25 mL d'electròlit → 7.85 €.
- ✓ 15 mL de semiconductor TiO₂ → 7.85 €.
- ✓ 60 cm² de substrats → 15 €.
- ✓ 25 L etanol → 180 €.

Escalada dels preus

Un cop es van escalar els preus als 19200000 m² s'ha elaborat un diagrama de barres per poder comparar els preus i estudiar quins són els elements més costosos del sistema.

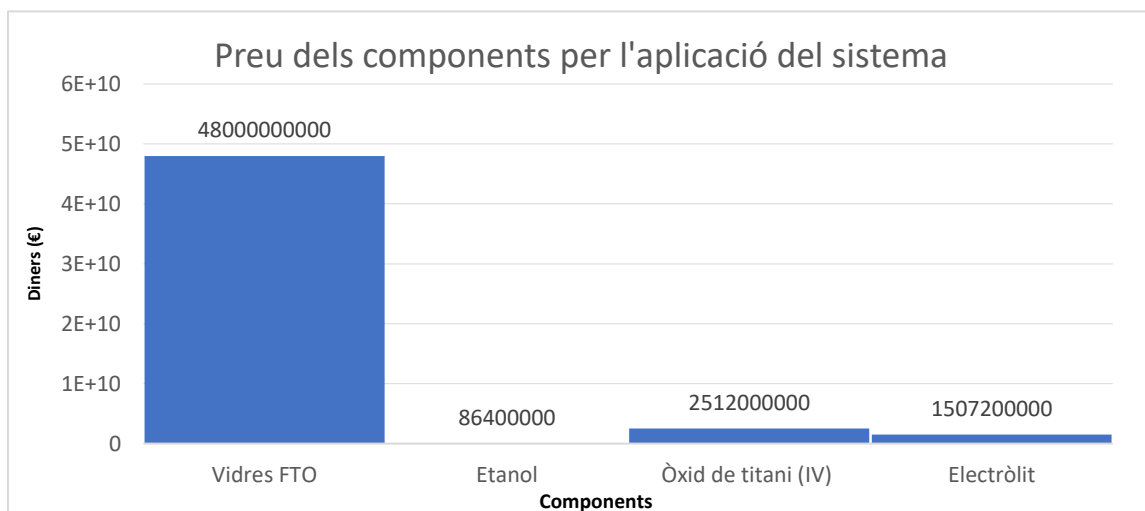


Figura 57. Preu dels diferents components escalats a les quantitats necessàries per portar a terme la proposta.

Font: Elaboració pròpia.

Es pot apreciar amb facilitat que el preu més alt i, per tant, el que incrementa el cost total és el dels vidres FTO (48000000000 €). D'altra banda, el menys preocupant és sense cap mena de dubte el preu del etanol del sensibilitzador (864000000 €). El preu total és de **52105600000 €**.

Preu de la utilització de cel·les de silici per recobrir la superfície

Preu m² cel·la comercial de silici

A partir de l'entrevista amb Josep Maria Solà es va aconseguir la següent relació entre la superfície amb el preu.

1 m² → 100 €.

Preu de l'extensió de cel·les de Silici

Ajuntant la relació anterior amb els 19200000 m² es va calcular que el preu per recobrir l'extensió sencera i aprofitar així tot el residu és de **1920000000 €**.

Comparativa del sistema proposat amb les cel·les de silici

Finalment, el següent gràfic de barres compara els dos preus d'aplicació de les dues opcions valorades anteriorment: la cel·la de silici i la DSSC. Aquest diagrama proporciona els resultats finals d'aquesta quarta secció.

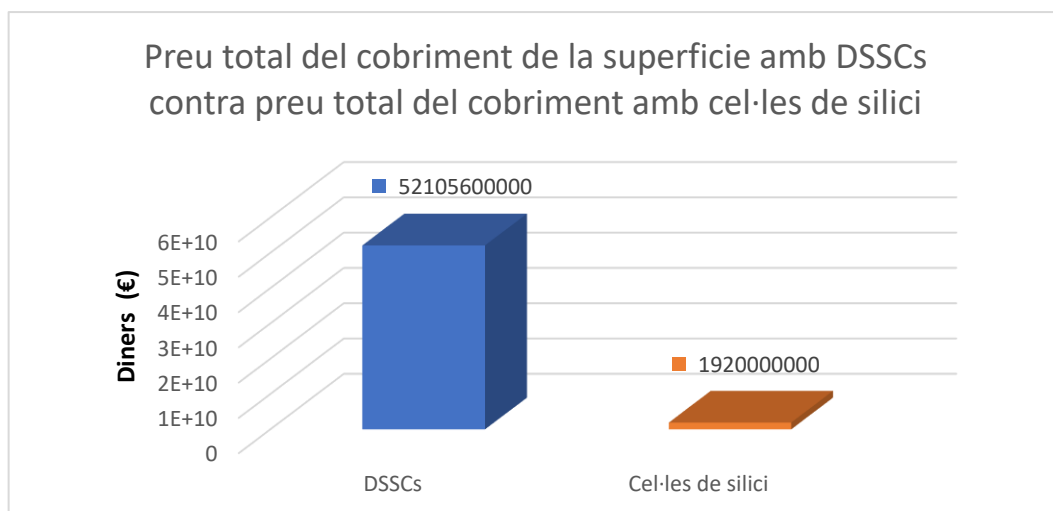


Figura 58. Comparativa final entre el sistema proposat i l'ús de plaques convencionals de silici per cobrir la mateixa superfície.

Font: Elaboració pròpia.

Aquest gràfic de barres demostra que per cobrir l'extensió de 19200000 m² (extensió màxima possible per cobrir amb DSSCs amb el residu de poma disponible de la província), l'aplicació de les cel·les de silici comercials actuals és **27 vegades** més

econòmica que l'aplicació de les DSSCs basades en el residu de suc de poma que s'han ideat en aquest projecte.

3.4.3 DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

Primerament, pel que fa a la **degradació de la DSSC**, en el seguiment dut a terme s'ha comprovat que amb el pas del temps, el rendiment de la DSSC disminueix de manera exponencial. Les causes d'aquest fenomen són principalment l'alta temperatura i la incidència de llum solar al que està sotmesa la DSSC constantment (*Worku, Yazie i Asteraye, 2020*). A més a més, l'etanol també n'és responsable, donat que alguns estudis han demostrat que produeix la corrosió del semiconductor (*Jun et al, 2021*). Tot i que a partir del quart dia els resultats es comencen a estabilitzar, en aquest punt els valors són tan ínfims que converteixen la DSSC en inviable. És molt possible que els estudis fets en DSSCs durant els pròxims anys solucionin aquests inconvenients.

Finalment, respecte **al preu dels materials** escalats als 19200000 m², pràcticament tot el cost recau en els vidres FTO (48000000000 €), cosa que és lògica, ja que és el component majoritari de la cel·la amb molta diferència. El cost total del sistema és escandalosament alt, comparant-lo amb el de les cel·les de silici amb la mateixa extensió (52105600000 € contra 19200000000 €). Addicionalment, les cel·les de silici generarien molta més energia que les DSSCs: **33.638.400.000 kWh**⁸³.

D'altra banda, cal recordar que les cel·les de silici pertanyen a les cel·les fotovoltaïques de primera generació, la generació més antiga i, com a conseqüència, són les més investigades, optimitzades i, per tant, amb preus més assequibles. A més a més, cal mencionar que les cel·les de silici gaudeixen de subvencions de l'estat. En canvi, la DSSC es troba dintre el grup de cel·les de tercera generació on cap de les integrants ha estat encara comercialitzada a gran escala. Addicionalment, per la seva hipotètica comercialització, la venda dels components a gran escala segur que seria molt més econòmica i no tindria res a veure amb els preus que s'han fet servir en aquest treball.

Per aquests dos motius, tot i que actualment la DSSC proposada no és ni de bon tros, una cel·la fotovoltaïca competent, en el futur ho podria arribar a ser.

⁸³ Partint de la següent dada extreta de l'entrevista amb Josep Maria Solà:
1 m² = 200 W

4 CONCLUSIONS

A partir dels resultats prèviament exposats i discutits en les quatre seccions i tot el bagatge obtingut en l'elaboració del projecte, s'ha valorat la validesa de les hipòtesis formulades a l'inici del projecte. També, s'ha valorat la metodologia emprada en el marc pràctic, s'ha extret una conclusió definitiva sobre l'aplicació del sistema que es proposa en aquest treball en l'actualitat i en el futur i finalment s'han formulat noves propostes d'investigació.

“És possible extreure un sensibilitzador natural del residu recollit en l'elaboració de suc de poma i emprar-lo en la confecció d'una DSSC funcional.”

La primera hipòtesi s'ha verificat indubtablement. S'ha comprovat que la DSSC natural basada en el residu de suc de poma generava un voltatge no nul i, per tant, evidentment que el seu principi de funcionament era efectiu. Com s'ha explicat en el marc teòric, el principi de funcionament de la DSSC consisteix en un cicle tancat on cadascun dels cinc components que hi participen (catalitzador, sensibilitzador, semiconductor, electròlit i substrats) realitzen una funció indispensable. Així doncs, si el principi de funcionament s'executa correctament es pot deduir que, tots els components operen correctament i que, per tant, el sensibilitzador d'antocianina extret del residu de suc de poma mitjançant etanol al 96% és vàlid per a elaborar DSSCs. Quant als altres components, com a semiconductor s'ha usat òxid de titani (IV), com a substrats vidres FTO, un electròlit de tipus iodur/triiodur (I/I_3^-) i grafit com a catalitzador.

La validesa d'aquesta primera hipòtesi obre moltes portes a investigar en altres tipus de residus de verdures o fruites i comprovar si aquests també són vàlids en la síntesi de colorants naturals.

“La maduresa i el color de les pomes usades en l'extracció de sensibilitzador natural d'aquest fruit són variables que alteren el rendiment de la DSSC.”

Malgrat que s'ha demostrat que el residu de suc de poma és un candidat clar en l'elaboració de colorants naturals per fabricar DSSCs, el resultat de la segona hipòtesis també ha provat que no tots els tipus de residus de suc de poma són igual d'eficients, sinó que variables com el color i la maduresa poden modificar la qualitat del colorant. S'han avaluat quatre DSSCs de *Malus domestica*: una de poma vermella, una de poma verda, una de residu de suc de poma i una de poma vermella mitjançant paràmetres fotoelectroquímics i paràmetres òptics.

En la major part d'aquests (FF, V_{oc} , PCE, J_{sc} , I_{sc} , P_{max} i P_{theo} i IPCE) la DSSC de poma verda ha mostrat els millors resultats, evidenciant que contra tot pronòstic les pomes de color verd o com a mínim de la classe "Granny Smith" proporcionen uns millors sensibilitzadors. Aquests resultats són peculiars, ja que l'antocianina s'acostuma a trobar en fruits de pigments més aviat vermells.

D'altra banda, la DSSC de residu de suc de poma ha mostrat un rendiment relativament més alt a la DSSC de poma vermella (η o PCE: 0.0027% comparat a 0.0015%) i un major potencial d'extreure l'antocianina a causa de tenir un FF més baix (35% contra 26.53%). Possiblement, s'han obtingut aquests resultats ja que la part de la poma que resta un cop se n'ha fet suc és la que té una major concentració d'antocianina.

Finalment, tot i obtenir els pitjors resultats, el colorant de poma vermella podrida ha demostrat la millor absorbància de totes. S'ha conclòs que algun dels productes que sorgeixen durant la reacció de putrefacció pot reaccionar amb alguns dels components de la DSSC deixant la cel·la pràcticament obsoleta.

“És viable aplicar DSSCs basades en el residu de suc de poma com a font d'energia elèctrica a la província de Girona.”

Pel que fa a la tercera hipòtesi, aquesta ha quedat refutada contundentment. S'ha comprovat que, emprant les 600 tones de residu de suc de poma que la província de Girona produeix en un any, només es podrien produir 992749.786 kWh, una quantitat d'energia que no és comparable al consum energètic anual de la província de Girona (4.421.947.724 kWh). Concretament, aquesta xifra tan sols representa el 0.0225% de la demanda energètica del territori. Aquesta xifra és directament proporcional a l'eficiència de la DSSC i, per tant, gràcies al estudi actual i les investigacions en aquest prototip és

lògic pensar que segur que augmentarà. És possible que gràcies a aquesta investigació, en un moment donat aquesta proposta que actualment es pot qualificar com impossible esdevingui viable.

Una aplicació molt ambiciosa per donar ús a un sistema de DSSCs d'aquestes dimensions seria la d'aplicar-les en hivernacles. Gràcies al seu baix pes, a la seva transparència i a la seva capacitat de ser tenyides amb colors, les DSSCs poden ser usades per proporcionar ombra, donar la llum amb les longituds d'ona desitjades a les plantes (400 nm – 700 nm) i alhora generar electricitat. Una altra aplicació semblant pot ser com a vidres tintats per a finestres de decoració de cases

D'altra banda, gràcies a les capacitats de les DSSCs per funcionar en una àmplia gamma de longituds d'ona i sota una il·luminació interior i exterior de baix nivell, es poden aplicar en dispositius petits com per exemple rellotges digitals, mòbils, carregadors, làmpades de tauleta de nit, iPods o com està fent actualment la companyia “Logitech” en teclats sense fil. Una altra aplicació per al futur de les DSSCs podria ser usar-les per la fotosíntesi artificial, un prometedor sistema que és capaç d'imitar la fotosíntesi natural i emmagatzemar l'electricitat en enllaços químics d'hidrogen a partir de l'electròlisi de l'aigua. Actualment, les DSSCs ja han passat de la fase de recerca a una fase més avançada on algunes empreses les estan començant a usar; tot i això, serà necessari molta més inversió en recerca i en màrqueting perquè aquesta tecnologia evolucioni.



Il·lustració 8. Exemples d'aplicacions de DSSCs en vidres decorats.

Font: Encuentros en la Biología.

“Les DSSCs basades en el residu de poma són una opció de cel·la fotovoltaica competent i amb un preu assequible.”

Finalment, la quarta hipòtesi s'ha desmentit. La DSSC basada en residu de suc de poma no és a hores d'ara una cel·la fotovoltaica competent. Aquesta conclusió dificulta més la seva aplicació i, per tant, constitueix un gran desavantatge a l'hora d'establir un sistema com el que es presenta a la tercera secció d'aquest projecte.

Per una banda, s'ha conclòs que la DSSC es degrada molt ràpidament i que les conseqüències d'aquest procés són nefastes per la cel·la ja que, per exemple, la seva potència al cap de set dies és 55 vegades menor (de 0.00025 mW a 0.0000045 mW).

Per altra banda, els resultats que definitivament han refutat la hipòtesi han estat els preus. El preu aproximat d'instal·lar el sistema de DSSCs proposat en l'extensió corresponent (19200000 m²), ascendeix fins als 52105600000 €, un preu 23 vegades superior al d'usar cel·les de silici convencionals de primera generació per cobrir la mateixa superfície (33.638.400.000 kWh). Malgrat tot, és important destacar que el preu del sistema s'ha calculat escalant preus destinats a usos particulars i, per tant, és lògic pensar que aquests es reduirien en la compra dels productes per a usos industrials.

Actualment, les cel·les de silici encara són una opció molt més viable a les DSSCs degut al seu alt PCE. Per fer possible la industrialització de les DSSCs s'han de solucionar les tres problemàtiques relacionades amb el que popularment es coneix com a "Triangle Daurat". Aquestes problemàtiques són el baix PCE o eficiència total, la baixa estabilitat a llarg termini i el preu de producció.

El potencial de les DSSCs recau en característiques com la semi transparència, el baix pes, la plasticitat, la possibilitat per tenir-se de diferents colors que faciliten la seva aplicació i sobretot la seva alta eficiència teòrica. Addicionalment, aquestes cel·les destaquen pel seu bon rendiment sota il·luminació interior o irradiació de llum tènue. En aquestes condicions, l'eficiència de les DSSCs és fins i tot més alta que la de les cel·les de silici.

Pel que fa al preu, com que els processos necessaris per a la construcció de les DSSCs són molt més simples i els materials són més abundants, el seu preu pot arribar a ser molt més econòmic que el de les cel·les de silici.

Respecte a la metodologia emprada, s'han seguit estrictament tots els procediments detallats en el marc pràctic i la coherència dels resultats obtinguts ha demostrat la seva

validesa. Malauradament, com s'ha anat recalcant en tot el treball, no s'ha disposat de les eines i els materials que normalment es solen fer servir en experiments d'aquesta envergadura. Aquesta mancança d'equipament probablement ha conduït a errors experimentals i, consegüentment, ha alterat els resultats del projecte. Principalment, aquesta falta d'instrumentació ha dificultat la caracterització de les DSSCs.

El rigor i la professionalitat de la metodologia s'hauria pogut augmentar si s'hagués disposat principalment de 3 aparells: una làmpada d'1 sol com a font d'il·luminació en la caracterització de les DSSCs, un espectrofotòmetre més precís per mesurar paràmetres de les DSSCs en funció de la longitud d'ona i un aparell especialitzat en la caracterització de cel·les solars.

Per a reemplaçar aquestes eines s'ha hagut de fer una extensa recerca fins a trobar mecanismes alternatius. Malgrat que aquests mecanismes eren més fàcils de construir, també proporcionen resultats menys precisos. Un clar exemple és el mètode de la resistència variable, el qual s'ha aplicat per caracteritzar els paràmetres fotoelectroquímics de les DSSCs.

Quant a possibles propostes de seguiment es planteja una via d'ampliació per a cada una de les seccions i hipòtesis del treball.

En primer lloc, per la primera secció, es presenta l'opció d'estudiar residus orgànics d'altres fruites i verdures per comprovar si es poden aplicar en la confecció de DSSCs i si poden desenvolupar una eficiència substancialment més alta.

En segon lloc, per la segona secció, es proposa estudiar altres classes de poma per investigar si realment el tipus de poma és una variable que afecta el rendiment de la DSSC o si, per contrapartida, només ho fa el color i la maduresa.

En tercer lloc, per la tercera secció, s'exposa la possibilitat de buscar altres territoris on es produeixen i es desaproveixen grans quantitats de residus orgànics i comprovar si seria viable aplicar-los per ajudar a cobrir la demanda elèctrica.

Finalment, per la quarta secció es planteja una proposta consistent en buscar mètodes per evitar, o com a mínim reduir, la degradació de les DSSCs.

En definitiva, en aquest treball s'ha demostrat que és possible emprar residu de suc de poma per a l'elaboració de DSSCs usades per generar energia elèctrica, però que malauradament en l'actualitat, la seva aplicació en la província de Girona no és una alternativa viable. No obstant això, al cap d'uns anys, quan s'hagi fet més recerca en aquest sector, els resultats d'aquest treball podrien millorar dràsticament, transformant aquesta proposta en realitzable. D'aquesta manera, les DSSCs naturals basades en el residu de suc de poma podrien convertir-se en una alternativa sostenible a les regions amb una gran quantitat de cultius de poma. Això crearia un nou sector basat en el reciclatge de residus de suc de poma per a elaborar colorants i usar-los en DSSCs. Es podrien crear molts llocs de treball, beneficiar enormement l'economia local i afavorir la sostenibilitat. A més a més, aquesta proposta podria resultar molt beneficiosa pel medi ambient, ja que representaria una petita victòria en la lluita contra el canvi climàtic.

5 WEBGRAFIA I BIBLIOGRAFIA

5.1 BIBLIOGRAFIA

- ✓ Archer, Mary/James Barber (2004): *Molecular to Global Photosynthesis: 2*, Imperial College Press.
- ✓ Yusuf, Mohd (2018): *Handbook of Renewable Materials for Coloration and Finishing*, Wiley-Scrivener.

5.2 WEBGRAFIA

- ✓ Agarwal, Reema (2021): Outdoor Performance and Stability Assessment of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs), IntechOpen, [en línia] <https://www.intechopen.com/chapters/77273> [Consulta 5.8.2022].
- ✓ Ahliha, A H/F Nurosyid/A Supriyanto/T Kusumaningsih (2018): Optical properties of anthocyanin dyes on TiO₂ as photosensitizers for application of dye-sensitized solar cell (DSSC), en: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 333, p. 012018, [en línia] doi:10.1088/1757-899x/333/1/012018. [Consulta 5.8.2022].
- ✓ Amogne, Negese Yazie/Delele Worku Ayele/Yeshitila Asteraye Tsigie (2020): Recent advances in anthocyanin dyes extracted from plants for dye sensitized solar cell, en: *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, Springer Science and Business Media LLC, vol. 9, n.o 4, [en línia] doi:10.1007/s40243-020-00183-5. [Consulta 5.8.2022].
- ✓ Andualem, Anteneh/Solomon Demiss (2018): Review on Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs), en: *Journal of Heterocyclics*, Edelweiss Publications Inc, pp. 29-34, [en línia] doi:10.33805/2639-6734.103. [Consulta 5.8.2022].

- ✓ Arbor Scientific (s. f.): Dye Sensitized Solar Cell Kit, Arbor Scientific, [en línia] <https://www.arborsci.com/products/dye-sensitized-solar-cell-kit-16> [Consulta 5.8.2022].
- ✓ Ashok, S. (1999): Solar energy | Definition, Uses, Advantages & Facts, Encyclopedia Britannica, [en línia] <https://www.britannica.com/science/solar-energy> [abgerufen am 24.11.2022].
- ✓ Barber, James/Phong D. Tran (2013): From natural to artificial photosynthesis, en: *Journal of The Royal Society Interface*, The Royal Society, vol. 10, n.o 81, p. 20120984, [en línia] doi:10.1098/rsif.2012.0984. [Consulta 5.8.2022].
- ✓ BBC News Mundo (2019): Qué hace que algunas manzanas sean rojas y otras no (y por qué las de ese color corren riesgo de desaparecer), BBC News Mundo, [en línia] <https://www.bbc.com/mundo/vert-fut-50708875> [Consulta 6.8.2022].
- ✓ Best Research-Cell Efficiency Chart (s. f.): Photovoltaic Research | NREL, [en línia] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> [Consulta 6.8.2022].
- ✓ Buscaino, Roberto/Claudio Baiocchi/Claudia Barolo/Claudio Medana/Michael Grätzel/Md. K. Nazeeruddin/Guido Viscardi (2008): A mass spectrometric analysis of sensitizer solution used for dye-sensitized solar cell, en: *Inorganica Chimica Acta*, Elsevier BV, vol. 361, n.o 3, pp. 798-805, [en línia] doi:10.1016/j.ica.2007.07.016. [Consulta 6.8.2022].
- ✓ Carolina Puignani, Dr. Ernest Pastor, Dr. Michael Sachs and Dr. Camilo A. Mesa (2021): From natural to artificial photosynthesis: the search for new fuels, Programa Joves i Ciència 2021. [Consulta 6.8.2022].
- ✓ Characterization of Dye Sensitized Solar Cell Using Cost Effective Automated Load Variable Method, M. S. Yatnatti, Ravi K. Linganagoudar, J. S. Kadadevarmath Global Journal for Research Analysis: Volume-2 | Issue-6 | June2013 [en línia]. [Consulta 7.11.2022].
- ✓ Coffey, Jerry (2015): What are the parts of an atom?, [en línia] <https://phys.org/news/2015-12-atom.html> [Consulta 6.8.2022].

- ✓ Definición de orbital atómico - Definicion.de (s. f.): Definición.de, [en línea] <https://definicion.de/orbital-atomico/> [Consulta 6.8.2022].
- ✓ Dréon, Julie/Quentin Jeangros/Jean Cattin/Jan Haschke/Luca Antognini/Christophe Ballif/Mathieu Boccard (2020): 23.5%-efficient silicon heterojunction silicon solar cell using molybdenum oxide as hole-selective contact, en: *Nano Energy*, Elsevier BV, vol. 70, p. 104495, [en línea] doi:10.1016/j.nanoen.2020.104495. [Consulta 15.8.2022].
- ✓ Dye Solar Cell Test (s. f.): Solaronix, [en línea] <https://shop.solaronix.com/solar-cell-kits/test-cell-kits.html>. [Consulta 15.8.2022].
- ✓ Dye solar cells for real (s. f.): Solaronix, [en línea] http://www.solaronix.com/documents/dye_solar_cells_for_real.pdf. [Consulta 15.8.2022].
- ✓ Editorial Board Entrée (2018): Optical Methods, [en línea] <https://www.thermopedia.com/content/10114/> [Consulta 15.8.2022].
- ✓ Español, Extensión En (2021): Coloración roja de la piel de las manzanas: ¿cómo se forma y qué factores la afectan?, Extensión en Español, [en línea] <https://extensionesp.umd.edu/2021/11/01/coloracion-roja-de-la-piel-de-las-manzanas-como-se-forma-y-que-factores-la-afectan/> [Consulta 16.9.2022].
- ✓ Fluorescence polarization modulation super-resolution imaging provides refined dynamics orientation processes in biological samples (2022): Nature, [en línea] https://www.nature.com/subjects/optical-techniques?error=cookies_not_supported&code=02c65b75-60ed-418c-9c80-bc47d29411a5 [Consulta 16.9.2022].
- ✓ Francis, Lorraine F./Christine C. Roberts (2016): Dispersion and Solution Processes, en: *Materials Processing*, Elsevier, pp. 415-512, [en línea] doi:10.1016/b978-0-12-385132-1.00006-9. [Consulta 16.9.2022].
- ✓ Gamry Instruments (s. f.): Dye Sensitized Solar Cells with Gamry's IMPS/IMVS, Gamry Instruments, [en línea] <https://www.gamry.com/application-notes/instrumentation/measuring-optical-power-of-led/> [Consulta 16.9.2022].

- ✓ Gonçalves, Luís Moreira/Verónica de Zea Bermudez/Helena Aguilar Ribeiro/Adélio Magalhães Mendes (2008): Dye-sensitized solar cells: A safe bet for the future., en: *Energy & Environmental Science*, Royal Society of Chemistry (RSC), vol. 1, n.o 6, p. 655, [en línia] doi:10.1039/b807236a. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Gong, Jiawei/K. Sumathy/Qiquan Qiao/Zhengping Zhou (2017): Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends, en: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier BV, vol. 68, pp. 234-246, [en línia] doi:10.1016/j.rser.2016.09.097. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Graetzel, Michael/René A. J. Janssen/David B. Mitzi/Edward H. Sargent (2012): Materials interface engineering for solution-processed photovoltaics, en: *Nature*, Springer Science and Business Media LLC, vol. 488, n.o 7411, pp. 304-312, [en línia] doi:10.1038/nature11476. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Green, Martin A (2002): Photovoltaic principles, en: *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Elsevier BV, vol. 14, n.o 1-2, pp. 11-17, [en línia] doi:10.1016/s1386-9477(02)00354-5. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Green, Martin A./Ewan D. Dunlop/Dean H. Levi/Jochen Hohl-Ebinger/Masahiro Yoshita/Anita W.Y. Ho-Baillie (2019): Solar cell efficiency tables (version 54), en: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Wiley, vol. 27, n.o 7, pp. 565-575, [en línia] doi:10.1002/pip.3171. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Hamann, Thomas W./Rebecca A. Jensen/Alex B. F. Martinson/Hal Van Ryswyk/Joseph T. Hupp (2008): Advancing beyond current generation dye-sensitized solar cells, en: *Energy & Environmental Science*, Royal Society of Chemistry (RSC), vol. 1, n.o 1, p. 66, [en línia] doi:10.1039/b809672d. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Hamed, N. K. A./M. K. Ahmad/N. S. T. Urus/F. Mohamad/N. Nafarizal/N. Ahmad/C. F. Soon/A. S. Ameruddin/A. B. Faridah/M. Shimomura/K. Murakami (2017): Performance comparison between silicon solar panel and dye-sensitized solar panel in Malaysia, en: *AIP Conference Proceedings*, Author(s), [en línia] doi:10.1063/1.5002047. [Consulta 20.9.2022].

- ✓ Han, Liyuan/Naoki Koide/Yasuo Chiba/Ashraful Islam/Takehito Mitate (2006): Modeling of an equivalent circuit for dye-sensitized solar cells: improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells by reducing internal resistance, en: *Comptes Rendus Chimie*, Elsevier BV, vol. 9, n.o 5-6, pp. 645-651, [en línea] doi:10.1016/j.crci.2005.02.046. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Haque, Abu Naser Md. Ahsanul/Md. Azharul Islam (2015): The contribution of different vinyl sulphone-reactive dyes to an effluent, en: *Journal of Taibah University for Science*, Informa UK Limited, vol. 9, n.o 4, pp. 594-600, [en línea] doi:10.1016/j.jtusci.2015.03.010. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Haque, Saif A./Emilio Palomares/Byung M. Cho/Alex N. M. Green/Narukuni Hirata/David R. Klug/James R. Durrant (2005): Charge Separation versus Recombination in Dye-Sensitized Nanocrystalline Solar Cells: the Minimization of Kinetic Redundancy, en: *Journal of the American Chemical Society*, American Chemical Society (ACS), vol. 127, n.o 10, pp. 3456-3462, [en línea] doi:10.1021/ja0460357. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Hara, Kohjiro/Nagatoshi Koumura (s. f.): Organic Dyes for Efficient and Stable Dye-Sensitized Solar Cells, en: *SIGMA-ALDRICH*, p. <https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/technical-documents/technical-article/materials-science-and-engineering/photovoltaics-and-solar-cells/organic-dyes-for-efficient>. [Consulta 20.9.2022].
- ✓ Hercules, David M. (1964): Optical Methods of Analysis: *Treatise on Analytical Chemistry*. Part 1, Theory and Practice. vol. 5, *Optical Methods of Analysis*. I. M. Kolthoff and Philip J. Elving, Eds. Interscience (Wiley), New York, 1964. xx + 640 pp. Illus. "6., en: *Science*, American Association for the Advancement of Science (AAAS), vol. 146, n.o 3642, pp. 387-388, [en línea] doi:10.1126/science.146.3642.387.b. [Consulta 23.9.2022].
- ✓ IDTechEx Ltd (2013): Células solares sensibilizadas con colorantes (DSSC/DSC) 2013-2023: tecnologías, mercados, jugadores:, IDTechEx, [en línea] <https://www.idtechex.com/es/research-report/dye-sensitized-solar-cells-dssc-dsc-2013-2023-technologies-markets-players/345> [Consulta 23.9.2022].

- ✓ IEA – International Energy Agency (s. f.): IEA, [en línia] <https://www.iea.org/> [Consulta 23.9.2022].
- ✓ Jean, Joel/Patrick R. Brown/Robert L. Jaffe/Tonio Buonassisi/Vladimir Bulović (2015): Pathways for solar photovoltaics, en: *Energy & Environmental Science*, Royal Society of Chemistry (RSC), vol. 8, n.o 4, pp. 1200-1219, [en línia] doi:10.1039/c4ee04073b. [Consulta 23.9.2022].
- ✓ JoVE | Peer Reviewed Scientific Video Journal - Methods and Protocols (s. f.): [en línia] <https://www.jove.com/es/v/10328/dye-sensitized-solar-cells?language=Spanish>. [Consulta 25.9.2022].
- ✓ Kabir, F./M.M.H. Bhuiyan/M.S. Manir/M.S. Rahaman/M.A. Khan/T. Ikegami (2019): Development of dye-sensitized solar cell based on combination of natural dyes extracted from Malabar spinach and red spinach, en: *Results in Physics*, Elsevier BV, vol. 14, p. 102474, [en línia] doi:10.1016/j.rinp.2019.102474. [Consulta 25.9.2022].
- ✓ Karim, Nayab Abdul/Umer Mehmood/Hafiza Fizza Zahid/Tahira Asif (2019): Nanostructured photoanode and counter electrode materials for efficient Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs), en: *Solar Energy*, Elsevier BV, vol. 185, pp. 165-188, [en línia] doi:10.1016/j.solener.2019.04.057. [Consulta 25.9.2022].
- ✓ Kim, Ji-Hye/Dong-Hyuk Kim/Ju-Hee So/Hyung-Jun Koo (2021): Toward Eco-Friendly Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs): Natural Dyes and Aqueous Electrolytes, en: *Energies*, MDPI AG, vol. 15, n.o 1, p. 219, [en línia] doi:10.3390/en15010219. [Consulta 25.9.2022].
- ✓ Kowalczyk, M./J. Siuzdak (2017): Photo-reception properties of common LEDs, en: *Opto-Electronics Review*, Elsevier BV, vol. 25, n.o 3, pp. 222-228, [en línia] doi:10.1016/j.opelre.2017.06.009. [Consulta 25.9.2022].
- ✓ Krawczak, Ewelina/Agata Zdyb (2019): The influence of the dye adsorption time on the DSSC performance, en: B. Kaźmierczak/P. Jadwiszczak/M. Kutylowska/U. Miller (eds.), *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, vol. 100, p. 00040, [en línia] doi:10.1051/e3sconf/201910000040. [Consulta 25.9.2022].

- ✓ Krishna, Jonnadula V.S./Madoori Mrinalini/Seelam Prasanthkumar/Lingamalla Giribabu (2019): Recent Advances on Porphyrin Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells, en: *Dye-Sensitized Solar Cells*, Elsevier, pp. 231-284, [en l nia] doi:10.1016/b978-0-12-814541-8.00007-0. [Consulta 27.9.2022].
- ✓ Kuang, Daibin/Seigo Ito/Bernard Wenger/Cedric Klein/Jacques-E Moser/Robin Humphry-Baker/Shaik M. Zakeeruddin/Michael Grätzel (2006): High Molar Extinction Coefficient Heteroleptic Ruthenium Complexes for Thin Film Dye-Sensitized Solar Cells, en: *Journal of the American Chemical Society*, American Chemical Society (ACS), vol. 128, n.o 12, pp. 4146-4154, [en l nia] doi:10.1021/ja058540p. [Consulta 27.9.2022].
- ✓ Kuang, D./C. Klein/S. Ito/J.-E. Moser/R. Humphry-Baker/N. Evans/F. Durrant/C. Grätzel/S. M. Zakeeruddin/M. Grätzel (2007): High-Efficiency and Stable Mesoscopic Dye-Sensitized Solar Cells Based on a High Molar Extinction Coefficient Ruthenium Sensitizer and Nonvolatile Electrolyte, en: *Advanced Materials*, Wiley, vol. 19, n.o 8, pp. 1133-1137, [en l nia] doi:10.1002/adma.200602172. [Consulta 27.9.2022].
- ✓ Kusumawati, Yuly/Aulia S. Hutama/Diana V. Wellia/Riki Subagyo (2021): Natural resources for dye-sensitized solar cells, en: *Heliyon*, Elsevier BV, vol. 7, n.o 12, p. e08436, [en l nia] doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08436. [Consulta 27.9.2022].
- ✓ Lee, Chuan-Pei/Chun-Ting Li/Kuo-Chuan Ho (2017): Use of organic materials in dye-sensitized solar cells, en: *Materials Today*, Elsevier BV, vol. 20, n.o 5, pp. 267-283, [en l nia] doi:10.1016/j.mattod.2017.01.012. [Consulta 27.9.2022].
- ✓ Libretexts (2022): Ground-State Atom, Chemistry LibreTexts, [en l nia] https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Reference/Organic_Chemistry_Glossary/Ground-State_Atom [Consulta 27.9.2022].
- ✓ Liu, Tianyu (2020): Prolonging the Lifetimes of Dye-Sensitized Solar Cells by Positioning Dyes – Chemical Science Blog, [en l nia] <https://blogs.rsc.org/sc/2020/05/19/prolonging-the-lifetimes-of-dye-sensitized-solar-cells-by-positioning->

- [dyes/?doing_wp_cron=1656681551.4002089500427246093750](https://www.energy-sage.com/news/dyes/?doing_wp_cron=1656681551.4002089500427246093750) [Consulta 27.10.2022].
- ✓ Marsh, Jacob (2021): Where is solar energy used?, EnergySage Blog, [en línia] <https://news.energysage.com/where-is-solar-energy-used/> [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ Martín, Julia/María José Navas/Ana María Jiménez-Moreno/Agustín G. Asuero (2017): Anthocyanin Pigments: Importance, Sample Preparation and Extraction, en: *Phenolic Compounds - Natural Sources, Importance and Applications*, InTech, [en línia] doi:10.5772/66892. [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ Mayo, Garcia Susana (2021): Dye-Sensitized Solar Cells: the future of consumer electronics?, DIVA, [en línia] <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1590541&dswid=9474> [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ Mekhilef, S./R. Saidur/A. Safari (2011): A review on solar energy use in industries, en: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier BV, vol. 15, n.o 4, pp. 1777-1790, [en línia] doi:10.1016/j.rser.2010.12.018. [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ Miar, Marzieh/Abolfazl Shiroudi/Khalil Pourshamsian/Ahmad Reza Oliaey/Farhad Hatamjafari (2020): Theoretical investigations on the HOMO–LUMO gap and global reactivity descriptor studies, natural bond orbital, and nucleus-independent chemical shifts analyses of 3-phenylbenzo[*d*]thiazole-2(3*H*)-imine and its *para*-substituted derivatives: Solvent and substituent effects, en: *Journal of Chemical Research*, SAGE Publications, vol. 45, n.o 1-2, pp. 147-158, [en línia] doi:10.1177/1747519820932091. [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ Module Measurement with Load | PVEducation (s. f.): [en línia] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-measurement-with-load> [Consulta 27.10.2022].

- ✓ Module Measurement without Load | PVEducation (s. f.): [en línia] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/module-measurement-without-load>. [Consulta 27.10.2022].
- ✓ Mota, Martí (s. f.): Industrial Waste as Natural Sensitizer for Dye-Sensitized Solar Cell: The example of *Malus domestica*, p. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:EU:0f0e248c-3dc5-464e-b442-119b0ef9321b>. [Consulta 27.10.2022].
- ✓ Nazeeruddin, Md. K./Etienne Baranoff/Michael Grätzel (2011): Dye-sensitized solar cells: A brief overview, en: *Solar Energy*, Elsevier BV, vol. 85, n.o 6, pp. 1172-1178, [en línia] doi:10.1016/j.solener.2011.01.018. [Consulta 28.10.2022].
- ✓ Nazeeruddin, Mohammad K./Filippo De Angelis/Simona Fantacci/Annabella Selloni/Guido Viscardi/Paul Liska/Seigo Ito/Bessho Takeru/Michael Grätzel (2005): Combined Experimental and DFT-TDDFT Computational Study of Photoelectrochemical Cell Ruthenium Sensitizers, en: *Journal of the American Chemical Society*, American Chemical Society (ACS), vol. 127, n.o 48, pp. 16835-16847, [en línia] doi:10.1021/ja0524671. [Consulta 27.10.2022].
- ✓ New Efficiency Benchmark For Dye-sensitized Solar Cells (s. f.): ScienceDaily, [en línia] <https://www.sciencedaily.com/releases/2008/06/080629130741.htm> [Consulta 27.10.2022].
- ✓ Leroy Merlin. (2020). Desk lamp with integrated LED: User manual. [en línia] Retrieved from <https://media.adeo.com/marketplace/82042749/3f417801-5de1-4863-8ec8-3807bec333e6.pdf>. [Consulta 7.11.2022].
- ✓ Obotowo, I.N./I.B. Obot/U.J. Ekpe (2016): Organic sensitizers for dye-sensitized solar cell (DSSC): Properties from computation, progress and future perspectives, en: *Journal of Molecular Structure*, Elsevier BV, vol. 1122, pp. 80-87, [en línia] doi:10.1016/j.molstruc.2016.05.080. [Consulta 27.10.2022].
- ✓ O'Regan, Brian/Michael Grätzel (1991): A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films, en: *Nature*, Springer Science and

- Business Media LLC, vol. 353, n.o 6346, pp. 737-740, [en línia] doi:10.1038/353737a0. [Consulta 27.10.2022].
- ✓ Poma de Girona preveu recol·lectar 88.500 tones de pomes després del rècord de l'any passat (2022): ViladeRoses.cat, [en línia] <https://www.viladeroses.cat/poma-de-girona-preveu-recol·lectar-88-500-tones-de-pomes-despres-del-record-de-lany-passat/> [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ Post Author: Carlos Sotero Gaytan Rivera (2019): Celdas Solares sensibilizadas con colorantes: Factores para mejorar su eficiencia, CienciAcierta, [en línia] <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2019/10/04/celdas-solares-sensibilizadas-con-colorantes-factores-para-mejorar-su-eficiencia/> [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ PVEducation (s. f.): [en línia] <https://www.pveducation.org/> [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ Qin, Yuancheng/Qiang Peng (2012): Ruthenium Sensitizers and Their Applications in Dye-Sensitized Solar Cells, en: *International Journal of Photoenergy*, Hindawi Limited, vol. 2012, pp. 1-21, [en línia] doi:10.1155/2012/291579. [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ Reacciones Redox - Concepto, tipos, aplicaciones y características (s. f.): Concepto, [en línia] <https://concepto.de/reacciones-redox/> [Consulta 27.10.2022].
 - ✓ Rho, Won-Yeop (2015): Dye-sensitized solar cells (DSSCs) have been widely studied due to several advantages, such as low cost-to-performance ratio, low cost of fabrication, functionality at wide angles and low intensities of incident light, mechanical robustness, and low weight. This paper summarizes the recent progress in DSSC technology for improving efficiency, focusing on the active layer in the photoanode, with a part of the DSSC consisting of dyes and a TiO₂ film layer. In particular, this review highlights a huge pool of studies that report improvements in the efficiency of DSSCs using TiO₂ nanotubes, which exhibit better electron transport. Finally, this paper suggests opportunities for future research., [en línia] <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2015/247689/> [Consulta 28.10.2022].

- ✓ Robertson, Neil (2006): Optimizing Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells, en: *Angewandte Chemie International Edition*, Wiley, vol. 45, n.o 15, pp. 2338-2345, [en línea] doi:10.1002/anie.200503083. [Consulta 28.10.2022].
- ✓ Sánchez-De-Armas, Rocío/Emilio Gutiérrez-Beltrán (2016): Nanotecnología inspirada en la naturaleza: celdas solares sensibilizadas con colorante, Encuentros en la Biología, [en línea] <https://www.encuentrosenbiologia.es/2015/12/nanotecnologia-inspirada-en-la-naturaleza-celdas-solares-sensibilizadas-con-colorante/>. [Consulta 28.10.2022].
- ✓ SANTHIARSA, I GUSTI NGURAH NITYA/KOMANG ALIT KUMARA JAYA (2021): Immersion Duration Effect of Purple Leaf Extract (*Graptophyllum Pictum*) on DSSC, en: *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, Institut Teknologi Nasional, Bandung, vol. 9, n.o 4, p. 867, [en línea] doi:10.26760/elkomika.v9i4.867. [Consulta 28.10.2022].
- ✓ Saputro, Aldhi/Adlan Mizan/Nofrijon Sofyan/Akhmad Herman Yuwono (2017): Investigating the effect of various extracting solvents on the potential use of red-apple skin (*Malus domestica*) as natural sensitizer for dye-sensitized solar cell, en: *AIP Conference Proceedings*, Author(s), [en línea] doi:10.1063/1.4979222. [Consulta 28.10.2022].
- ✓ Sawhney, Nipun/Anubhav Raghav/Soumitra Satapathi (2017): Utilization of Naturally Occurring Dyes as Sensitizers in Dye Sensitized Solar Cells, en: *IEEE Journal of Photovoltaics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), vol. 7, n.o 2, pp. 539-544, [en línea] doi:10.1109/jphotov.2016.2639343. [Consulta 2.11.2022].
- ✓ Schanes, Karin/Karin Dobernig/Burcu Gözet (2018): Food waste matters - A systematic review of household food waste practices and their policy implications, en: *Journal of Cleaner Production*, Elsevier BV, vol. 182, pp. 978-991, [en línea] doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.030. [Consulta 2.11.2022].
- ✓ Shalini, S./R. Balasundaraprabhu/T. Satish Kumar/N. Prabavathy/S. Senthilarasu/S. Prasanna (2016): Status and outlook of sensitizers/dyes used in

- dye sensitized solar cells (DSSC): a review, en: *International Journal of Energy Research*, Wiley, vol. 40, n.o 10, pp. 1303-1320, [en l nia] doi:10.1002/er.3538. [Consulta 2.11.2022].
- ✓ Sharma, Khushboo/Vinay Sharma/S. S. Sharma (2018): Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status, en: *Nanoscale Research Letters*, Springer Science and Business Media LLC, vol. 13, n.o 1, [en l nia] doi:10.1186/s11671-018-2760-6. [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ Silicon Solar Cells (s. f.): [en l nia] <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/zhao-a1/> [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ Snaith, Henry J. (2010): Estimating the Maximum Attainable Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cells, en: *Advanced Functional Materials*, Wiley, vol. 20, n.o 1, pp. 13-19, [en l nia] doi:10.1002/adfm.200901476.
 - ✓ Study.com | Take Online Courses. Earn College Credit. Research Schools, Degrees & Careers (s. f.): [en l nia] <https://study.com/learn/lesson/electrode-overview-types-examples.html> [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ Svarc, Jason (2022): Most efficient solar panels 2022 — Clean Energy Reviews, CLEAN ENERGY REVIEWS, [en l nia] <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/most-efficient-solar-panels> [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ Teoli, F./S. Lucioli/P. Nota/A. Frattarelli/F. Matteocci/A.Di Carlo/E. Caboni/C. Forni (2016): Role of pH and pigment concentration for natural dye-sensitized solar cells treated with anthocyanin extracts of common fruits, en: *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Elsevier BV, vol. 316, pp. 24-30, [en l nia] doi:10.1016/j.jphotochem.2015.10.009. [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ This Month in Physics History (s. f.): [en l nia] <https://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm> [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ Thomas, Sara/T. G. Deepak/G. S. Anjusree/T. A. Arun/Shantikumar V. Nair/A. Sreekumaran Nair (2014): A review on counter electrode materials in dye-

- sensitized solar cells, en: *J. Mater. Chem. A*, Royal Society of Chemistry (RSC), vol. 2, n.o 13, pp. 4474-4490, [en línia] doi:10.1039/c3ta13374e. [Consulta 2.11.2022].
- ✓ Tran, Phong D./Lydia H. Wong/James Barber/Joachim S. C. Loo (2012): Recent advances in hybrid photocatalysts for solar fuel production, en: *Energy & Environmental Science*, Royal Society of Chemistry (RSC), vol. 5, n.o 3, p. 5902, [en línia] doi:10.1039/c2ee02849b. [Consulta 3.11.2022].
 - ✓ Tsakalakos, Loucas (2008): Nanostructures for photovoltaics, en: *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Elsevier BV, vol. 62, n.o 6, pp. 175-189, [en línia] doi:10.1016/j.mser.2008.06.002. [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ Wang, Hui/Yiyu Feng/Huitao Yu/Liqi Dong/Fei Zhai/Junwen Tang/Jing Ge/Wei Feng (2021): Utilisation of photo-thermal energy and bond enthalpy based on optically triggered formation and dissociation of coordination bonds, en: *Nano Energy*, Elsevier BV, vol. 89, p. 106401, [en línia] doi:10.1016/j.nanoen.2021.106401. [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ Wang, Yan/Changjiao Sun/Xiang Zhao/Bo Cui/Zhanghua Zeng/Anqi Wang/Guoqiang Liu/Haixin Cui (2016): The Application of Nano-TiO₂ Photo Semiconductors in Agriculture, en: *Nanoscale Research Letters*, Springer Science and Business Media LLC, vol. 11, n.o 1, [en línia] doi:10.1186/s11671-016-1721-1. [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ Wang, Yiou/Hajime Suzuki/Jijia Xie/Osamu Tomita/David James Martin/Masanobu Higashi/Dan Kong/Ryu Abe/Junwang Tang (2018): Mimicking Natural Photosynthesis: Solar to Renewable H₂ Fuel Synthesis by Z-Scheme Water Splitting Systems, en: *Chemical Reviews*, American Chemical Society (ACS), vol. 118, n.o 10, pp. 5201-5241, [en línia] doi:10.1021/acs.chemrev.7b00286. [Consulta 2.11.2022].
 - ✓ World Energy Outlook 2021 – Analysis (s. f.): IEA, [en línia] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021> [Consulta 2.11.2022].

- ✓ Yang, Nailiang/Jin Zhai/Dan Wang/Yongsheng Chen/Lei Jiang (2010): Two-Dimensional Graphene Bridges Enhanced Photoinduced Charge Transport in Dye-Sensitized Solar Cells, en: *ACS Nano*, American Chemical Society (ACS), vol. 4, n.o 2, pp. 887-894, [en línia] doi:10.1021/nn901660v. [Consulta 5.11.2022].
- ✓ Ye, Meidan/Xiaoru Wen/Mengye Wang/James Iocozzia/Nan Zhang/Changjian Lin/Zhiqun Lin (2015): Recent advances in dye-sensitized solar cells: from photoanodes, sensitizers and electrolytes to counter electrodes, en: *Materials Today*, Elsevier BV, vol. 18, n.o 3, pp. 155-162, [en línia] doi:10.1016/j.mattod.2014.09.001. [Consulta 5.11.2022].
- ✓ Zdyb, Agata/Ewelina Krawczak (2021): Organic Dyes in Dye-Sensitized Solar Cells Featuring Back Reflector, en: *Energies*, MDPI AG, vol. 14, n.o 17, p. 5529, [en línia] doi:10.3390/en14175529. [Consulta 5.11.2022].
- ✓ Zhang, Dan/Marko Stojanovic/Yameng Ren/Yiming Cao/Felix T. Eickemeyer/Etienne Socie/Nick Vlachopoulos/Jacques-E. Moser/Shaik M. Zakeeruddin/Anders Hagfeldt/Michael Grätzel (2021): A molecular photosensitizer achieves a Voc of 1.24 V enabling highly efficient and stable dye-sensitized solar cells with copper(II/I)-based electrolyte, en: *Nature Communications*, Springer Science and Business Media LLC, vol. 12, n.o 1, [en línia] doi:10.1038/s41467-021-21945-3. [Consulta 7.11.2022].

6 INDEX DE FIGURES, IL·LUSTRACIONS I TAULES

6.1 INDEX DE FIGURES

FIGURA 1. MIX ENERGÈTIC EN FUNCIO DEL TEMPS (PASSAT, ACTUALITAT I PREVISIÓ DE FUTUR)	7
FIGURA 2. MECANISME DE FUNCIONAMENT DE LA DSSC.	23
FIGURA 3. EVOLUCIÓ DEL NOMBRE DE PUBLICACIONS AL LLARG DELS ANYS.....	26
FIGURA 4. ORBITALS ATÒMICS DE L'ÀTOM D'OXIGEN.	30
FIGURA 5. ORBITALS MOLECULARS DE LA MOLÈCULA DE NITROGEN.	31
FIGURA 6. FOTOEXCITACIÓ DE L'ELECTRÓ DE ORBITAL HOMO AL LUMO.	32
FIGURA 7. ESTRUCTURA MOLECULAR D'UN SENSIBILITZADOR.	34
FIGURA 8. ESQUEMA IL·LUSTRATIVA DEL PRINCIPI DE FUNCIONAMENT DELS GRUPS D'ANCORATGE.....	35
FIGURA 9. EXEMPLES DE GRUPS D'ANCORATGE.	35
FIGURA 10. ESPECTRE D'EMISSIÓ SOLAR DELS 0 NM ALS 3000 NM (IRRADIÀNCIA EN FUNCIO DE LA LONGITUD D'ONA).....	37
FIGURA 11. SUPERPOSICIÓ ENTRE L'ESPECTRE SOLAR (NEGRE) I L'ESPECTRE D'ABSORCIÓ DE DOS DIFERENTS	37
FIGURA 12. TIPUS DE SENSIBILITZADORS.	38
FIGURA 13. EXEMPLES DE COMPOSTOS DE RUTENI.....	41
FIGURA 14. EXEMPLES DE COMPOSTOS ORGÀNICS.	43
FIGURA 15. POSICIONS QUE POT OCUPAR UN ENLLAÇ CONJUGAT.	44
FIGURA 16. COLORANTS NATURALS MÉS DESTACABLES (A-ANTOCIANINA, B-FLAVONOIDE, C-CAROTENOIDE, D-CLOROFIL·LA I E-BETANINA).....	49
FIGURA 17. ESTRUCTURA DE BANDES EN UN CONDUCTOR ELÈCTRIC, UN AÏLLANT ELÈCTRIC I UN SEMICONDUCTOR ELÈCTRIC..	53
FIGURA 18. EXCITACIÓ DE LA BAND GAP D'UN SEMICONDUCTOR.....	55
FIGURA 19. MATERIALS ORGÀNICS POLIMÈRICS USATS EN LA PREPARACIÓ DEL TiO ₂	57
FIGURA 20. ESTRUCTURA DE LA MOLÈCULA DE ANATASA (TiO ₂).	58
FIGURA 21. ESQUEMA DE L'ESTRUCTURA DE LA DSSC.	66
FIGURA 22. PRINCIPI DE FUNCIONAMENT DE LA DSSC.....	68
FIGURA 23. ESTRUCTURA DE L'ETANOL.	80
FIGURA 24. ESQUEMA DE RECOBRIMENT DEL VIDRE FTO.	85
FIGURA 25. ESQUEMA DE IMPREGNACIÓ DELS SUBSTRATS AMB SENSIBILITZADORS.	86
FIGURA 26. ESQUEMA D'ASSEMBLATGE DE LES DSSCS.	87
FIGURA 27. REPRESENTACIÓ GRÀFICA D'UNA ONA.	92
FIGURA 28. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE L'ANGLE θ	97

FIGURA 29. SENZILL ESQUEMA DEL CIRCUIT EMPRAT PER MESURAR LA I_{PD} DE LA FONT LLUMINOSA.	102
FIGURA 30. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DEL FF.	107
FIGURA 31. SENZILL ESQUEMA DEL CIRCUIT EMPRAT PER MESURAR VALORS DE V_{oc} I I_{sc} DE LES QUATRE DSSCS.	110
FIGURA 32. SENZILL ESQUEMA DEL CIRCUIT EMPRAT PER MESURAR ELS DIFERENTS VALORS DE VOLTATGE EN UNA DETERMINADA RESISTÈNCIA.	111
FIGURA 33. REPRESENTACIÓ GRÀFICA DE L'ABSORBÀNCIA I LES MAGNITUDS ESMENTADES.	113
FIGURA 34. ESQUEMA D'UN ESPECTROFOTÒMETRE.	116
FIGURA 35. SENZILL ESQUEMA DEL CIRCUIT EMPRAT PER MESURAR ELS DIFERENTS VALORS DE I_0 I PER CADA LONGITUD D'ONA.	117
FIGURA 36. SENZILL ESQUEMA DEL CIRCUIT EMPRAT PER MESURAR ELS DIFERENTS VALORS DE I_{sc} PER CADA LONGITUD D'ONA.	118
FIGURA 37. CORBA DE LA INTENSITAT (MESURADA EN MA) EN FUNCIÓ DEL VOLTATGE (MESURAT EN V) DE LA DSSC CONFECCIONADA A PARTIR DE SENSIBILITZADOR DE POMA VERMELLA.	120
FIGURA 38. CORBA DE LA INTENSITAT (MESURADA EN MA) EN FUNCIÓ DEL VOLTATGE (MESURAT EN V) DE LA DSSC CONFECCIONADA A PARTIR DE SENSIBILITZADOR DE RESIDU DE SUC DE POMA VERMELLA.	120
FIGURA 39. CORBA DE LA INTENSITAT (MESURADA EN MA) EN FUNCIÓ DEL VOLTATGE (MESURAT EN V) DE LA DSSC CONFECCIONADA A PARTIR DE SENSIBILITZADOR DE POMA VERDA.	121
FIGURA 40. CORBA DE LA INTENSITAT (MESURADA EN MA) EN FUNCIÓ DEL VOLTATGE (MESURAT EN V) DE LA DSSC CONFECCIONADA A PARTIR DE SENSIBILITZADOR DE POMA VERMELLA PODRIDA.	121
FIGURA 41. CORBA DE LA DENSITAT D'INTENSITAT (MESURADA EN MA/CM ²) I LA DENSITAT DE POTÈNCIA (MESURADA EN MW/CM ²) EN FUNCIÓ DEL VOLTATGE (MESURAT EN V) DE LA DSSC CONFECCIONADA A PARTIR DE SENSIBILITZADOR DE POMA VERMELLA.	122
FIGURA 42. CORBA DE LA DENSITAT D'INTENSITAT (MESURADA EN MA/CM ²) I LA DENSITAT DE POTÈNCIA (MESURADA EN MW/CM ²) EN FUNCIÓ DEL VOLTATGE (MESURAT EN V) DE LA DSSC CONFECCIONADA A PARTIR DE SENSIBILITZADOR DE RESIDU DE SUC DE POMA VERMELLA.	123
FIGURA 43. CORBA DE LA DENSITAT D'INTENSITAT (MESURADA EN MA/CM ²) I LA DENSITAT DE POTÈNCIA (MESURADA EN MW/CM ²) EN FUNCIÓ DEL VOLTATGE (MESURAT EN V) DE LA DSSC CONFECCIONADA A PARTIR DE SENSIBILITZADOR DE POMA VERDA.	123
FIGURA 44. CORBA DE LA DENSITAT D'INTENSITAT (MESURADA EN MA/CM ²) I LA DENSITAT DE POTÈNCIA (MESURADA EN MW/CM ²) EN FUNCIÓ DEL VOLTATGE (MESURAT EN V) DE LA DSSC CONFECCIONADA A PARTIR DE SENSIBILITZADOR DE POMA VERMELLA PODRIDA.	124
FIGURA 45. ABSORBÀNCIA (%) DELS QUATRE COLORANTS ESTUDIATS EN FUNCIÓ DE LA LONGITUD D'ONA (MESURADA EN NM), CONCRETAMENT A L'INTERVAL DE L'ESPECTRE VISIBLE (400 NM – 665 NM).	126
FIGURA 46. COEFICIENT D'EXTINCIÓ MOLAR DELS QUATRE COLORANTS ESTUDIANTS (L·G ⁻¹ ·CM ⁻¹) EN FUNCIÓ DE LA LONGITUD D'ONA (MESURADA EN NM), CONCRETAMENT A L'INTERVAL DE L'ESPECTRE VISIBLE (400 NM – 665 NM).	127
FIGURA 47. EFICIÈNCIA DE CONVERSIÓ DE FOTONS INCIDENTS DELS QUATRE COLORANTS (%) ESTUDIATS EN FUNCIÓ DE LA LONGITUD D'ONA (MESURADA EN NM), CONCRETAMENT A L'INTERVAL DE L'ESPECTRE VISIBLE (400 NM – 665 NM).	128

FIGURA 48. IRRADIACIÓ (MESURADA EN kWh/m ²) EN FUNCIO DEL TEMPS (ELS 12 MESOS DE L'ANY) A LA PROVINCIA DE GIRONA.	140
FIGURA 49. IRRADIANCIA (MESURADA EN W/m ²) EN FUNCIO DEL TEMPS (ELS 12 MESOS DE L'ANY) A LA PROVINCIA DE GIRONA.	141
FIGURA 50. POTÈNCIA MÀXIMA DESENVOLUPADA PER LA DSSC A CADA MES DE L'ANY.	142
FIGURA 51. ENERGIA DESENVOLUPADA PER L'HIPOTÈTIC SISTEMA PLANTEJAT PER CADA MES DE L'ANY.	143
FIGURA 52. ENERGIA ELÈCTRICA CONSUMIDA PER CADA SECTOR DE LA PROVINCIA DE GIRONA.	144
FIGURA 53. COMPARATIVA FINAL ENTRE L'ENERGIA TOTAL PRODUÏDA I LA DEMANDA ENERGÈTICA EN UN ANY.	144
FIGURA 54. GRÀFIC DE RÈCORDS D'EFICIÈNCIES DE TOTES LES CEL·LES SOLARS.	149
FIGURA 55. INTENSITAT DE CIRCUIT CURT (mA) I VOLTATGE DE CIRCUIT OBERT (V) EN FUNCIO DEL TEMPS (DIES).	153
FIGURA 56. POTÈNCIA (EN mW) EN FUNCIO DEL TEMPS (DIES).	154
FIGURA 57. PREU DELS DIFERENTS COMPONENTS ESCALATS A LES QUANTITATS NECESSÀRIES PER PORTAR A TERME LA PROPOSTA.	155
FIGURA 58. COMPARATIVA FINAL ENTRE EL SISTEMA PROPOSAT I L'ÚS DE PLAQUES CONVENCIONALS DE SILICI PER COBRIR LA MATEIXA SUPERFÍCIE.	156

6.2 INDEX DE IL·LUSTRACIONS

IL·LUSTRACIÓ 1. MICROGRAFIA ELECTRÒNICA D'UNA PEL·LÍCULA DE TiO ₂ DIPOSITADA SOBRE VIDRE FTO.	20
IL·LUSTRACIÓ 2. RESUM DE TOT EL PROCEDIMENT.	88
IL·LUSTRACIÓ 3. SENSIBILITZADORS SINTETITZATS.	88
IL·LUSTRACIÓ 4. FOTOÀNODES CONSTRUÏTS.	89
IL·LUSTRACIÓ 5. DSSCs CONSTRUÏDES.	89
IL·LUSTRACIÓ 6. ESPECTROFOTÒMETRE DE LABORATORI.	115
IL·LUSTRACIÓ 7. CAPTURA DE PANTALLA DE LA PÀGINA WEB PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM.	136
IL·LUSTRACIÓ 8. EXEMPLES D'APLICACIONS DE DSSCs EN VIDRES DECORATS.	160
IL·LUSTRACIÓ 9. LES QUATRE MOSTRES ABANS D'INTRODUIR-SE AL FORN.	I
IL·LUSTRACIÓ 10. LES QUATRE MOSTRES DESPRÉS DEL PRIMER ASSECAT.	II
IL·LUSTRACIÓ 11. LES QUATRE MOSTRES TRITURADES.	II
IL·LUSTRACIÓ 12. LES QUATRE MOSTRES DESPRÉS DEL SEGON ASSECAT.	II
IL·LUSTRACIÓ 13. LES QUATRE MOSTRES AL FORN.	II
IL·LUSTRACIÓ 14. MATERIALS EMPRATS EN LA PREPARACIÓ DE LES SOLUCIONS.	III
IL·LUSTRACIÓ 15. BARREJA DE LES MOSTRES AMB L'ETANOL I ESCALFAMENT D'AQUESTA SOLUCIÓ.	III
IL·LUSTRACIÓ 16. FILTRACIÓ DE LES SOLUCIONS.	IV
IL·LUSTRACIÓ 17. MATERIALS USATS EN LA CONSTRUCCIÓ DE LES DSSCs.	IV
IL·LUSTRACIÓ 18. PASTA DE DISPERSIÓ D'ÒXID DE TITANI.	V
IL·LUSTRACIÓ 19. ELÈCTROLIT (PARELLA REDOX I ⁻ /I ₃ ⁻).	V

IL·LUSTRACIÓ 20. IDENTIFICACIÓ DE LA CARA CONDUCTORA.....	V
IL·LUSTRACIÓ 21. NETEJA DELS VIDRES FTO.	V
IL·LUSTRACIÓ 22. ESCALFAMENT DELS VIDRES FTO.	VI
IL·LUSTRACIÓ 23. RECOBRIMENT DELS VIDRES FTO AMB PASTA DE TiO ₂ USANT LA TÈCNICA “DOCTOR BLADE”.....	VI
IL·LUSTRACIÓ 24. PREPARACIÓ DELS FOTOÀNODES AMB CINTA ADHESIVA PER TAL D’USAR LA TÈCNICA “DOCTOR BLADE”.....	VI
IL·LUSTRACIÓ 25. VIDRES FTO ESCALFATS.....	VI
IL·LUSTRACIÓ 26. INTRODUCCIÓ DEL SEMICONDUCTOR SOBRE ELS VIDRES FTO.....	VI
IL·LUSTRACIÓ 27. IMPREGNACIÓ DELS SUBSTRATS AMB SENSIBILITZADOR.	VII
IL·LUSTRACIÓ 28. RECOBRIMENT DELS VIDRES FTO AMB GRAFIT.....	VII
IL·LUSTRACIÓ 29. INTRODUCCIÓ DE L’ELECTRÒLIT A LA DSSC.....	VIII
IL·LUSTRACIÓ 30. SISTEMA DE RESISTÈNCIES USAT PER CARACTERITZAR LES DSSCs.....	XI
IL·LUSTRACIÓ 31. RESISTÈNCIES ELÈCTRIQUES.	XI
IL·LUSTRACIÓ 32. PAPERS DE CEL·LOFANA DE COLORS.....	XII
IL·LUSTRACIÓ 33. SENSIBILITZADORS DE POMA.....	XII
IL·LUSTRACIÓ 34. FOTODÍODES.	XII
IL·LUSTRACIÓ 35. CARTELLS.....	XV
IL·LUSTRACIÓ 36. ELABORACIÓ DE SUC I SUCS.	XVI
I IL·LUSTRACIÓ 37. POMERES I PAISATGES.....	XVII
I IL·LUSTRACIÓ 38. SOLUCIÓ EN REPÒS AMB ELS FOTOÀNODES A L’INTERIOR.	XX
IL·LUSTRACIÓ 39. MESURA DEL VOLUM INICIAL DE COLORANT.....	XX

6.3 INDEX DE TAULES

TAULA 1. RÈCORDS D’EFICIÈNCIA MÉS DESTACABLES.....	26
TAULA 2. CARACTERÍSTIQUES DE LES MOSTRES USADES.....	79
TAULA 3. RECURR FINAL DE TOTS ELS RESULTATS FOTOELECTROQUÍMICS OBTINGUTS.....	125

7 GLOSSARI DE SÍMBOLS

HOMO	→ Orbital amb electrons de major energia
AM	→ Massa d'aire
CB	→ Banda de conducció
CE	→ Contraelèctrode
DSSC	→ Cel·la solar sensibilitzada amb colorant
FTO	→ Òxid d'estany banyat en fluor
LUMO	→ Orbital amb electrons de menor energia
Si	→ Silici
TiO ₂	→ Òxid de titani (IV)
VB	→ Banda de valència
WE	→ Elèctrode de treball
FF	→ Factor de filtre
I _{sc}	→ Intensitat de circuit curt
V _{oc}	→ Voltatge de circuit obert
J _{sc}	→ Densitat d'intensitat de circuit curt
P _{in}	→ Potència incident
P _{theo}	→ Potència teòrica
P _{max}	→ Potència màxima
PCE/η	→ Eficiència de conv. elèctrica
IPCE	→ Eficiència. de conv. de fotons incidents

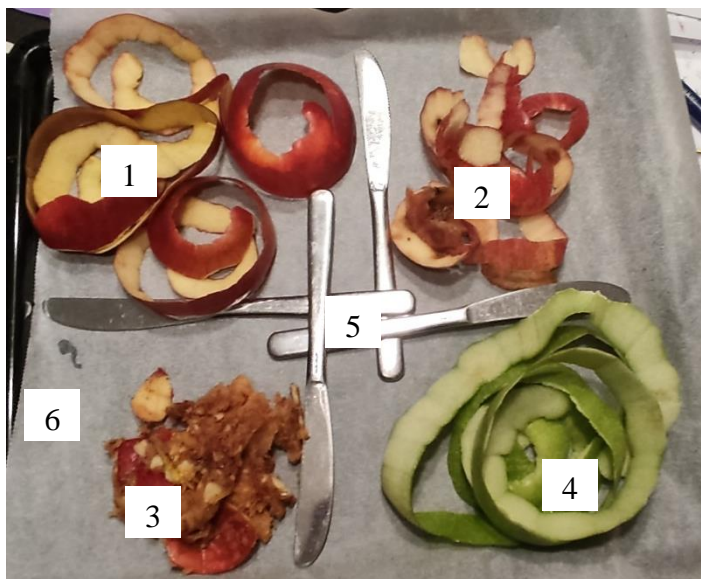
8 ANNEXOS

ANNEXOS DE LA PRIMERA SECCIÓ

Annex 1: Procediment i materials emprats en la extracció dels colorants i la construcció de les DSSCs

Extracció del sensibilitzador natural de les pomes

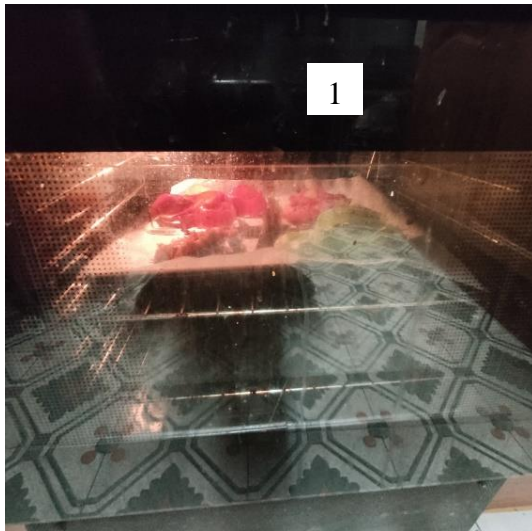
Preparació de les mostres



- 1 Poma vermella.
- 2 Poma vermella podrida.
- 3 Residu de suc de poma.
- 4 Poma verda.
- 5 Ganivets.
- 6 Paper vegetal sulfuritzat.

Il·lustració 9. Les quatre mostres abans d'introduir-se al forn.

Font: Elaboració pròpia.



1 Forn de cuina convencional.

Il·lustració 13. Les quatre mostres al forn.
Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 10. Les quatre mostres després del primer assecat.
Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 11. Les quatre mostres triturades.
Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 12. Les quatre mostres després del segon assecat.
Font: Elaboració pròpia.

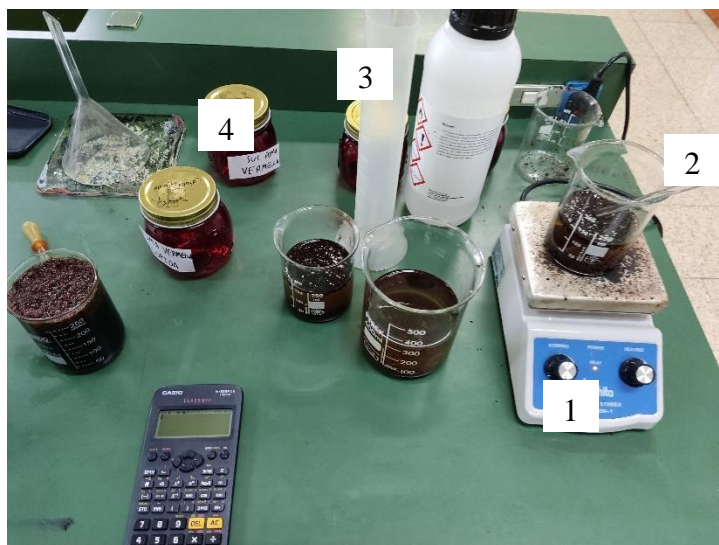
Preparació de la solució sensibilitzadora



- 1 Etanol 96%
- 2 Poma vermella podrida.
- 3 Embut de vidre.
- 4 Vasos de precipitats.
- 5 Bosses de plàstic per a mostres (amb les mostres).

Il·lustració 14. Materials emprats en la preparació de les solucions.

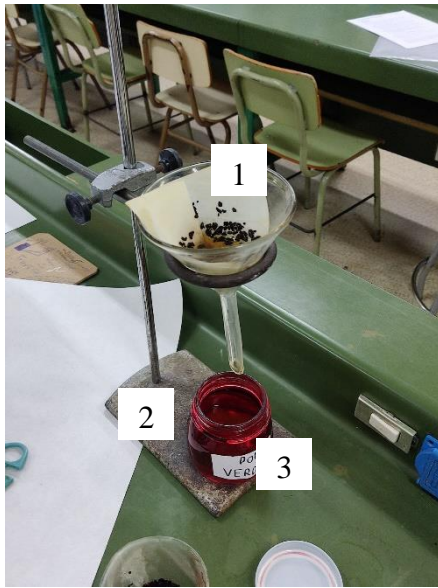
Font: Elaboració pròpia.



- 1 Placa calefactora.
- 2 Vareta de vidre.
- 3 Proveta de plàstic de 250 ml.
- 4 Pots de vidre fosc de 200 ml.

Il·lustració 15. Barreja de les mostres amb l'etanol i escalfament d'aquesta solució.

Font: Elaboració pròpia.

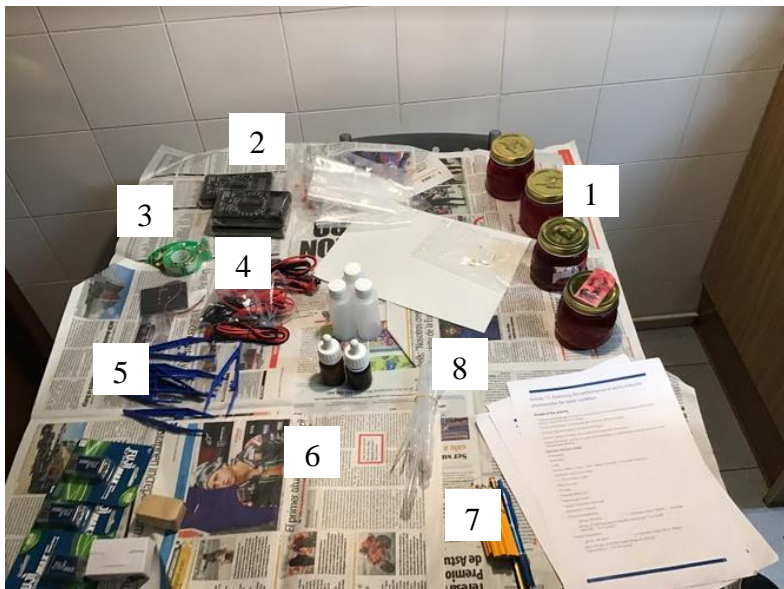


- 1 Paper de filtre.
- 2 Suport universal.
- 3 Etiquetes adhesives.

Il·lustració 16. Filtració de les solucions.

Font: Elaboració pròpia.

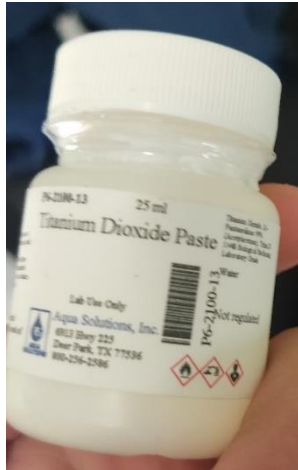
Preparació de les DSSCs orgàniques



- 1 Sensibilitzadors.
- 2 Multímetre.
- 3 Cinta adhesiva.
- 4 Pines de cocodril.
- 5 Pines de plàstic.
- 6 Paper de diari.
- 7 Llapis de grafit.
- 8 Pipetes de plàstic

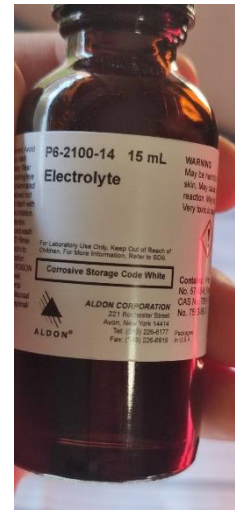
Il·lustració 17. Materials usats en la construcció de les DSSCs.

Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 18. Pasta de dispersió d'òxid de titani.

Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 19. Electròlit (parella redox I^-/I_3^-).

Font: Elaboració pròpia.

Preparació dels substrats



Il·lustració 21. Neteja dels vidres FTO.

Font: Elaboració pròpia.

1 Aigua



Il·lustració 20. Identificació de la cara conductora.

Font: Elaboració pròpia.

1 Vidre FTO

Preparació dels fotoànodes



Il·lustració 24. Preparació dels fotoànodes amb cinta adhesiva per tal d'usar la tècnica "Doctor blade".

Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 26. Introducció del semiconductor sobre les vidres FTO.

Font: Elaboració pròpia.



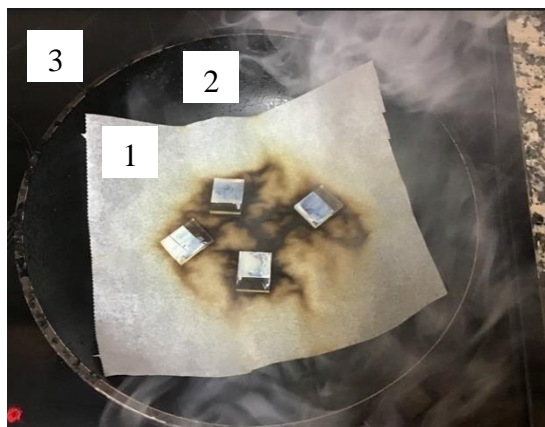
Il·lustració 22. Recobriments dels vidres FTO amb pasta de TiO_2 usant la tècnica "Doctor blade".

Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 23. Escalfament dels vidres FTO.

Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 25. Vidres FTO escalfats.

Font: Elaboració pròpia.

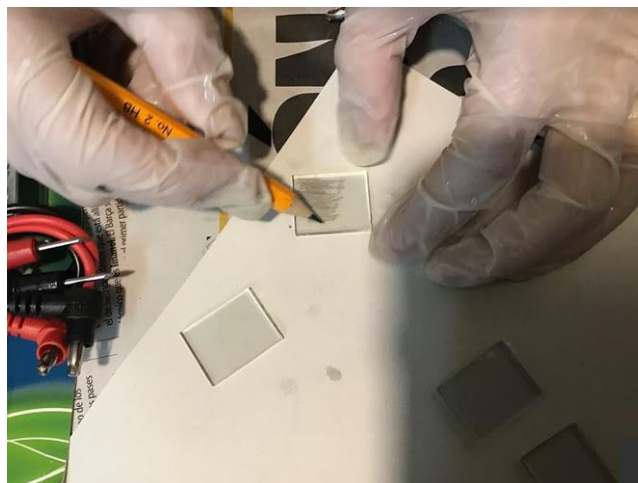
- 1 Paper vegetal sulfuritzat.
- 2 Paella.
- 3 Vitroceràmica convencional.



Il·lustració 27. Impregnació dels substrats amb sensibilitzador.

Font: Elaboració pròpia.

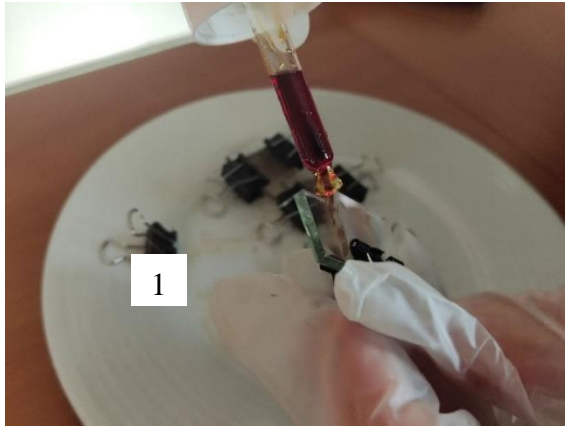
Preparació dels contraelèctrodes



Il·lustració 28. Recobriments dels vidres FTO amb grafit.

Font: Elaboració pròpia.

Assemblatge de les DSSCs



1 Pinces porta notes.

Il·lustració 29. Introducció de l'electròlit a la DSSC.

Font: Elaboració pròpia.

Annex 2: Càlculs en l'elaboració del sensibilitzador

Massa de les mostres

$$m_{mostra} = m - m_0$$

✓ **Poma vermella**

$$m_{mostra} = 118.34 \text{ g} - 105.13 \text{ g} = 13.21 \text{ g}$$

✓ **Residu de suc de poma**

$$m_{mostra} = 120.88 \text{ g} - 105.42 \text{ g} = 15.46 \text{ g}$$

✓ **Poma verda**

$$m_{mostra} = 111.17 \text{ g} - 102.77 \text{ g} = 8.4 \text{ g}$$

✓ **Poma vermella podrida**

$$m_{mostra} = 111.21 \text{ g} - 104.91 \text{ g} = 6.3 \text{ g}$$

Volum d'etanol necessari

$$V_{etanol} = m_{mostra} \cdot \frac{100 \text{ ml etanol}}{5 \text{ g mostra}}$$

✓ **Poma vermella**

$$V_{etanol} = 13.21 \text{ g} \cdot \frac{100 \text{ ml etanol}}{5 \text{ g mostra}} = 262.2 \text{ ml}$$

✓ **Residu de suc de poma**

$$V_{etanol} = 15.46 \text{ g} \cdot \frac{100 \text{ ml etanol}}{5 \text{ g mostra}} = 309.2 \text{ ml}$$

✓ **Poma verda**

$$V_{etanol} = 8.4 \text{ g} \cdot \frac{100 \text{ ml etanol}}{5 \text{ g mostra}} = 168 \text{ ml}$$

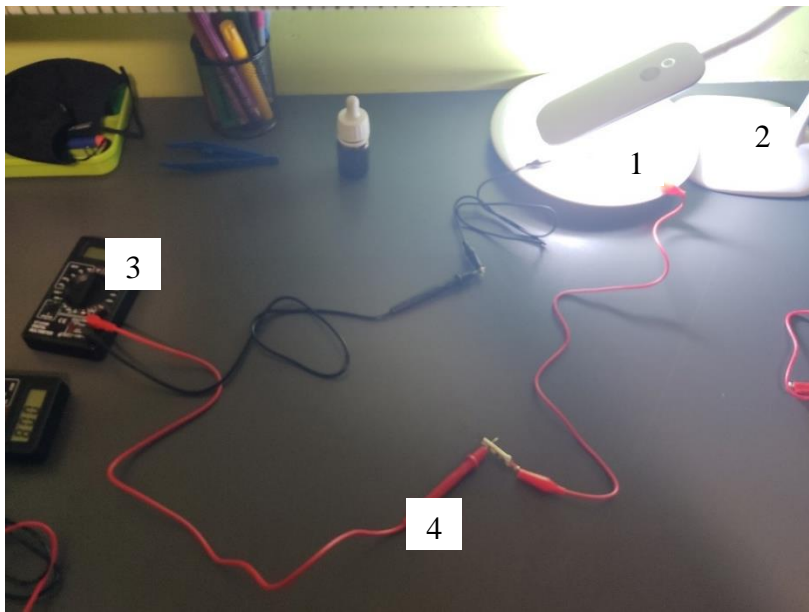
✓ **Poma vermella podrida**

$$V_{etanol} = 6.3 \text{ g} \cdot \frac{100 \text{ ml etanol}}{5 \text{ g mostra}} = 126 \text{ ml}$$

ANNEXOS DE LA SEGONA SECCIÓ

Annex 3: Materials i eines emprades en la caracterització de les DSSCs

Paràmetres elèctrics



- 1 DSSCs naturals.
- 2 Làmpada LED (ADEO).
- 3 Multímetre.
- 4 Pines de cocodril.

Il·lustració 30. Sistema de resistències usat per caracteritzar les DSSCs.

Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 31. Resistències elèctriques.

Font: Elaboració pròpia.

Tècniques òptiques d'anàlisi



Il·lustració 34. Fotodíodes.

Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 32. Papers de cel·lofana de colors.

Font: Elaboració pròpia.



Il·lustració 33. Sensibilitzadors de poma.

Font: Elaboració pròpia.

- 1 Sensibilitzadors naturals.
- 2 Pots de vidre petits.

Annex 4: Taules de dades per a la caracterització de les DSSCs

TÈCNiques ÒPTIQUES D'ANÀLISI

Longitud d'ona	Poma vermella	Residu de suc de poma	Poma verda	Poma vermella podrida
ABSORBANCIA (%)				
400	39,794	52,288	45,593	52,288
470	30,103	23,408	38,021	47,7121
550	36,798	30,103	54,407	54,407
600	35,218	47,712	35,218	47,712
630	30,103	24,988	27,47	30,103
665	30,103	20,411	42,597	32,906
COEFICIENT D'EXTINCIÓ MOLAR (L·g⁻¹·cm⁻¹)				
400	0,00159176	0,00209152	0,00182372	0,00209152
470	0,00120412	0,00093632	0,00152084	0,001908484
550	0,00147192	0,00120412	0,00217628	0,00217628
600	0,00140872	0,00190848	0,00140872	0,00190848
630	0,00120412	0,00099952	0,0010988	0,00120412
665	0,00120412	0,00081644	0,00170388	0,00131624
EFICIÈNCIA DE CONVERSIÓ DE FOTONS INCIDENTS (%)				
400	12,91667	21,6432	2,45675	3,68125
470	58,6288416	57,91377	87,80585	12,53191
550	31,31313	21,44567	30,37094	1,33863
600	17,22222	9,07317	19,651675	2,45416
630	30,07055	14,40184	26,5143	2,3373
665	2,58981	1,36438	7,387906	1,10714

PARÀMETRES ELÈCTICS

Resistència (Ω)	Voltatge (V)	Intensitat (mA)	Densitat d'intensitat (mA/cm ²)	Densitat de potència (mW/cm ²)
POMA VERMELLA				
0	0	0,004	0,001	0
1000	0,0034	0,0034	0,00085	0,00000289
10000	0,021	0,0021	0,000525	0,000011025
47000	0,027	0,000574	0,0001435	3,8745E-06
100000	0,0276	0,000276	0,000069	1,9044E-06
470000	0,029	0,000061	0,00001525	4,4225E-07
1000000	0,03	0,00003	0,0000075	0,000000225
∞	0,0315	0	0	0
RESIDU DE SUC DE POMA				
0	0	0,0048	0,0012	0
1000	0,005	0,005	0,00125	0,00000625
10000	0,0282	0,00282	0,000705	0,000019881
47000	0,0472	0,001	0,00025	0,0000118
100000	0,054	0,00054	0,000135	0,00000729
470000	0,062	0,00013	0,0000325	0,000002015
1000000	0,0623	0,0000623	0,000015575	9,70323E-07
∞	0,0625	0	0	0
POMA VERDA				
0	0	0,0071	0,001775	0
1000	0,0069	0,0069	0,001725	1,19025E-05
10000	0,0406	0,00406	0,001015	0,000041209
47000	0,06	0,00128	0,00032	0,0000192
100000	0,069	0,00069	0,0001725	1,19025E-05
470000	0,0745	0,00016	0,00004	0,00000298
1000000	0,076	0,000076	0,000019	0,000001444
∞	0,082	0	0	0
POMA VERMELLA PODRIDA				
0	0	0,0019	0,000475	0
1000	0,0013	0,0013	0,000325	4,225E-07
10000	0,007	0,0007	0,000175	0,000001225
47000	0,0118	0,00025	0,0000625	7,375E-07
100000	0,0137	0,000137	0,00003425	4,69225E-07
470000	0,0161	0,0000342	0,00000855	1,37655E-07
1000000	0,019	0,000019	0,00000475	9,025E-08
∞	0,0235	0	0	0

ANNEXOS DE LA TERCERA SECCIÓ

Annex 5: Fotos de la visita al Mooma



Il·lustració 35. Cartells

Font: Elaboració pròpia.

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA



Il·lustració 36. Elaboració de suc i succs.

Font: Elaboració pròpia.

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA



Il·lustració 37. Pomes i paisatges
Font: Elaboració pròpia.

Annex 6: Entrevista a Llorenç Frigola

Aquesta entrevista realitzada el 20 d'agost de 2022 a Llorenç Frigola, director gerent del Mooma, pretén conèixer el funcionament del Mooma, el residu de poma produït i la seva disposició a participar en una iniciativa com la que aquest projecte proposa. A continuació es mostren les preguntes i les seves respectives respostes:

1. Quines pomes useu per elaborar suc?

“La Gala”, “la Fuji”, “la Granny Smith” i “la Pink Lady” van a suc. Llavors les altres (Vermelles americanes i Golden), a vegades les barregem en altres sucus tot i que intentem de no incorporar-les i només ho fem en el suc que s’hi sembli més.

2. La collita de pomes varia molt d'un any a l'altre? Quines són les principals causes d'això? El clima hi té una gran influència?

Totalment, nosaltres collim des de primera setmana d'agost fins a octubre/novembre. Aquest any per exemple, per culpa de la calor estem llançant entre un 35% i un 50% de les pomes. La varietat que toca “La Gala” ha quedat cuïta sota les malles (a 42 °C en comptes de 16 °C). Degut a aquesta calor i l'alta humitat la part baixa de l'arbre ha quedat groga i esquerdada. Tot i això, realment aquí Girona tenim molt bon clima i gràcies a la “malla negra” una idea del meu pare, hem aconseguit que la “Granny Smith” no quedi tan groga i que la tramuntana no la perjudiqui tant. Gràcies a això Girona s’ha convertit en la màxima productora d'Espanya de “Granny Smith” (entre el 50% i el 60%)

3. Quantes tones de poma produïu en un any? Quantes tones de poma empreu per a la producció de suc de poma? Quants litres de suc de poma produïu en un any? Quina quantitat de residu de suc de poma produïu en un any?

De 4000 tones de poma produïdes cada any. D'aquestes, 800 tones nostres i 400 tones de gent de per aquí a la vora (1200 tones) es premsen. De les 1200 tones es produeixen 600 tones de residu de suc i 600000 L de suc de poma.

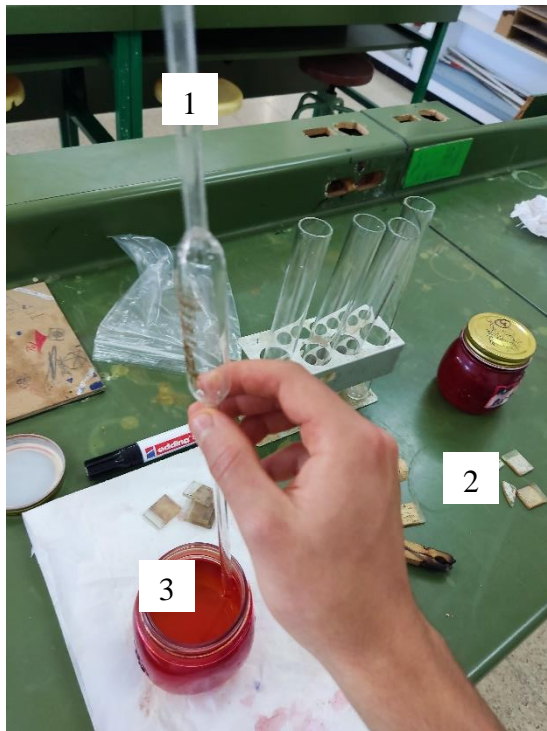
4. Quin ús doneu al residu produït?

Principalment l'usem d'adob. Mitjançant l'ús de maquinària vella com un remolc d'escampar fems ho repartim pel camp mentre el compost encara és fresc i compacte, ja que degut als seus sucres al cap d'un dia queda enganxat i podrit. Per culpa d'aquesta fermentació i la producció irregular es fa molt complicat de fer-ho servir com a aliment per vaques o ovelles. Una vegada vam acceptar una oferta per vendre-ho com a aliment per ovelles, però degut a la calor i que van passar a recollir el residu un dia després del previst moltes ovelles van morir. Les ovelles són molt sensibles als alcohols produïts en aquesta fermentació.

5. Estaríeu disposats a vendre el residu de suc de poma?

Sí, de fet ja el venem. Actualment, el venem en una gent que fan desenvolupaments per indústries farmacèutiques. Els hi veníem “Granny Smith” premsada i conservada amb fred, ja que a causa del seu verd pigment i la seva acidesa es conserva millor que els altres tipus de poma. Aquesta gent ho deshidratava, ho molia i ho empraven per crear fibra. A més a més, també ho venem a empreses cosmètiques, les quals introdueixen el residu de poma a cosmètics per tal d'usar el seu valuós efecte antioxidant. Finalment, també ho venem a empreses que ho usen en l'elaboració de galetes.

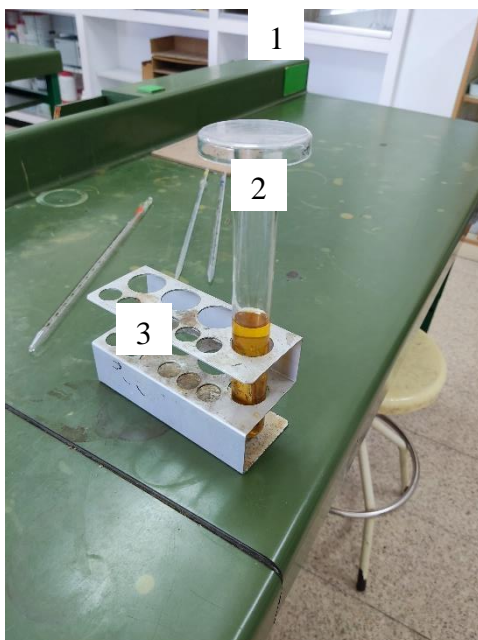
Annex 7: Procediment i materials usats per a determinar el volum de sensibilitzador consumit per unitat de superfície



Il·lustració 39. Mesura del volum inicial de colorant.

Font: Elaboració pròpia.

- 1 Pipeta aforada.
- 2 Vidres FTO coberts de semiconductor.
- 3 Sensibilitzador de residu de suc de poma.



Il·lustració 38. Solució en repòs amb els fotoànodes a l'interior.

Font: Elaboració pròpia.

- 1 Placa de petri.
- 2 Tub d'assaig.
- 3 Suport de tubs d'assaig.

Annex 8: Dades sobre consum energètic de la província de Girona proporcionades pel ICAEN

Consum d'energia per sectors

CONSUM D'ENERGIA ELÈCTRICA PER SECTORS A LA PROVÍNCIA DE GIRONA 2020

Font: Estadística municipal i comarcal del consum de gas natural i d'energia elèctrica. Estadística d'energia elèctrica. Divisió de Planificació Energètica. ICAEN.

Les dades de consum inclouen l'autoconsum dels productors d'energia elèctrica de l'antic règim especial. L'autoconsum del 2020 ha estat estimat en no disposar de les dades primàries.

La classificació per sectors d'activitat econòmica es basa en la informació subministrada per les empreses de distribució d'energia elèctrica.

Consum_kWh

Codi_Sector	Descripció	2020	Observacions
1	PRIMARI	33.210.604	
3	INDUSTRIAL	1.713.448.106	Inclou consum sector energètic.
	CONSTRUCCIO I		
4	OBRES PUBLIQUES	20.820.604	
5	TRANSPORT	42.285.501	
6	TERCIARI		Dada subjecta a SE secret estadístic.
7	USOS DOMESTICS	1.319.945.767	

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA

Consum d'energia al sector terciari

Any	Província	Comarca	CDMUN	Municipi	Codi_Sector	Descripció_Sector	Consum [kWh]
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17041	CANTALLOPS	6	TERCIARI	700.077
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17001	AGULLANA	6	TERCIARI	767.576
2020	GIRONA	GIRONES	17002	AIGUAVIVA	6	TERCIARI	3.253.897
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17003	ALBANYA	6	TERCIARI	496.690
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17004	ALBONS	6	TERCIARI	1.574.852
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17005	FAR D'EMPORDA, EL	6	TERCIARI	558.918
2020	GIRONA	CERDANYA	17006	ALP	6	TERCIARI	15.906.611
2020	GIRONA	SELVA	17007	AMER	6	TERCIARI	1.635.410
2020	GIRONA	SELVA	17008	ANGLES	6	TERCIARI	3.987.564
2020	GIRONA	SELVA	17009	ARBUCIES	6	TERCIARI	5.981.065
2020	GIRONA	GARROTXA	17010	ARGELAGUER	6	TERCIARI	7.396.750
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17011	ARMENTERA, L' AVINYONET DE	6	TERCIARI	1.309.805
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17012	PUIGVENTOS	6	TERCIARI	883.112
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17013	BEGUR	6	TERCIARI	8.814.797
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17014	VAJOL, LA	6	TERCIARI	117.267
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17015	BANYOLES	6	TERCIARI	23.029.539
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17016	BASCARA	6	TERCIARI	1.080.626
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17018	BELLCAIRE D'EMPORDA	6	TERCIARI	869.750
2020	GIRONA	GARROTXA	17019	BESALU	6	TERCIARI	3.254.007
2020	GIRONA	GIRONES	17020	BESCANO	6	TERCIARI	6.999.266
2020	GIRONA	GARROTXA	17021	BEUDA	6	TERCIARI	234.489
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17022	BISBAL D'EMPORDA, LA	6	TERCIARI	12.181.921
2020	GIRONA	SELVA	17023	BLANES	6	TERCIARI	68.735.151
2020	GIRONA	CERDANYA	17024	BOLVIR	6	TERCIARI	1.143.995
2020	GIRONA	GIRONES	17025	BORDILS	6	TERCIARI	447.959
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17026	BORRASSA	6	TERCIARI	782.199
2020	GIRONA	SELVA	17027	BREDA BRUNYOLA I SANT MARTI	6	TERCIARI	2.870.180
2020	GIRONA	SELVA	17028	SAPRESA	6	TERCIARI	661.300
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17029	BOADELLA I LES ESCAULES	6	TERCIARI	438.482
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17030	CABANES	6	TERCIARI	767.951
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17031	CABANELLES	6	TERCIARI	491.688
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17032	CADAQUES	6	TERCIARI	6.452.423
2020	GIRONA	SELVA	17033	CALDES DE MALAVELLA	6	TERCIARI	14.333.621
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17034	CALONGE I SANT ANTONI	6	TERCIARI	17.510.879
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17035	CAMOS	6	TERCIARI	131.167
2020	GIRONA	RIPOLLES	17036	CAMPDEVANOL	6	TERCIARI	3.436.031
2020	GIRONA	RIPOLLES	17037	CAMPELLES	6	TERCIARI	292.116
2020	GIRONA	GIRONES	17038	CAMPLLONG	6	TERCIARI	1.395.526
2020	GIRONA	RIPOLLES	17039	CAMPRODON	6	TERCIARI	3.828.693
2020	GIRONA	GIRONES	17040	CANET D'ADRI	6	TERCIARI	3.333.823
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17042	CAPMANY	6	TERCIARI	1.335.340
2020	GIRONA	RIPOLLES	17043	QUERALBS	6	TERCIARI	254.933
2020	GIRONA	GIRONES	17044	CASSA DE LA SELVA	6	TERCIARI	8.940.872
2020	GIRONA	GARROTXA	17046	CASTELLFOLLIT DE LA ROCA	6	TERCIARI	1.110.865

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA

2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17047	CASTELLO D'EMPURIES	6	TERCIARI	27.337.549
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17048	CASTELL-PLATJA D'ARO	6	TERCIARI	39.930.191
2020	GIRONA	GIRONES	17049	CELRA	6	TERCIARI	8.457.404
2020	GIRONA	GIRONES	17050	CERVIA DE TER	6	TERCIARI	263.052
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17051	CISTELLA	6	TERCIARI	290.514
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17052	SIURANA	6	TERCIARI	317.776
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17054	COLERA	6	TERCIARI	999.559
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17055	COLOMERS	6	TERCIARI	202.167
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17056	CORNELLA DEL TERRI	6	TERCIARI	5.093.428
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17057	CORÇA	6	TERCIARI	3.124.103
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17058	CRESPIA	6	TERCIARI	407.159
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17060	DARNIUS	6	TERCIARI	256.976
2020	GIRONA	CERDANYA	17061	DAS	6	TERCIARI	400.461
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17062	ESCALA, L'	6	TERCIARI	21.327.245
2020	GIRONA	OSONA	17063	ESPINELVES	6	TERCIARI	560.286
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17064	ESPOLLA	6	TERCIARI	227.626
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17065	ESPONELLA	6	TERCIARI	1.679.730
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17066	FIGUERES	6	TERCIARI	76.032.011
2020	GIRONA	GIRONES	17067	FLAÇA	6	TERCIARI	849.120
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17068	FOIXA	6	TERCIARI	516.260
2020	GIRONA	CERDANYA	17069	FONTANALS DE CERDANYA	6	TERCIARI	1.366.372
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17070	FONTANILLES	6	TERCIARI	632.315
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17071	FONTCOBERTA	6	TERCIARI	949.426
2020	GIRONA	GIRONES	17073	FORNELLS DE LA SELVA	6	TERCIARI	8.163.313
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17074	FORTIA	6	TERCIARI	1.169.258
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17075	GARRIGAS	6	TERCIARI	1.085.443
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17076	GARRIGOLES	6	TERCIARI	107.162
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17077	GARRIGUELLA	6	TERCIARI	981.818
2020	GIRONA	CERDANYA	17078	GER	6	TERCIARI	520.487
2020	GIRONA	GIRONES	17079	GIRONA	6	TERCIARI	186.601.010
2020	GIRONA	RIPOLLES	17080	GOMBREN	6	TERCIARI	257.704
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17081	GUALTA	6	TERCIARI	2.506.163
2020	GIRONA	CERDANYA	17082	GUILS DE CERDANYA	6	TERCIARI	456.318
2020	GIRONA	SELVA	17083	HOSTALRIC	6	TERCIARI	5.951.255
2020	GIRONA	CERDANYA	17084	ISOVOL	6	TERCIARI	332.380
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17085	JAFRE	6	TERCIARI	272.942
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17086	JONQUERA, LA	6	TERCIARI	26.307.254
2020	GIRONA	GIRONES	17087	JUIA	6	TERCIARI	592.241
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17088	LLADO	6	TERCIARI	396.243
2020	GIRONA	GIRONES	17089	LLAGOSTERA	6	TERCIARI	11.000.716
2020	GIRONA	GIRONES	17090	LLAMBILLES	6	TERCIARI	925.136
2020	GIRONA	RIPOLLES	17091	LLANARS	6	TERCIARI	578.378
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17092	LLANÇA	6	TERCIARI	8.349.288
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17093	LLERS	6	TERCIARI	3.086.661
2020	GIRONA	CERDANYA	17094	LLIVIA	6	TERCIARI	2.056.964
2020	GIRONA	SELVA	17095	LLORET DE MAR	6	TERCIARI	70.533.896

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA

2020	GIRONA	RIPOLLES	17096	LLOSSES, LES	6	TERCIARI	482.854
2020	GIRONA	GIRONES	17097	MADREMANYA	6	TERCIARI	309.501
2020	GIRONA	GARROTXA	17098	MAIA DE MONTCAL	6	TERCIARI	437.093
2020	GIRONA	CERDANYA	17099	MERANGES	6	TERCIARI	142.098
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17100	MASARAC	6	TERCIARI	146.070
2020	GIRONA	SELVA	17101	MASSANES	6	TERCIARI	832.491
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17102	MAÇANET DE CABRENYS	6	TERCIARI	1.069.004
2020	GIRONA	SELVA	17103	MAÇANET DE LA SELVA	6	TERCIARI	13.189.788
2020	GIRONA	GARROTXA	17105	MIERES	6	TERCIARI	172.882
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17106	MOLLET DE PERALADA	6	TERCIARI	264.286
2020	GIRONA	RIPOLLES	17107	MOLLO	6	TERCIARI	445.205
2020	GIRONA	GARROTXA	17109	MONTAGUT I OIX	6	TERCIARI	1.757.632
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17110	MONT-RAS	6	TERCIARI	1.582.816
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17111	NAVATA	6	TERCIARI	1.741.653
2020	GIRONA	RIPOLLES	17112	OGASSA	6	TERCIARI	220.244
2020	GIRONA	GARROTXA	17114	OLOT	6	TERCIARI	49.828.567
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17115	ORDIS	6	TERCIARI	220.625
2020	GIRONA	SELVA	17116	OSOR	6	TERCIARI	244.253
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17117	PALAFRUGELL	6	TERCIARI	29.963.083
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17118	PALAMOS	6	TERCIARI	30.555.506
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17119	PALAU DE SANTA EULALIA	6	TERCIARI	62.358
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17120	PALAU-SAVERDERA	6	TERCIARI	1.408.556
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17121	PALAU-SATOR	6	TERCIARI	1.078.846
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17123	PALOL DE REVARDIT	6	TERCIARI	2.437.509
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17124	PALS	6	TERCIARI	7.028.338
2020	GIRONA	RIPOLLES	17125	PARDINES	6	TERCIARI	54.450
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17126	PARLAVA	6	TERCIARI	548.380
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17128	PAU	6	TERCIARI	521.469
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17129	PEDRET I MARZA	6	TERCIARI	
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17130	PERA, LA	6	TERCIARI	594.043
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17132	PERALADA	6	TERCIARI	6.009.215
2020	GIRONA	GARROTXA	17133	PLANES D'HOSTOLES, LES	6	TERCIARI	1.248.861
2020	GIRONA	RIPOLLES	17134	PLANOLES	6	TERCIARI	433.955
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17135	PONT DE MOLINS	6	TERCIARI	1.307.968
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17136	PONTOS	6	TERCIARI	234.857
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17137	PORQUERES	6	TERCIARI	3.063.608
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17138	PORTBOU	6	TERCIARI	1.378.671
2020	GIRONA	GARROTXA	17139	PRESES, LES	6	TERCIARI	4.007.142
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17140	PORT DE LA SELVA, EL	6	TERCIARI	3.243.914
2020	GIRONA	CERDANYA	17141	PUIGCERDA	6	TERCIARI	16.751.590
2020	GIRONA	GIRONES	17142	QUART	6	TERCIARI	2.206.511
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17143	RABOS	6	TERCIARI	85.987
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17144	REGENCOS	6	TERCIARI	1.011.619
2020	GIRONA	RIPOLLES	17145	RIBES DE FRESE	6	TERCIARI	2.939.850
2020	GIRONA	SELVA	17146	RIELLS I VIABREA	6	TERCIARI	3.154.291
2020	GIRONA	RIPOLLES	17147	RIPOLL	6	TERCIARI	15.564.153

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA

2020	GIRONA	SELVA	17148	RIUDARENES	6	TERCIARI	3.068.656
2020	GIRONA	GARROTXA	17149	RIUDAURA	6	TERCIARI	115.966
2020	GIRONA	SELVA	17150	RIUDELLOTS DE LA SELVA	6	TERCIARI	11.651.310
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17151	RIUMORS	6	TERCIARI	42.479
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17152	ROSES	6	TERCIARI	36.461.542
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17153	RUPIA	6	TERCIARI	146.931
2020	GIRONA	GARROTXA	17154	SALES DE LLIERCA	6	TERCIARI	61.779
2020	GIRONA	GIRONES	17155	SALT	6	TERCIARI	36.900.065
2020	GIRONA	GIRONES	17157	SANT ANDREU SALOU	6	TERCIARI	35.673
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17158	SANT CLIMENT SESCEBES	6	TERCIARI	1.377.138
2020	GIRONA	SELVA	17159	SANT FELIU DE BUIXALLEU	6	TERCIARI	3.875.026
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17160	SANT FELIU DE GUIXOLS	6	TERCIARI	24.466.508
2020	GIRONA	GARROTXA	17161	SANT FELIU DE PALLEROLS	6	TERCIARI	1.150.677
2020	GIRONA	GARROTXA	17162	SANT FERRIOL	6	TERCIARI	476.915
2020	GIRONA	GIRONES	17163	SANT GREGORI	6	TERCIARI	9.937.588
2020	GIRONA	SELVA	17164	SANT HILARI SACALM	6	TERCIARI	5.160.400
2020	GIRONA	GARROTXA	17165	SANT JAUME DE LLIERCA	6	TERCIARI	1.250.324
2020	GIRONA	GIRONES	17166	SANT JORDI DESVALLS SANT JOAN DE LES	6	TERCIARI	365.708
2020	GIRONA	RIPOLLES	17167	ABADESSES	6	TERCIARI	2.120.938
2020	GIRONA	GIRONES	17168	SANT JOAN DE MOLLET	6	TERCIARI	533.307
2020	GIRONA	GIRONES	17169	SANT JULIA DE RAMIS	6	TERCIARI	4.388.944
2020	GIRONA	RIPOLLES	17170	VALLFOGONA DE RIPOLLES SANT LLORENÇ DE LA	6	TERCIARI	113.442
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17171	MUGA	6	TERCIARI	239.636
2020	GIRONA	GIRONES	17172	SANT MARTI DE LLEMENA	6	TERCIARI	242.612
2020	GIRONA	GIRONES	17173	SANT MARTI VELL SANT MIQUEL DE	6	TERCIARI	479.571
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17174	CAMPMAJOR	6	TERCIARI	295.235
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17175	SANT MIQUEL DE FLUVIA	6	TERCIARI	364.127
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17176	SANT MORI	6	TERCIARI	115.654
2020	GIRONA	RIPOLLES	17177	SANT PAU DE SEGURIES	6	TERCIARI	1.044.307
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17178	SANT PERE PESCADOR SANTA COLOMA DE	6	TERCIARI	7.658.362
2020	GIRONA	SELVA	17180	FARNERS	6	TERCIARI	16.006.780
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17181	SANTA CRISTINA D'ARO SANTA LLOGAIA	6	TERCIARI	8.112.751
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17182	D'ALGUEMA	6	TERCIARI	1.603.679
2020	GIRONA	GARROTXA	17183	SANT ANIOL DE FINESTRES	6	TERCIARI	377.743
2020	GIRONA	GARROTXA	17184	SANTA PAU	6	TERCIARI	1.527.155
2020	GIRONA	GARROTXA	17185	SANT JOAN LES FONTS	6	TERCIARI	4.788.378
2020	GIRONA	GIRONES	17186	SARRIA DE TER	6	TERCIARI	3.768.513
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17187	SAUS	6	TERCIARI	1.067.449
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17188	SELVA DE MAR, LA	6	TERCIARI	178.083
2020	GIRONA	SELVA	17189	CELLERA DE TER, LA	6	TERCIARI	1.007.491
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17190	SERINYA	6	TERCIARI	1.345.436
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17191	SERRA DE DARO	6	TERCIARI	242.242
2020	GIRONA	RIPOLLES	17192	SETCASES	6	TERCIARI	1.250.567
2020	GIRONA	SELVA	17193	SILS	6	TERCIARI	7.746.386

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA

2020	GIRONA	SELVA	17194	SUSQUEDA	6	TERCIARI	433.754
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17195	TALLADA D'EMPORDA, LA	6	TERCIARI	707.708
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17196	TERRADES	6	TERCIARI	283.923
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17197	TORRENT	6	TERCIARI	4.179.236
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17198	TORROELLA DE FLUVIA	6	TERCIARI	647.008
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17199	TORROELLA DE MONTGRI	6	TERCIARI	24.402.623
2020	GIRONA	GARROTXA	17200	TORTELLA	6	TERCIARI	394.975
2020	GIRONA	RIPOLLES	17201	TOSES	6	TERCIARI	594.400
2020	GIRONA	SELVA	17202	TOSSA DE MAR	6	TERCIARI	16.619.570
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17203	ULTRAMORT	6	TERCIARI	73.095
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17204	ULLA	6	TERCIARI	681.809
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17205	ULLASTRET	6	TERCIARI	416.169
2020	GIRONA	CERDANYA	17206	URUS	6	TERCIARI	771.488
2020	GIRONA	GARROTXA	17207	VALL D'EN BAS, LA	6	TERCIARI	5.259.115
2020	GIRONA	GARROTXA	17208	VALL DE BIANYA, LA	6	TERCIARI	2.874.060
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17209	VALL-LLOBREGA	6	TERCIARI	2.681.297
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17210	VENTALLO	6	TERCIARI	968.374
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17211	VERGES	6	TERCIARI	845.457
2020	GIRONA	OSONA	17212	VIDRA	6	TERCIARI	259.836
2020	GIRONA	SELVA	17213	VIDRERES	6	TERCIARI	7.543.378
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17214	VILABERTRAN	6	TERCIARI	458.599
2020	GIRONA	GIRONES	17215	VILABLAREIX	6	TERCIARI	6.163.233
2020	GIRONA	GIRONES	17216	VILADASENS	6	TERCIARI	139.705
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17217	VILADAMAT	6	TERCIARI	652.302
2020	GIRONA	PLA DE L'ESTANY	17218	VILADEMULS	6	TERCIARI	1.527.152
2020	GIRONA	OSONA	17220	VILADRAU	6	TERCIARI	1.530.083
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17221	VILAFANT	6	TERCIARI	5.704.876
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17222	VILAU	6	TERCIARI	55.406
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17223	VILAJUIGA	6	TERCIARI	1.158.634
2020	GIRONA	RIPOLLES	17224	VILALLONGA DE TER	6	TERCIARI	400.662
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17225	VILAMACOLUM	6	TERCIARI	266.940
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17226	VILAMALLA	6	TERCIARI	9.757.710
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17227	VILAMANISCLE	6	TERCIARI	124.359
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17228	VILANANT	6	TERCIARI	328.477
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17230	VILA-SACRA	6	TERCIARI	814.572
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17232	VILOPRIU	6	TERCIARI	234.168
2020	GIRONA	SELVA	17233	VILOBI D'ONYAR	6	TERCIARI	9.691.276
2020	GIRONA	ALT EMPORDA	17234	BIURE CRUILLES, MONELLS I SANT	6	TERCIARI	347.386
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17901	SADURNI DE L'HEURA	6	TERCIARI	1.672.124
2020	GIRONA	BAIX EMPORDA	17902	FORALLAC SANT JULIA DEL LLOR I	6	TERCIARI	3.382.456
2020	GIRONA	SELVA	17903	BONMATI	6	TERCIARI	862.539
						Suma:	1.292.237.142
						Total (sectors):	4.421.947.724

Annex 9: Càlculs, resultats i procediment usat per a calcular l'energia total produïda en una any pel sistema dissenyat.

Procediment

$$E_{\text{Total produïda}} = \sum E_{\text{Produïda cada mes}}$$

$$E_{\text{Produïda cada mes}} = m_{\text{residu suc de poma en un any}} \cdot \frac{V_{\text{sensibilitzador produït}}}{m_{\text{residu suc de poma consumit}}} \cdot \frac{A_{\text{DSSC produïda}}}{V_{\text{sensibilitzador consumit}}} \cdot \frac{P_{\text{generada}}}{A_{\text{DSSC}}} \cdot t_{\text{mes}}$$

Blau → Variables

✓ $m_{\text{residu suc de poma en un any}} = 600000 \text{ kg}$ (entrevista Mooma)

✓ $\frac{V_{\text{sensibilitzador produït}}}{m_{\text{residu suc de poma consumit}}} = \frac{309.2 \text{ ml sensibilitzador}}{14.46 \text{ g residu suc de poma}}$ (Annex 2)

✓ $\frac{A_{\text{DSSC produïda}}}{V_{\text{sensibilitzador consumit}}} = \frac{A_{\text{DSSC submergida}} \cdot \text{DSSCs submergides}}{v_0 - v} = \frac{8 \text{ DSSCs} \cdot 4 \text{ cm}^2}{30 \text{ ml} - 28 \text{ ml}} = \frac{32 \text{ cm}^2}{2 \text{ ml}}$ $v_{\text{consumit}} = v_0 - v$ (Equació 32)

✓ $t_{\text{mes}} = \text{Dies mes (30, 31 o 28)} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ dia}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 86400 \cdot \text{Dies mes (30, 31 o 28)}$

$$\checkmark \frac{P_{generada}}{A_{DSSC}} = P_{max} = \boxed{PCE \cdot P_{in}} = 0,0000274 \cdot P_{in} \quad \boxed{PCE = \frac{P_{max}}{P_{in}} \text{ (Equació 24)}}$$

$$P_{in} = \text{Irradiància} = \frac{\text{Irradiació}}{t_{mes}} = \frac{\text{Irradiació}}{86400 \cdot \text{Dies mes (30,31 o 28)}}$$

- ✓ Gràcies a les dades d'irradiació per cada mes obtingudes de la base de dades “Photovoltaic Geographical Information System” es pot procedir amb els càlculs:

Resultats i càlculs

	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
Irradiació (kWh/m ²)	134,43	149,66	144,39	159,83	193,75	162,81	199,93	199,67	165,59	146,81	114,2	116
Irradiació (J/m ²)	483948000	538776000	519804000	575388000	697500000	586116000	719748000	718812000	596124000	528516000	411120000	417600000
Irradiància (W/m ²)	180,685484	222,7083333	194,0725806	221,9861111	260,4166667	226,125	268,72312	268,373656	229,9861111	197,3252688	158,6111111	155,9139785
Pmax (W/m ²)	0,00495078	0,006102208	0,005317589	0,006082419	0,007135417	0,006195825	0,007363	0,00735344	0,006301619	0,005406712	0,004345944	0,004272043
Eproduïda cada mes (J)	2,546E+11	2,83439E+11	2,73458E+11	3,027E+11	3,66941E+11	3,08344E+11	3,786E+11	3,7815E+11	3,13609E+11	2,78042E+11	2,16282E+11	2,19691E+11
Eproduïda cada mes (kWh)	70720,9344	78733,1328	75960,6912	84083,3664	101928	85651,0848	105179,17	105042,394	87113,5872	77233,8048	60078,336	61025,28
Etotal produïda (kWh)												992749,7856

ANNEXOS DE LA QUARTA SECCIÓ

Annex 10: Càlculs i taules de dades per al seguiment de la DSSC de residu de suc de poma i l'estudi del preu dels materials

Taula del seguiment de 7 dies de la DSSC per a estudiar la degradació

Temps (dies)	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	P (mW)
1	0,0625	0,004	0,00025
2	0,04	0,0024	0,000096
3	0,026	0,0018	0,0000468
4	0,013	0,0012	0,0000156
5	0,008	0,001	0,000008
6	0,007	0,0009	0,0000063
7	0,005	0,0009	0,0000045

Càlculs per a escalar els preus dels components

$$\begin{aligned} \text{TiO}_2 &= 600000 \text{ kg residu} \cdot \frac{1000 \text{ g residu}}{1 \text{ kg residu}} \cdot \frac{309.2 \text{ ml sensibilitzador}}{15.46 \text{ g residu de suc de poma}} \cdot \frac{32 \text{ cm}^2 \text{ DSSC}}{2 \text{ ml sensibilitzador}} \cdot \frac{2 \text{ gotes}}{4 \text{ cm}^2 \text{ DSSC}} \cdot \frac{1 \text{ ml}}{20 \text{ gotes}} \cdot \frac{7.85 \text{ €}}{15 \text{ ml}} \\ &= 2512000000 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Electròlit} &= 600000 \text{ kg residu} \cdot \frac{1000 \text{ g residu}}{1 \text{ kg residu}} \cdot \frac{309.2 \text{ ml sensibilitzador}}{15.46 \text{ g residu de suc de poma}} \cdot \frac{32 \text{ cm}^2 \text{ DSSC}}{2 \text{ ml sensibilitzador}} \cdot \frac{2 \text{ gotes}}{4 \text{ cm}^2 \text{ DSSC}} \cdot \frac{1 \text{ ml}}{20 \text{ gotes}} \\ &\cdot \frac{7.85 \text{ €}}{25 \text{ ml}} = 1507200000 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Substrat} &= 600000 \text{ kg residu} \cdot \frac{1000 \text{ g residu}}{1 \text{ kg residu}} \cdot \frac{309.2 \text{ ml sensibilitzador}}{15.46 \text{ g residu de suc de poma}} \cdot \frac{32 \text{ cm}^2 \text{ DSSC}}{2 \text{ ml sensibilitzador}} \cdot \frac{1 \text{ substrat}}{4 \text{ cm}^2 \text{ substrat}} \cdot \frac{15 \text{ €}}{15 \text{ substrats}} \\ &= 48000000000 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Etanol} &= 600000 \text{ kg residu} \cdot \frac{1000 \text{ g residu}}{1 \text{ kg residu}} \cdot \frac{309.2 \text{ ml sensibilitzador}}{15.46 \text{ g residu de suc de poma}} \cdot \frac{1 \text{ ml etanol}}{1 \text{ ml sensibilitzador}} \cdot \frac{1 \text{ L etanol}}{1000 \text{ ml etanol}} \cdot \frac{180 \text{ €}}{25 \text{ L etanol}} \\ &= 8640000 \text{ €} \end{aligned}$$

Total: 52105600000 €

Annex 11: Entrevista a Josep Maria Solà

Aquesta entrevista realitzada el 9 de setembre 2022 a Josep Maria Solà, enginyer en telecomunicacions de Green elèctric, pretén conèixer l'opinió d'un expert sobre el model energètic del futur, el futur del sector de l'energia solar i la possible aplicació de les DSSCs. A continuació es mostren les preguntes i les seves respectives respostes:

1. A quina empresa treballes i quin producte veneu?

Jo treballo a Green elèctric energies renovables, a la Bisbal de l'Empordà. Venem plaques fotovoltaïques per electricitat i consum en instal·lacions elèctriques i plaques tèrmiques per escalfar aigua calenta i fer calefacció. Tot i això, des de fa quatre o cinc anys tot el que es fa nou és fotovoltaica, donat que l'electricitat s'aprofita per tot: serveix per escalfar, per refredar, per fer anar internet, per fer anar un cotxe, per bullir aigua, per fer anar bombetes, etc. En canvi, les plaques tèrmiques tan sols serveixen per bullir aigua.

2. Què diferencia la vostra empresa i el vostre producte de la competència?

Nosaltres tenim l'experiència, més de trenta-cinc anys que treballem amb energies renovables. Tenim serveis tècnics i d'enginyeria propis, és a dir que no subcontractem la instal·lació de plaques a cap autònom i estem presents en tot el procés, des de la venda, a la instal·lació, fins a la legalització.

3. El vostre producte és sostenible a llarg termini? Produïu algun tipus de deixalles contaminants?

El procés de reciclatge de les plaques fotovoltaïques de silici és el següent: si tu ets un fabricant de plaques fora d'Europa, l'importador (el que porta les plaques) ha de pagar una taxa de reciclatge obligatòria i si és un fabricant amb la fàbrica a Europa, el mateix fabricant ha de pagar la mateixa taxa de reciclatge. Aquest cànon de reciclatge que paga cada fabricant o cada importador per cada placa que porta, serveix per pagar el cost del reciclatge al dia que la placa s'hagi de reciclar, d'aquesta manera es tanca el cercle. Seguidament, la placa es porta amb un punt net amb una empresa especialitzada que fa el reciclatge correcte. A Espanya l'empresa responsable que es faci bé el reciclatge dels mòduls fotovoltaïcs és una empresa de Madrid anomenada "Recyclia". "Recyclia" diu

que reciclen el 95% dels components que componen un mòdul fotovoltaic (i no és poc). Nosaltres com empresa que desmuntem plaques trencades per posar-ne de noves, les hem de reciclar, perquè a una deixalleria no ens les volen. “Recyclia” es fa càrrec d’aquestes plaques velles, nosaltres les hem de deixar paletitzades i quan tenim la quantitat suficient per emplenar un camió, “Recyclia” ens envia el camió sense cost (ja que ho ha pagat el fabricant), ens recull els palets i ens fa certificat a mesura que aquestes plaques s’han arreglat i s’han processat adequadament. Així doncs, el cost que té per l’usuari final, tant ambientalment com econòmicament és nul.

Energèticament, hi ha estudis que afirmen que el cost energètic i de transport des del moment que es treu el silici de les pedreres fins que es porta a la fàbrica on es fan les oblees, es munten els vidres, és més elevat que l’energia que produirà la placa durant la seva vida útil. Això és fals, està demostrat que una placa fotovoltaica en el seu primer any de funcionament ha generat suficient energia per a compensar el seu procés de fabricació i de transport fins al seu usuari final.

4. Degut als desavantatges de les cel·les de primera generació (com les de silici), la vostra empresa té pensat desenvolupar i vendre algun nou tipus de placa?

No, en el futur, primer de tot que ens proposin una cel·la fotovoltaica amb una duració equivalent a la del silici, és a dir superior a la dels trenta anys. Quan vens una instal·lació a una persona, una família o a una empresa, suposa una inversió econòmica. A la vida real i al mercat real a no ser que siguis un organisme sense por i amb la possibilitat de perdre diners, la gent opta per les tecnologies provades i que segons el rendiment tinguin el menor cost i en aquest cas és el silici. Malgrat el seu cost, el fet que el cost de producció es retorni en un any, i l’any 2020 que després de la vida útil ja es recicli el 95% (possiblement l’any 2050 ja sigui el 100%) actualment és insuperable. Nosaltres hem provat tecnologies a mesura que hem pogut, com per exemple: el silici amb or, el tel·luri de cadmi, “els sistemes multicapa”, però cap ha donat més rendiment que les del silici. Existeixen cel·les molt més eficients com l’arseniur de gal·li, però són molt més contaminants i estan reservades per rics; és dir empreses com la NASA que en molt poc espai necessiten produir el màxim d’energia independentment del cost. Instal·lacions d’aquest estil serien impossible en teulades de cases, ja que són deu vegades més cares

que les de silici i cel·les de tercera generació tampoc no són viables, donat que no es produeix tota l'energia que es podria produir i, per tant, no s'aprofita la teulada al màxim. Addicionalment, cal contemplar factors com la degradació, ja que aquestes noves tecnologies són molt susceptible a la degradació solar i, per tant, suposaria un preu molt elevat protegir-les completament.

5. Heu notat si com que hi ha més gent conscienciada amb la situació climàtica actual les vendes van en augment? Heu notat algun canvi aquests darrers anys?

Sí, de fet un canvi important. Tot i que malgrat que m'agradaria, no perquè la gent sigui més ecologista. La gent es mou per diners i el fet que últimament es muntin més plaques que mai a la història (aquest darrer any i mig més plaques que mai s'havien muntat a Espanya) és degut al fet que l'electricitat ha pujat com mai. Com que la gent veu que això li toca la butxaca, que no pot fer res per no pagar electricitat i que el més senzill per baixar la factura elèctrica és fabricar-se ells mateixos l'electricitat, tothom compra i ven plaques.

6. Segons la teva opinió, quin és el model energètic ideal per al futur? Que en penses de la fotosíntesi artificial?

La situació ideal hauria de ser que, per una banda, les cases fossin tan semblants com sigui possible al model de "casa passiva", de tal manera que la mateixa casa pogués reaprofitar tota l'energia passiva (aires de la casa, un sistema que no deixi escapar l'escalfor a fora, tots els tancaments i aïllaments pensats perquè no hi hagi pèrdues energètiques) que li arriba i dependre al mínim d'energia exterior. Addicionalment, cal posar cel·les fotovoltaïques a totes les teulades de les cases i un molí petit.

Per altra banda, de cara a les indústries, els grans demandants d'energia, cal que optimitzin els seus processos productius, agafant màquines més eficients, tractant productes que no necessitin tanta energia en el seu processat, aprofitant al màxim la massa forestal sobrant per fer energia primària com al gasoil. Crec que la biomassa és un component que jugarà un paper molt important en el futur, donat que a part d'usar-se per produir electricitat massivament hi haurà moltes cases amb caldera que aprofitarà neteges forestals o productes sobrants de productes industrials per produir calor.

Altres propostes que veig viables són les xarxes intel·ligents (*Smart grid*), el vehicle elèctric que no depèn de cremar combustibles.

Pel que fa a l'hidrogen encara el veig molt llunyà i tot i que té molt potencial encara no el veig com la solució de futur. La fotosíntesi artificial i la hidròlisi de l'aigua crec que és una proposta molt original, però per arribar-hi el gas i les energies fòssils per desgràcia s'haurien d'encarir molt més. Actualment, s'obté l'hidrogen "fàcil" a partir de la descomposició de la molècula de gas natural, donat que surt molt més econòmic que no pas amb la descomposició de la molècula de l'aigua (amb la hidròlisi de l'aigua). Penso que falta molt de temps (25-30 anys) per tal que propostes com l'hidrogen o el grafè aconseguixin una eficiència suficient.

7. Quin és el preu de les cel·les que venen per metre quadrat?

Aproximadament, un metre quadrat dona uns 200 W i costa uns 100 €.

M. Fuji
L'ENERGIA DEL QUE QUEDA