



Universidad de Jaén

Centro de Estudios de Postgrado

REVISIÓN DE MATERIALES FOTOVOLTAICOS SEMITRANSSPARENTES PARA AGRIVOLTAICA (APV)

Alumno/a: Domínguez López, Israel

Tutor/a: Prof. D. Florencia Almonacid Cruz.

Prof. D. Eduardo Fernández Fernández

Dpto: Centro de Estudios Avanzados en
Ciencias de la Tierra, Energía y
Medioambiente.

Septiembre, 2023

AGRADECIMIENTOS

A los profesores y compañeros que durante este último año me han ayudado a conseguir el máster de Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos por la Universidad de Jaén, y en especial a mis tutores de este trabajo que me han proporcionado la ayuda necesaria para poder llevarlo a cabo.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Energías Renovables. Definición y Situación Mundial.....	16
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. OBJETIVOS	23
4. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS APV	24
4.1 Tecnología APV	24
4.1.1 Historia de la FV	25
4.1.2 Historia de la APV	30
4.1.3 Impactos de la Tecnología. Beneficios y Retos.....	32
4.1.4 Clasificación de los Sistemas APV	35
4.2 Evolución de la Agricultura	38
4.2.1 Modelos de Agricultura.....	39
4.2.1-1 Agricultura Tradicional.....	39
4.2.1-2 Agricultura Industrial o Intensiva	40
4.2.1-3 Agricultura Sostenible	41
4.2.2 Respuesta de la planta a la luz.....	43
4.2.2-1 Fotosíntesis	44
4.2.2-2 Fotomorfogénesis.....	48
4.2.3 Cultivos adecuados para Agrivoltaica.....	49
5. MATERIALES Y MÉTODOS	53
5.1 Semiconductores. Unión PN y Célula Solar	53
5.2 Características Mecánicas y Visuales de los Materiales FV	61
5.3 Color Materiales FV	72
5.4 Revisión Tecnologías FV Actuales/Emergentes	74
5.4.1 Células de Silicio Cristalino	76
5.4.2 Células Bifaciales.....	78
5.4.2-1 Células Al-BSF	79
5.4.2-2 Células PERC.....	79
5.4.2-3 Células PERT.....	80
5.4.2-4 Células PERL.....	81
5.4.2-5 Células TOPCON.....	81
5.4.2-6 Células IBC.....	82
5.4.2-7 Células HIT	83

5.4.3 Células Thin-film	84
5.4.3-1 Células de Silicio Amorfo.....	85
5.4.3-2 Células de CIGS.....	87
5.4.3-3 Células de CdTe.....	88
5.4.3-4 Células de GaAs.....	89
5.4.4 Células de Tecnologías Emergentes.....	90
5.4.4-1 Células de QDSC	90
5.4.4-2 Células Orgánicas	92
5.4.4-3 Células DSSC.....	93
5.4.4-4 Células de Perovskita.....	94
5.4.4-5 Células Multiunión.....	96
5.4.5 Ventajas/Desventajas para su Aplicación en APV.....	99
5.5 Aplicación de Tecnologías FV Semitransparentes en APV. Casos de Estudio.....	101
5.5.1 Silicio Cristalino Semitransparente	101
5.5.2 Silicio Amorfo Semitransparente	104
5.5.3 Orgánica Semitransparente.....	106
5.5.4 DSSC Semitransparente	108
5.5.5 Perovskita Semitransparente	110
5.5.6 Concentración FV Semitransparente.....	112
5.5.7 Ventajas/Desventajas para su Aplicación en APV.....	114
6. CONCLUSIONES	118
BIBLIOGRAFIA.....	120

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1. Potencia Acumulada Mundial // Potencia Instalada Mundial 2021. [8]	17
Figura 1.2. % de Energía Renovable para cada Fuente de Energía en 2021. [8]	18
Figura 1.3. Aporte Renovable por Regiones en 2021. [8].....	18
Figura 1.4. Potencia Instalada Anual Renovable vs No Renovables. [8].....	19
Figura 1.5. Factor de Capacidad de las Fuentes De Energía. [9]	19
Figura 2.1. LCOE Sistemas de Generación Renovable Utility-Scale 2021. [10].....	21
Figura 4.1. Eficiencia del Terreno en Cultivo de Patatas. Dos Situaciones. [18].....	24
Figura 4.2. Efecto Fotovoltaico. [13]	25
Figura 4.3. Primera célula solar por Charles Fritts en 1883. [14]	26
Figura 4.4. Efecto Fotoeléctrico. [13]	26
Figura 4.5. Panel solar de prueba de Laboratorios Bell año 1954. [14]	27
Figura 4.6. Célula solar de película delgada. [14].....	28
Figura 4.7. Células solares sensibilizadas por colorante (DSSC). [14].....	29
Figura 4.8. Primeros modelos de sistemas agrivoltaicos. [11]	30
Figura 4.9. Sistema agrivoltaico experimental en Motpellier, Francia. [11].....	30
Figura 4.10. Sistema agrivoltaico comercial en Castelvetro, Italia. [11]	31
Figura 4.11. Sistema agrivoltaico comercial en Pionlec, Francia. [11].....	31
Figura 4.12. Clasificación Típica de los Sistemas APV. [18]	36
Figura 4.13. Invernadero FV con Tecnología FV Semitransparente. [33].....	37
Figura 4.14. Overhead PV/ Interspace PV. [18].....	37
Figura 4.15. Pasto Permanente sobre FV-Vertical. [17]	38
Figura 4.16. Agricultura Tradicional. [19]	39
Figura 4.17. Agricultura Intensiva. [20].....	40
Figura 4.18. Agricultura Sostenible. [22].....	42
Figura 4.19. Invernaderos Fotovoltaicos. [24]	43
Figura 4.20. Proceso de Fotosíntesis. [12]	44
Figura 4.21. Espectro de Absorción de Clorofilas y Carotenoides. [24].....	45
Figura 4.22. Productividad Cuántica de las Plantas. [25]	46
Figura 4.23. Curvas típicas de Tasa Fotosintética: Planta de Sol y de Sombra. [24]	47
Figura 4.24. Espectro de Absorción de Fitocromos en Estado Pr y Pfr. [24]	48
Figura 5.1. Estructura Semiconductores Tipo N y Tipo P [35].....	54
Figura 5.2. Bandas de Energía: Semiconductor Directo e Indirecto [36]	55
Figura 5.3. Fotones Incidentes sobre Semiconductor [37]	55
Figura 5.4. Coeficiente de Absorción sobre distintos Semiconductores [34]	56

Figura 5.5. Profundidad de Absorción sobre distintos Semiconductores [34]	56
Figura 5.6. Efectos del Espesor sobre Semiconductor Directo e Indirecto [38]	57
Figura 5.7. Funcionamiento Unión PN [34].....	58
Figura 5.8. Célula-Módulo-Generador FV [41]	59
Figura 5.9. Curva IV de una Célula Fotovoltaica. [42].....	59
Figura 5.10. Factor de Forma (FF) de Dos Células Solares Distintas. [42]	60
Figura 5.11. Eficiencia Cuántica Ideal vs Real. [34].....	60
Figura 5.12. Respuesta Espectral de una Célula de Silicio con Cristal. [34]	61
Figura 5.13. Ensayo de Flexión. [44].....	62
Figura 5.14. Ensayo de Tracción. [45].....	62
Figura 5.15. Curva Tensión-Deformación, Ensayo de Tracción. [45]	63
Figura 5.16. Estructura Típica de un Módulo Fotovoltaico. [46].....	63
Figura 5.17. Transmisión de la Luz Incidente/Transmitancia de la Luz para Diferentes Espesores/ Coeficiente de Absorción para Materiales Thin-Film. [47]	66
Figura 5.18. Tipos de Materiales Thin-Film con Posibilidad de TPV. [47].....	66
Figura 5.19. Eficiencia vs Transparencia en Materiales Thin-Film. [47].....	67
Figura 5.20. Tecnología de Transmisión Selectiva de la Luz. [47].....	68
Figura 5.21. TPV de Color Neutro/Relación de Corriente bajo Ángulos de Incidencia Con y Sin Transparencia. [47]	69
Figura 5.22. Estructura LSC y Funcionamiento. [47]	69
Figura 5.23. Características Ideales de un Material Luminiscente. [47]	70
Figura 5.24. Características Reales de Materiales Luminiscentes. [47].....	70
Figura 5.25. Absorbancia de Materiales Luminiscentes durante 2 Años. [47]	71
Figura 5.26. Módulo Fotovoltaico con Cristal Frontal Tintado. [48].....	73
Figura 5.27. Módulo Fotovoltaico. Diferente Espesor de Capa Antirreflejante. [48].....	73
Figura 5.28. Estructura Capa MorphoColor. [49]	74
Figura 5.29. Muro Cortina Fotovoltaico. Sede Schott Ibérica, Barcelona. [48].....	74
Figura 5.30. Módulos Fotovoltaicos en el Mercado Global. [31]	75
Figura 5.31. Records de Eficiencia de las Tecnologías FV en Laboratorio. [50]	75
Figura 5.32. Metas del Desarrollo de Nuevas Tecnologías FV. [50]	76
Figura 5.33. Clasificación de las Tecnologías FV por Generaciones. [51]	76
Figura 5.34. Paneles Solares Monocristalinos y Policristalinos. [53]	77
Figura 5.35. Células FV Monofaciales vs Bifaciales. [54]	78
Figura 5.36. Célula Solar de Silicio Cristalino Al-BSF. [50].....	79
Figura 5.37. Célula Solar de Silicio Cristalino PERC. [54]	80
Figura 5.38. Célula Solar de Silicio Cristalino PERT. [54]	80
Figura 5.39. Célula Solar de Silicio Cristalino PERL. [54]	81
Figura 5.40. Célula Solar de Silicio Cristalino TOPCON. [58]	82

Figura 5.41. Célula Solar de Silicio Cristalino IBC. [54]	82
Figura 5.42. Célula Solar de Silicio Cristalino HIT. [54]	83
Figura 5.43. Tendencia Células Solares de Silicio Cristalino. [50].....	84
Figura 5.44. GFV con Células Thin-film. [61].....	84
Figura 5.45. Estructura Célula de Silicio Amorfo. [64]	86
Figura 5.46. Estructura Célula Solar CIGS. [63]	87
Figura 5.47. Estructura Célula Solar CdTe. [64].....	88
Figura 5.48. Estructura Célula Solar GaAs. [66]	89
Figura 5.49. Principio de Funcionamiento QDSC. [53].....	91
Figura 5.50. Célula Solar Orgánica Bicapa. [38]	92
Figura 5.51. Célula Solar Orgánica Heterounión Distribuida. [38]	92
Figura 5.52. Célula Solar Orgánica DHJ Normal/Invertida. [38]	93
Figura 5.53. Célula Solar DSSC. Estructura y Funcionamiento. [24].....	94
Figura 5.54. Célula Solar de Perovskita. Estructura y Materiales. [68]	95
Figura 5.55. Célula Solar Multiunión. Absorción del Espectro Solar. [70]	96
Figura 5.56. Célula Solar Multiunión. Apilamiento Mecánico vs Monolítica. [37]	97
Figura 5.57. Células Solares Multiunión Monolíticas en función de la Constante de Red. [71] 98	
Figura 5.61. Eficiencias de Módulos Record NREL. [73]	99
Figura 5.62. Invernadero de Silicio Cristalino Semitransparente. [74].....	102
Figura 5.63. Fotovoltaica Aérea con Módulos de c-Si Semitransparentes. [31].....	103
Figura 5.64. STPV con Microcélulas Esféricas. [31].....	103
Figura 5.65. Invernadero de Silicio Amorfo Semitransparente. [76].....	104
Figura 5.66. Paneles Tintados de Silicio Amorfo Semitransparente. [77]	105
Figura 5.67. Invernadero OPV / Condiciones de Sol de la Planta. [79].....	106
Figura 5.68. Comparación Producción Agraria Distintas Situaciones. [79]	107
Figura 5.69. Mini Invernadero FV de DSSC. [80].....	109
Figura 5.70. Experimento de Invernadero FV de DSSC. [82]	110
Figura 5.71. Flujo de Fotones en Sistema APV. [83].....	111
Figura 5.72. Simulación de Sistema APV de Perovskita Semitransparente. [83].....	111
Figura 5.73. Invernadero LSC Experimental, Universidad de California. [84]	113
Figura 5.74. Producción Energética Mensual de Panel LSC. [84].....	114

ÍNDICE TABLAS

Tabla 4.1. Características Básicas de un Sistema APV.....	25
Tabla 4.2. Impactos de Factores Situacionales sobre APV.....	33
Tabla 4.3. Impactos de los Sistemas de Generación para APV.....	33
Tabla 4.4. Impactos sobre la Producción Energética y Agraria en APV.	34
Tabla 4.5. Beneficios y Retos de la Tecnología APV.....	35
Tabla 4.6. Ventajas e Inconvenientes Agricultura Tradicional.	39
Tabla 4.7. Ventajas e Inconvenientes Agricultura Intensiva.....	41
Tabla 4.8. Ventajas e Inconvenientes Agricultura Sostenible.....	43
Tabla 4.9. Cultivos Potenciales en Agrivoltaica. [27].....	50
Tabla 4.10. Sistemas Agrivoltaicos Disponibles con Diferentes Cultivos. [28]	50
Tabla 4.11. Efectos del Sombreado Sobre Distintos Cultivos. [28].....	51
Tabla 5.1. Tabla periódica semiconductores comunes [34]	53
Tabla 5.1. PCE y AVT de Estudios sobre Materiales Thin-Film [47]	67
Tabla 5.2. Ventajas e Inconvenientes Tecnologías Transparentes.....	72
Tabla 5.3. Características de las Principales Tecnologías Fotovoltaicas: Silicio Cristalino-Thin-Film. [64].....	90
Tabla 5.4. Tabla periódica semiconductores comunes [34]	97
Tabla 5.6. Ventajas e Inconvenientes Principales Tecnologías FV.....	101
Tabla 5.7. Caso de Estudio: Invernadero FV en Kunming, China.	102
Tabla 5.8. Caso de Estudio: Invernadero FV en Valladolid, España.	105
Tabla 5.9. Caso de Estudio: Invernadero OPV en Salónica, Grecia.	107
Tabla 5.10. Materiales Activos para OPV. [78].....	108
Tabla 5.11. Caso de Estudio: Mini Invernadero DSSC en Selangor, Malasia.	109
Tabla 5.12. Caso de Estudio: Célula Solar Novedosa de Perovskita Semitransparente, China.....	112
Tabla 5.13. Caso de Estudio: Concentrador Solar Luminiscente Semitransparente, Universidad de California.....	114
Tabla 5.14. Ventajas e Inconvenientes Principales Tecnologías FV Semitransparentes.....	116

NOMENCLATURA

APV	Agrivoltaica
FV	Fotovoltaica
BIPV	Fotovoltaica Integrada en Edificios
DSSC	Célula Solar Sensibilizada por Colorante
RAE	Real Academia Española
CC.AA	Comunidad Autónoma
GHG	Emisiones de Efecto Invernadero
CPV	Concentración Fotovoltaica
DNI	Irradiancia Directa Normal
DHI	Irradiancia Difusa Horizontal
GHI	Irradiancia Global Horizontal
POA	Irradiancia Global Inclínada
GNI	Irradiancia Global Normal
GRI	Irradiancia Global Reflejada en el Suelo
TPV	Fotovoltaica Transparente
PCE	Eficiencia de Conversión de Potencia
AVT	Transmitancia Visible Promedio
DSSC	Célula Solar Sensibilizadas por Colorante
CIGS	Seleniuro de Cobre-Indio-Galio
QDSC	Célula Solar de Puntos Cuánticos
LSC	Tecnología Fotovoltaica de Concentrador Solar Luminiscente
CdTe	Teleruro de Cadmio
a-Si	Silicio Amorfo
c-Si	Silicio Monocristalino
TCO	Óxido conductor transparente
ITO	Óxido de Indio-Tin
FTO	Óxido de Estaño-Flúor
MCPV	Fotovoltaica de Concentración Media

HCPV	Fotovoltaica de Alta Concentración
MJSC	Células Solares Multiunión
LM	Lattice-Matched
MM	Metamorphic-mismatched
PAR	Radiación Fotosintéticamente Activa
NADPH	Nicotiamida-Adenina Dinucleotido Fosfato
ATP	Trifosfato de Adenosina
PSN	Tasa Neta de Fotosíntesis

RESUMEN

La agrivoltaica, entendida como la integración conjunta de la FV con el terreno agrícola, es una técnica capaz de resolver los principales problemas de la humanidad a través del nexo Agua-Comida-Energía. Por otro lado, la transparencia de los módulos FV va a ser esencial para potenciar la productividad agraria compitiendo con la productividad energética. El objetivo de este TFM consiste en revisar los materiales FV semitransparentes empleados en APV. A lo largo del informe se va a revisar el estado del arte de la tecnología APV y el estudio de los materiales FV empleados en la actualidad, de forma que seamos capaces de analizar varios casos de estudio de la tecnología semitransparente, y concluir con una tabla comparativa que nos ayude a desarrollar nuestras propias decisiones a la hora de instalar un sistema APV.

Los **resultados** obtenidos durante este informe remarcan un interés en la actualidad por las tecnologías FV de silicio cristalino debido a su reducido coste de fabricación y a la alta eficiencia energética ofrecida. La instauración de esta tecnología debe comenzar con el estudio APV de sistemas interespaciales para aumentar el interés de la sociedad en esta tecnología, con vistas en un futuro a la implementación de sistemas aéreos o invernaderos FV capaces de producir en el mismo espacio cultivos y energía. Una vez este tipo de sistemas sean rentables, para aumentar la productividad del terreno, se estima oportuno el empleo de tecnologías FV thin-film semitransparentes o emergentes semitransparentes, capaces de aumentar la eficiencia y/o la transparencia, en sistemas LSC.

En general, se observó que un sistema APV sufre impactos beneficiosos como la reducción de la evapotranspiración, la reducción de la temperatura debajo de los módulos FV, protección de los cultivos ante condiciones meteorológicas adversas, perfiles uniformes de humedad y temperatura, junto con un crecimiento de la planta más controlado. Sin embargo, su principal inconveniente es la aleatoriedad en el comportamiento de diversos tipos de cultivo causado por su distinta localización, tipo de sistema APV, e incluso al tipo material FV empleado. Se ha demostrado que los cultivos amantes de la sombra (pimientos, champiñones, patatas dulces, etc.) mejoran sus características al soportar bajas condiciones de luminosidad, pero también hay cultivos amantes al sol (p.ej. tomate, patata) que ha visto aumentada su productividad agraria bajo unas condiciones determinadas.

Estos comportamientos tan diversos son fruto de la reciente incorporación de la tecnología APV a la investigación con sistemas experimentales. Si además lo unimos con la falta de regulación y de un material FV estándar para APV, los resultados son aún más impredecibles. Prueba de ello son los casos de estudio analizados, que en condiciones de operación siguen viendo a la tecnología de silicio cristalino semitransparente como la más robusta para su aplicación en APV, obteniéndose en el resto de materiales FV semitransparentes problemas de degradación y eficiencia, respecto a lo analizado teóricamente. Pese a ello, para cultivos amantes al sol se recomienda la tecnología LSC por los grandes niveles de transparencia que necesitan, dejando de lado la productividad energética que únicamente tiende a cubrir parte del consumo del recinto.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en todo el mundo se está viviendo una situación de crisis provocada por la guerra de Rusia y Ucrania, esto se une a las consecuencias de la crisis económica causada por la pandemia mundial ocasionada por la COVID-19 junto con una situación grave de sequía y un aumento de la población que ocasiona un crecimiento de la demanda de comida y energía.

Por un lado, la guerra está llevando a cortes del suministro de gas por parte de Rusia hacia Europa, provocando escasez de gas natural y haciendo que aumente el precio de la energía. Por otro lado, el conflicto también ha provocado que la exportación agrícola de Ucrania sea escasa o nula, perjudicando enormemente a Europa que es su principal consumidor.

Todo esto viene acrecentado por los efectos de la crisis económica provocada por la pandemia mundial, que hace que la población se vea más afectada por esta falta de recursos y por el aumento del precio de la electricidad.

A toda esta situación se une la escasez de precipitaciones, cómo lo demuestra el hecho de llevar cerca de 5 años por debajo de la media estadística de precipitaciones. El agua es fundamental para la vida humana, estamos compuestos por más de un 60% de agua, necesitamos agua para abastecer nuestras necesidades, para cultivar alimentos y para sobrevivir, esto hace que debamos considerar este periodo de sequía cómo una de las grandes preocupaciones de la humanidad, junto con la escasez de alimentos y la crisis energética. El cambio climático está afectando significativamente a las condiciones climáticas de la tierra (ciclos del agua, temperatura ambiente, radiación, humedad, etc.) incrementando las preocupaciones anteriores, luego hay que poner medidas para paliar su expansión.

Como último suceso, destacar el incremento de la población mundial en un 160% desde 1960 hasta 2021, pasando de una población de 3.03 billones de personas a 7.89 billones, este hecho promueve un mayor agotamiento de los recursos naturales, mayor inyección de CO₂ a la atmósfera, aumenta el consumo de alimentos, etc. [1]

Las consecuencias que pueden traer estas situaciones en conjunto se prevén críticas para el desarrollo de la humanidad, por lo que es necesario tomar medidas urgentes para tratar de controlar la situación, cómo, por ejemplo, la transición hacia fuentes de energías sostenibles. Según [2], el porcentaje de energía generada mediante fuentes renovables fue del 20% del consumo bruto para el año 2020 en la Unión Europea, y concretamente en España se ha logrado ese objetivo para tal fecha. El objetivo para el año 2030 en la UE es aumentar en un 32% la generación mediante fuentes de energías renovables y además aumentar hasta en un 32.5% la eficiencia energética, respecto al año 1990. Este fomento del uso de energías renovables viene provocado por la necesidad de reducir los gases de efecto invernadero, la huella de carbono, y por la incertidumbre de los combustibles fósiles. A finales de 2022, el % de energías renovables en la generación eléctrica anual se encontraba por encima del 50%, superando el objetivo fijado en 2021 por la UE de un 40% de inyección de energía renovable en la red española. [2], [3], [4]

1.1 Energías Renovables. Definición y Situación Mundial

La **definición del término “energía renovable”** resulta complicado para poder clasificar una fuente de energía dentro de esta categoría. RAE, APPA y Naciones Unidas se atreven a exponer las características de una fuente de energía renovable, algunas coinciden y otras difieren, haciendo uso de dichas definiciones somos capaces de recopilar las siguientes características: [5], [6], [7]

- Fuentes de energía renovables:
 - Abastecimiento inagotable o casi inagotable:
 - Disponibles de forma permanente o periódica.
 - Se renuevan de forma continua.
 - Transformables en energía útil.
 - En su mayoría el origen es solar.
 - Aprovechamiento no contaminante.

Del mismo modo, podemos establecer una **definición del término “energía no renovable”** a partir de las siguientes características:

- Fuentes de energía no renovables:
 - Abastecimiento agotable.
 - Aprovechamiento contaminante.

Existe una gran diversidad de energías renovables, de forma general se pueden distinguir en función de la energía final conseguida a partir de ellas en: **energía eléctrica, energía térmica y biocarburantes**. [6]

Energías renovables no usadas para generación eléctrica:

- Biocarburantes.
- Biomasa para climatización.
- Eólica para uso mecánico (Ej: para molinos o pozos de agua).
- Geotérmica para climatización.
- Hidráulica para uso mecánico (Ej: para molinos).
- Solar térmica para agua caliente de baja temperatura.

Energías renovables usadas para generación eléctrica:

- Origen solar directo:
 - Energía solar:
 - Fotovoltaica.
 - Termosolar.
- Origen solar indirecto:
 - Eólica.
 - Hidráulica.
 - Marina.
 - Bioenergía.
- Energía Geotérmica.

De acuerdo con [6] y [7], la mayoría de energías renovables para generación eléctrica son de origen solar.

Respecto al **estado de la energía renovable mundial**, desde el punto de vista de producción de energía eléctrica a partir de energías renovables, las energías que más inyección tienen son la fotovoltaica, eólica e hidráulica, aunque en algunos casos se puede incluir también la bioenergía.

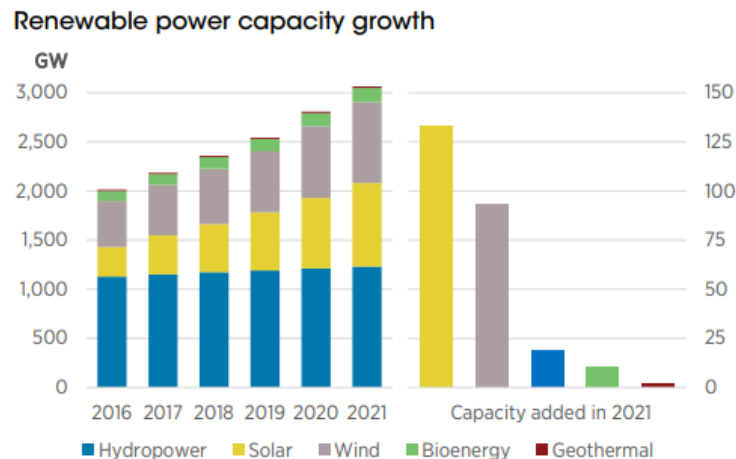


Figura 1.1. Potencia Acumulada Mundial // Potencia Instalada Mundial 2021. [8]

Se ve una tendencia ascendente de la capacidad de energías renovables en el mundo año tras año. El último año del análisis fue el 2021, y se ve un aumento en la capacidad de aproximadamente 257 GW que tiene que ver con un crecimiento anual respecto al total del 9,1% y que se distribuye tal y como se ve en la **figura 1.1** con un incremento de energía solar de 133 GW correspondiente a un aumento local de un +19% que va liderando la potencia instalada de 2021, seguida por la energía eólica con una potencia añadida de 93 GW (+13%), la hidroeléctrica con un incremento de 19 GW (+2%), la bioenergía con 10 GW (+8%), y por último, la geotérmica con un aumento de potencia instalada de 1,6 GW. La energía solar y eólica continúan dominando la potencia instalada con un 88% de las energías renovables instaladas en 2021. [8]

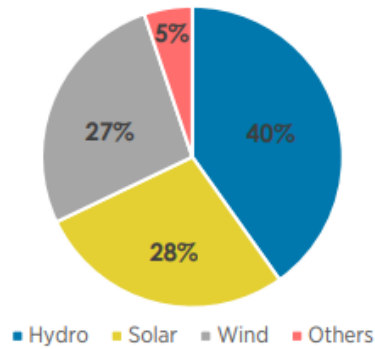


Figura 1.2. % de Energía Renovable para cada Fuente de Energía en 2021. [8]

Para finales de 2021, la generación renovable acumulada global fue de 3064 GW. De todas las fuentes renovables la hidroeléctrica es la mayor de lejos con 1230 GW (40%), seguida por la solar con 849 GW (28%) y muy cerca de ella la eólica con 825 GW (27%). Otras energías renovables incluyen 143 GW de bioenergía, 16 GW de geotérmica y 524 MW de energía marina. [8]

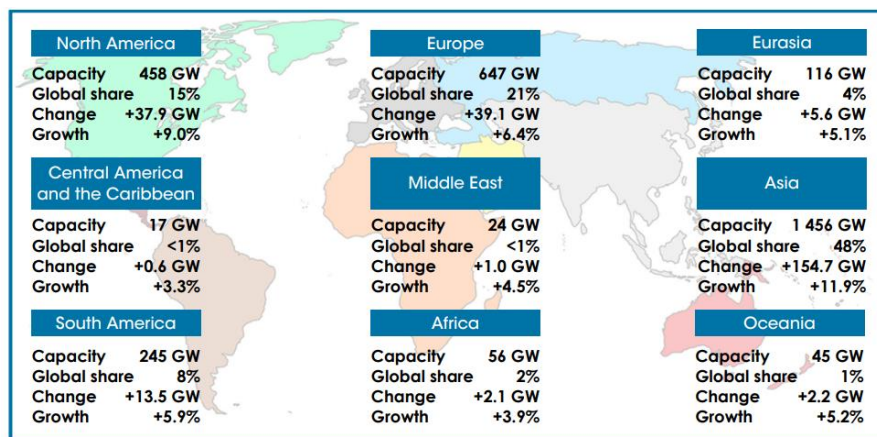


Figura 1.3. Aporte Renovable por Regiones en 2021. [8]

En la **figura 1.3** se muestra una tabla resumen con el aporte energético renovable de diferentes zonas del mundo, destacar que Asia dispone de cerca de la mitad de la capacidad acumulada, la segunda que más aporte es Europa con cerca de un 21%, mientras que la tercera corresponde con Norte América con un 15%. La tasa de crecimiento en el año 2021 respecto al acumulado de años anteriores también sigue un orden similar al de capacidad acumulada. [8]

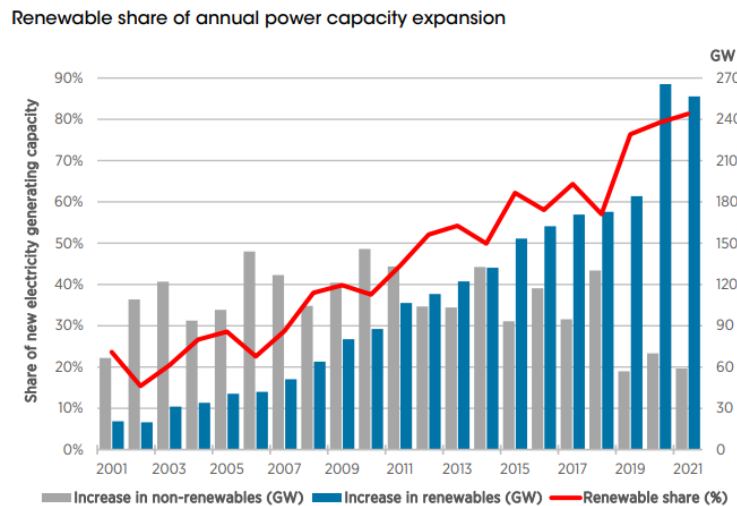


Figura 1.4. Potencia Instalada Anual Renovable vs No Renovables. [8]

Si analizamos ahora la **figura 1.4**, observamos cómo a lo largo de los años va aumentando el porcentaje de potencia renovable instalada acercándose al 81% en 2021, respecto al 79% de 2020, esto indica que se están potenciando las energías renovables frente a las no renovables. [8]

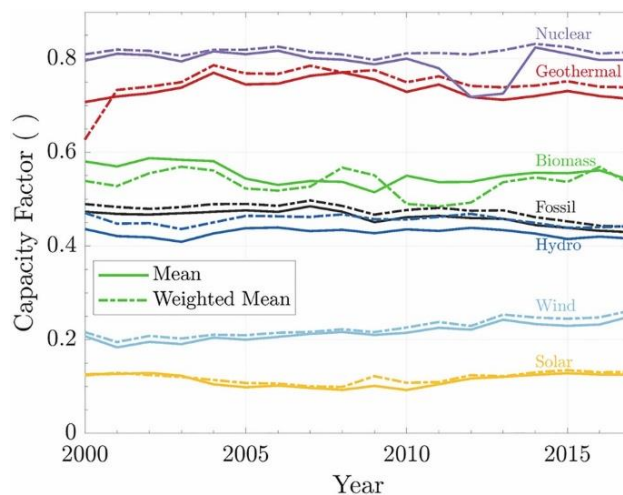


Figura 1.5. Factor de Capacidad de las Fuentes De Energía. [9]

El factor de capacidad se define como la energía obtenida por el sistema respecto a la energía pico que podría conseguir. Por lo tanto, si echamos un vistazo a la **figura 1.5**, la eólica y la solar son las fuentes de energía renovables que menos veces funcionan a potencia nominal por las condiciones cambiantes del sol y del viento, y por tanto las que menos factor de capacidad disponen. Sin embargo, la fuente de energía que dispone de más factor de capacidad es un tipo de energía no renovable como es la energía nuclear. [9]

2. JUSTIFICACIÓN

Los grandes esfuerzos realizados por la UE para fomentar el uso de fuentes de energías renovables pueden llevar a contrarrestar en parte problemas económicos, de aumento de población, los ocasionados por la sequía, guerra de Ucrania, la pandemia, además de problemas asociados al uso de energía no renovables como son los gases de efecto invernadero. Sin embargo, a pesar de los avances llevados a cabo todavía queda bastante trabajo por hacer en temas de regulación y políticas en el sector renovable.

Entre las energías renovables, hay dos tecnologías que están experimentando un gran crecimiento como son la energía eólica y la energía fotovoltaica. Se estima que estas dos fuentes de energías pueden liderar la generación eléctrica a medio-largo plazo (depende del progreso de cada una). Sin embargo, el gran crecimiento que las energías renovables van a experimentar requiere de grandes cantidades de terreno para su instalación, lo que puede provocar que se entre en conflicto con el uso de terrenos para labores agrícolas. [11]

Hay que decidir qué tipo de fuente de energía renovable es la más adecuada para combinarla con el terreno. Partiendo hoy en día de un consumo global de energía en los sistemas agroalimentarios de casi el 30% de la energía disponible a nivel mundial, con más del 70% de esa energía convertida fuera de la granja, se estima que el creciente aumento de la población, junto con los efectos del cambio climático, incrementa la demanda de comida en un 60%, de energía en un 80% y demanda de agua en un 50% para el año 2050. Estos retos requieren de un compromiso “smart” entre los sistemas de agricultura con la conversión de energía, permitiendo una expansión energética de las renovables, reduciendo la huella de carbono en la atmósfera y consiguiendo aumentos en la cadena agua-energía-comida.

La energía solar es considerada la fuente de energía renovable más abundante y con más capacidad de adaptación para integrarse con sistemas convencionales y prácticas de agricultura modernas. Usando diferentes tipos de energía solar se puede producir electricidad y calor, y por lo tanto las necesidades energéticas necesarias para la agricultura. La energía solar se espera convertirse en una de las fuentes renovables más importantes para el mix energético del futuro. Además, la energía solar puede ser considerada como una opción prometedora por su alta disponibilidad y su precio ajustable en muchas regiones del mundo. Otro aspecto positivo es la expansión del mercado en muchos países haciendo una industria cada vez más robusta y próspera.

Otra mejora de la energía solar en la agricultura es la fiabilidad de disposición de energía, altas actividades de la agricultura dependen de combustibles fósiles, estas pueden disminuir significativamente las emisiones GHG. Por otro lado, la mecanización de la agricultura va de la mano de la digitalización, la integración de nuevas tecnologías para cubrir las necesidades realizadas en el campo hace de la electricidad uno de los recursos más necesarios en la agricultura. [12]

En concreto, la energía solar fotovoltaica se considera como una gran opción, al ser un sistema robusto capaz de convivir en terrenos con una naturaleza inestable y un medioambiente hostil, capaz de mejorar las condiciones del terreno agrícola y de proporcionar ahorros de agua y protección de los cultivos. [12]

Por otro lado, los costes de generación de las fuentes de energía renovable, se pueden ver resumidos con el coste nivelado de la energía (LCOE):

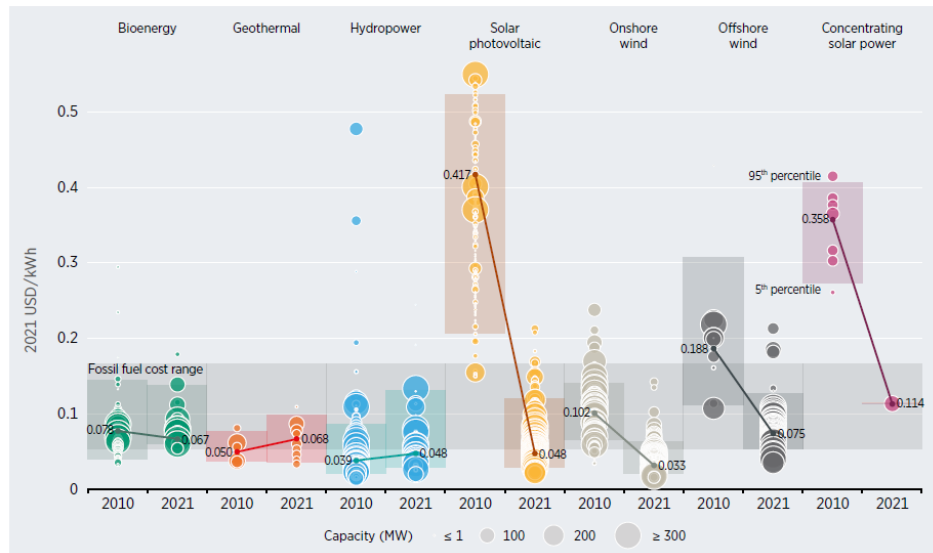


Figura 2.1. LCOE Sistemas de Generación Renovable Utility-Scale 2021. [10]

De todas las fuentes de energía disponibles en la **figura 2.1**, la tecnología que tiene menor coste de generación es la eólica en tierra (onshore) con un precio de 0.033 USD/kWh que corresponde a 0,031 €/kWh. Si esta cifra la queremos comparar con el precio de la energía en el mercado español a día de 02/06/2023, tenemos que convertir a megavatios la cifra, obteniendo 31 €/MWh. Según Selectra el precio medio de la electricidad es de 152,1 €/MWh para el día 02/06/2023, al tener un precio de generación 5 veces inferior al precio de la electricidad, el tiempo de recuperación con descuento de la inversión si nos disponemos a hacer una inversión con esta tecnología es bastante competitivo. Conforme el precio del mercado sea superior mayor va a ser el beneficio en este término. La segunda opción no muy lejos de la eólica sobre tierra es la fotovoltaica con un precio de 0.048 USD/kWh, correspondiente a 45 €/MWh, al ser inferior en cerca de 4 veces el valor de mercado tiene sentido la inversión desde el punto de vista de costes. La concentración fotovoltaica, aunque ha sufrido descensos en el precio de generación está bastante cerca con 110 €/MWh, al haber tan poca diferencia en este día no nos sale la instalación tan rentable desde el punto de vista de costes con estos datos. [10]

Ahora bien, estos datos de LCOE son bastantes optimistas, en la realidad para cada proyecto hay bastante diversidad de precios a la hora de instalar, hay que valorar el precio de instalación en obra, precio de los materiales, estrategias de partición de beneficios de la empresa, toma de decisiones sobre qué tipo de empresa queremos realizar, etc. Esto quiere decir que el LCOE difiere en cada sistema, y simplemente los datos de la **figura**

2.1 establecen una orientación para poder empezar a plantearse el proyecto. Del mismo modo, el estudio se ha realizado para grandes plantas fotovoltaicas, en caso de disminuir el tamaño de las plantas aumentará el LCOE.

Los sistemas eólicos tienen más sentido para sistemas de producción grandes, en los cuales se necesitan grandes cantidades de terreno, sin embargo, los fotovoltaicos pueden instalarse prácticamente para cualquier tamaño del sistema. Esto quiere decir que la integración de sistemas eólicos con agricultura puede no tener sentido en ciertos casos.

Finalmente, se opta por la integración de un sistema agrivoltaico por los beneficios económicos y sobre los cultivos que presentan.

Los **sistemas agrivoltaicos**, que promueven el uso combinado de terrenos agrícolas y generación eléctrica mediante sistemas FV, están surgiendo como una de las vías prometedoras para mitigar los efectos del cambio climático sin poner en riesgo la biodiversidad de los terrenos. En próximos apartados veremos cómo la APV puede favorecer las condiciones de sembrado para lograr una mayor producción agraria y también proporcionar mejores condiciones de funcionamiento a los sistemas FV. Además, como se ha mencionado en la introducción, la falta de agua es uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la humanidad. En este aspecto, la agricultura ha hecho avances para tratar de reducir los efectos de la sequía, como es el uso de invernaderos y el concepto de agricultura sostenible o regenerativa. Ambos métodos si se combinan adecuadamente con fotovoltaica pueden lograr grandes resultados.

A pesar del enorme potencial que tienen los sistemas agrivoltaicos, es necesario seguir avanzando en el desarrollo de nuevas tecnologías FV que se adapten al terreno agrícola y a la gran cantidad de sistemas de agricultura que nos podemos encontrar, cómo se comentará a lo largo de este TFM, y que modifican de diferente manera la producción agrícola y energética.

3. OBJETIVOS

Cómo se ha visto anteriormente, los sistemas agrivoltaicos consisten en el uso del mismo terreno para labores agrícolas y generación de electricidad renovable fotovoltaica. Este tipo de sistemas han acaparado el interés de la comunidad científica por su gran repercusión sobre el nexo energía-comida-agua. Por otro lado, la gran variedad de cultivos y sistemas de agricultura han permitido la integración de gran cantidad de materiales FV, cuya respuesta varía de acuerdo al tipo de cultivo, sistema de agricultura, transparencia del módulo, etc. Esto es muy importante a nivel científico para estudiar el comportamiento real de materiales FV emergentes.

El **objetivo general** de este TFM consiste en contribuir al desarrollo e implementación de los sistemas agrivoltaicos mediante la realización de una revisión de los materiales fotovoltaicos que existen en la actualidad que pueden ser integrados en los sistemas APV, analizando sus ventajas e inconvenientes de acuerdo a la respuesta del cultivo y del sistema FV.

Para ello, se plantean una serie de **objetivos específicos** que van a permitir alcanzar el objetivo general:

- Análisis de la tecnología APV y sus principales sistemas.
- Técnicas agrarias que pueden integrarse en sistemas APV para contrarrestar condiciones atmosféricas extremas y tipos de cultivos para APV.
- Revisión de las principales tecnologías FV actuales, analizando ventajas e inconvenientes.
- Revisión de sistemas APV emergentes: Tipo de cultivo, tipo de instalación FV, ventajas e inconvenientes.

4. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS APV

La energía fotovoltaica ha experimentado un rápido desarrollo en la historia y es por ello que se considera como una tecnología con mucho margen de mejora. Del mismo modo, la APV ha comenzado a estudiarse recientemente y aún hay pocos casos de estudio. Se va a realizar el estudio del estado del arte de los sistemas APV desde su historia hasta sus principales características.

4.1 Tecnología APV

Se conoce como **agrivoltaica** a la tecnología que permite que la tierra se utilice simultáneamente para agricultura y generación de energía eléctrica con fotovoltaica. Esto quiere decir que un campo puede tener un doble propósito: crecimiento de plantas (medido como fotosíntesis) y generación de energía solar. La idea es aumentar la eficiencia del terreno mediante el empleo simultáneo de estas dos funcionalidades, a costa de reducir en cierta medida la productividad agrícola y energética. Sin embargo, en algunos casos se puede mejorar la productividad de los cultivos bajo condiciones de sol controladas e incluso en cierta parte la generación solar llegando a alcanzar en unas buenas condiciones hasta un 186% en eficiencia del terreno. [18]

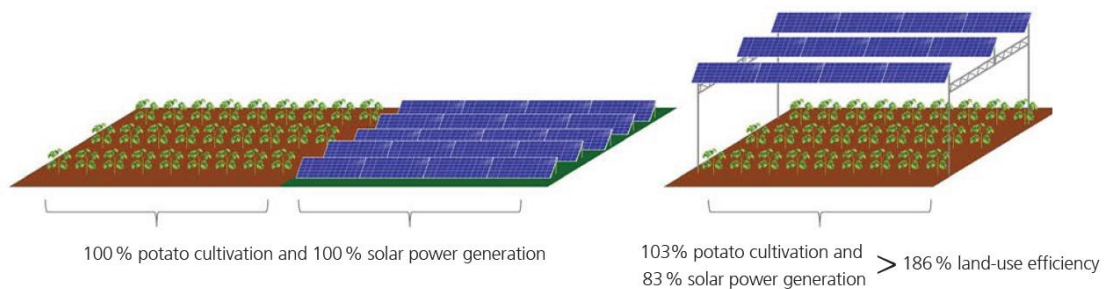


Figura 4.1. Eficiencia del Terreno en Cultivo de Patatas. Dos Situaciones. [18]

La agrivoltaica pretende seguir un **modelo de agricultura sostenible** caracterizado por una alta productividad solar y energética, grandes ahorros de agua, la supervivencia de la fauna local y limitación de la contaminación del suelo, a costa de ser un sistema bastante complejo y con muchas variantes, cada una de ellas con resultados muy diferentes.

Sin embargo, no basta con combinar en un terreno fauna y/o cultivos con la fotovoltaica para adquirir la denominación de agrivoltaica, según [18] se necesitan varias **características adicionales de un sistema agrivoltaico para poder distinguirlo de un fotovoltaico convencional:**

- Adaptación del sistema fotovoltaico a las condiciones del cultivo agrícola y de la fauna ya existente.
- Las pérdidas de terreno una vez instalado el sistema fotovoltaico no debe superar el 10-15%, de acuerdo al tipo de sistema agrivoltaico, del área total del proyecto.
- Comprobación de la disponibilidad de luz, homogeneidad de luz, disponibilidad de agua, etc. y su adaptación a las necesidades de los productos agrícolas.
- Se deben tomar medidas para evitar erosión del suelo y los daños causados por el diseño del sistema fotovoltaico, como su anclaje al suelo y la acumulación de agua.
- Se debe garantizar que el rendimiento agrícola una vez construido sea al menos del 66% del rendimiento de referencia. El rendimiento de referencia se calcula usando el promedio de tres años de rendimiento de la misma tierra agrícola sin fotovoltaica.

Del mismo modo, podemos realizar una clasificación de los requerimientos ideales que debe disponer la tecnología agrivoltaica para su implementación como sistema de producción de energía y como sistema agrícola:

AGRIVOLTAICA	
Sistema de Producción Energética	Sistema Agrícola
• Alta eficiencia. • Fiabilidad. • Bajo Coste.	• Alta Transparencia. • Bajo Peso. • Flexibilidad.

Tabla 4.1. Características Básicas de un Sistema APV.

4.1.1 Historia de la FV

La historia de la fotovoltaica comienza por el año 1839 con el efecto fotovoltaico, Edmond Becquerel es capaz de generar una diferencia de potencial, y por tanto una corriente, a través de un electrodo de platino en una solución conductora a partir de la exposición a diferentes tipos de luz (incluida la solar). Destacar que en esta época la luz era considerada como una onda electromagnética. [14]

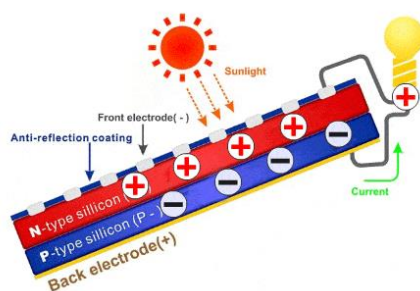


Figura 4.2. Efecto Fotovoltaico. [13]

Más adelante, en el año 1873 el ingeniero eléctrico inglés Willoughby Smith descubrió la propiedad fotoconductor del selenio, esto quiere decir que se vuelve conductor eléctrico cuando absorbe cierto tipo de luz. Esta investigación fue completada en 1876 por William Grylls Adams y Richard Evans Day los cuales llegaron a la conclusión de que el selenio es capaz de generar electricidad al exponerse a la luz solar sin calor ni partes móviles que puedan descomponerse fácilmente, este estudio demostró el gran potencial de la energía solar por su fácil obtención y mantenimiento.

El mayor hito de la fotovoltaica tuvo lugar en el año 1883 por el inventor neoyorquino Charles Fritts que fue capaz de materializar el efecto fotovoltaico con un dispositivo compuesto por selenio y cubierto con una fina capa de oro capaz de generar energía eléctrica a partir de la radiación solar, este dispositivo con una tasa de conversión de energía inferior al 1% es considerada como la primera célula solar de la historia. [14]



Figura 4.3. Primera célula solar por Charles Fritts en 1883. [14]

Un concepto similar al efecto fotovoltaico, pero sin generación como tal es el efecto fotoeléctrico descubierto y descrito por Heinrich Hertz en 1887, consiste en la emisión de electrones cuando sobre un metal incide diferente radiación luminosa, es decir, descubrió que la radiación ultravioleta es capaz de hacer saltar electrones a más distancia que cuando se deja en la oscuridad [15]

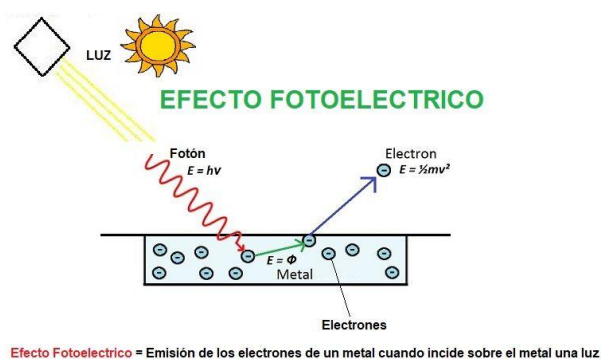


Figura 4.4. Efecto Fotoeléctrico. [13]

Mientras intentaban buscar una explicación al efecto fotoeléctrico, Wilhelm Hallwachs realiza una célula solar semiconductora de unión con óxido de cobre y cobre en el año 1904. [15]

Más tarde, en el año 1905 Albert Einstein publica el artículo en “Annalen der Physik” dando una interpretación teórica del efecto fotoeléctrico. En dicho artículo se establece que la luz puede ser vista como un paquete de partículas de energía, llamadas fotones. Cuatro años más tarde introdujo la dualidad onda-partícula en la física, por el cual un fotón puede aparecer como una onda o como una partícula. La explicación del efecto fotoeléctrico llevó a Albert Einstein a ser el ganador del premio Nobel en el año 1921.

Hoy en día las células solares basan su funcionamiento en la explicación de dicho efecto fotoeléctrico. [15]

Años más tarde, en el 1914 Sven Ason Berglund realiza una patente sobre métodos para incrementar la capacidad de las células solares.

Otro de los mayores hitos en la fotovoltaica es el invento del método Czochralski en 1918, este método es capaz de conseguir el crecimiento de monocristales de metal, es decir permite la cristalización del metal en un solo cristal a partir de un cristal semilla depositado en un baño de ese mismo metal.

La evolución de la fotovoltaica se paralizó por el gran coste y poca eficiencia de las células, aunque en el año 1950 los laboratorios Bell comienzan a producir células solares para actividades espaciales. La introducción del silicio en las células solares tuvo lugar años después, sobre el año 1953, donde Gerald Pearson comienza a investigar células solares con litio-silicio. Esta introducción del silicio en el panorama fotovoltaico llevó a los laboratorios Bell en el año 1954 a inventar la primera célula solar moderna fabricada con silicio con una eficiencia cerca del 6%. [15]



Figura 4.5. Panel solar de prueba de Laboratorios Bell año 1954. [14]

La entrada en mercado de las células solares tuvo lugar en 1955 por la empresa Hoffman Electronics con células de 14 mW con una eficiencia cercana al 2% y un coste por célula

de aproximadamente 25\$. Dos años más tarde, esta misma empresa desarrolla células con eficiencia del 8%. [15]

Año tras año se va repitiendo esta mejora en eficiencia hasta llegar a cerca de un 14% en el año 1962 con la introducción de células solares de 14 W en el satélite de comunicaciones Telstar. Una nueva tecnología fotovoltaica aparece en 1970 por Zhores Alferov, las primeras células solares de GaAs con el objetivo de mejorar las eficiencias obtenidas hasta entonces (no se conocen datos, solo mencionan que son de alta eficiencia).

A finales de los 70, la crisis del petróleo incrementa el interés por la energía fotovoltaica y su integración en edificios. Además, se requería una reducción en los costes de fabricación. Para conseguir estos objetivos el Instituto de Conversión de Energía de la Universidad de Delaware desarrolla en 1980 la primera célula solar de película delgada con una eficiencia de en torno al 10% utilizando tecnología de $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$. [15]

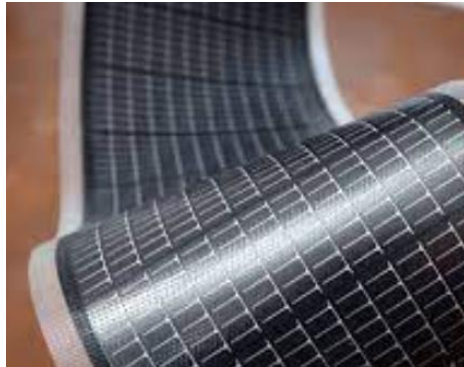


Figura 4.6. Célula solar de película delgada. [14]

La integración de fotovoltaica en edificios (BIPV) tiene lugar por primera vez en el Centro Intercultural de la Universidad de Georgetown en una instalación sobre el tejado en el año 1984. Un año después en 1985, el Centro para Ingeniería Fotovoltaica de la Universidad de Nueva Gales crean las primeras células solares con una eficiencia del 20%. [15]

En 1991 se desarrollan células fotoelectroquímicas eficientes, dentro de esta clasificación se encuentran las células solares sensibilizadas por colorante (DSSC) que son células solares de bajo coste pertenecientes al grupo de película delgada. [14]

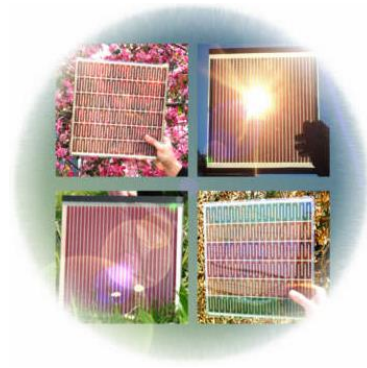


Figura 4.7. Células solares sensibilizadas por colorante (DSSC). [14]

Un año después, por 1992 la Universidad de Florida fabrica una célula de película delgada con una eficiencia del 15,89%. Dos años más tarde, en 1994 el NREL recién inaugurado desarrolla una célula multiunión de concentración (180 soles) de GaInP/GaAs considerada como la primera célula capaz de superar una eficiencia de conversión del 30%. Esta tecnología alcanza en 2006 la barrera de eficiencia del 40%, mientras tanto se empiezan a utilizar celdas de silicio policristalino de forma comercial por su reducido precio. [14], [15]

Durante los siguientes años se ha reducido el coste de producción del silicio monocristalino y se han realizado diferentes configuraciones que han mejorado la eficiencia hasta alcanzar eficiencia en 2014 de un 25,6% para esta tecnología. Este hecho hace que a día de hoy sea la tecnología más utilizada comercialmente al tener una curva de aprendizaje superior y tener unos costes bastante competitivos. [15]

Nos queda por hablar en último lugar de las perovskitas y de las células orgánicas que son dos tecnologías que no se están desarrollando comercialmente por sus elevados precios de fabricación al no estar fabricándose en masa. Respecto a las primeras, aunque desde 1839 se conoce el material de perovskita no es hasta 2012 cuando la Universidad de Oxford publicó en la revista Science las propiedades fotovoltaicas de este material y a partir de 2013 se comenzaron a investigar las células de perovskita con eficiencias cercanas al 14% hasta alcanzar en 2023 los 25,8%. Por otro lado, las células orgánicas, aunque hay algunas investigaciones desde el año 1989, no fue hasta 2001 cuando comenzó la gran escala en investigación de esta tecnología. La producción comenzó por la empresa Konarka Technologies en 2008 con módulos con una eficiencia inicial del 3-5%, empresa la cual entró pocos años después en banca rota paralizando aún más su desarrollo. A partir de 2015, esta tecnología volvió a despertar con una estructura tándem que consiguió superar los 10% de eficiencia. Nuevamente, en 2018 volvió a alcanzar con la misma estructura una eficiencia de 17,3% en laboratorio lo cual hizo que se retomara la investigación por este material tan prometedor. [13], [14], [15], [16]

4.1.2 Historia de la APV

La historia de la agrivoltaica comienza en 1981 con un artículo de investigación “Potatoes under the collector” publicado por Adolf Goetzberger y Armin Zastrow, en él se indicaba la idea del uso dual de la tierra con módulos fotovoltaicos a cierta altura para generar electricidad y cultivar alimentos debajo de estas estructuras. Este es el diseño clásico de la agrivoltaica conocida como agrivoltaica horizontal o aérea. Pero no fue hasta 2004 cuando en Japón el investigador Akira Nagashima analizó el crecimiento de las plantas debajo de fotovoltaica a partir del estudio del primer sistema piloto instalado ese mismo año y promovió la tecnología con el cabecero de “solar sharing”. [11]

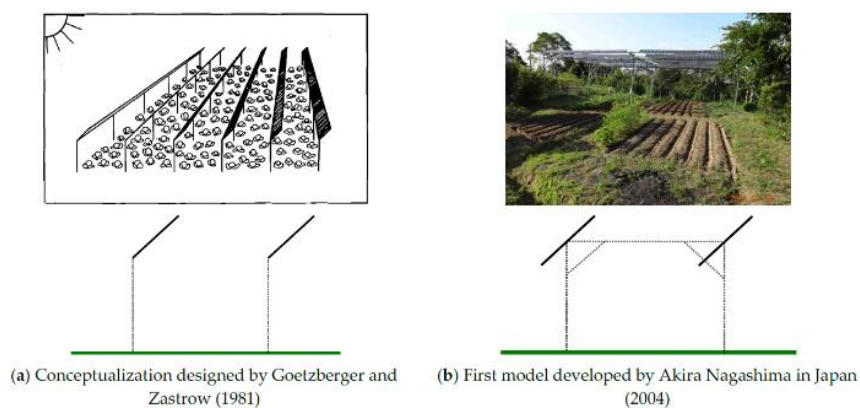


Figura 4.8. Primeros modelos de sistemas agrivoltaicos. [11]

El primer proyecto piloto experimental fue instalado en Francia, cerca de Montpellier, en el año 2010 formado por módulos monocristalinos montados a una altura de 4 metros sobre el suelo. [11]



Figura 4.9. Sistema agrivoltaico experimental en Motpellier, Francia. [11]

En el año 2012 se instalan los dos primeros sistemas agrivoltaicos comerciales instalados en Castelvetro Piacentino (1,3 MWp) y Monticelli d'Ongina (3,2 MWp) en el norte de Italia cubriendo un área de 7 ha y 20 ha, respectivamente. [11]



Figura 4.10. Sistema agrivoltaico comercial en Castelvetro, Italia. [11]

Fue en el año 2013, cuando en Japón gracias a las investigaciones de Akira Nagashima se promovió un programa de financiación por parte del gobierno japonés. En el año 2014 China instaló los primeros sistemas de agrivoltaica a gran escala, además el gobierno promocionó ésta tecnología con ayudas desde ese mismo año haciendo que a día de hoy sea el país con mayor capacidad instalada en el mundo.

Desde el año 2015, nuevos avances de la fotovoltaica permitieron el montaje de los paneles en vertical en el terreno de cultivo en paralelo con la agricultura, esto permitió aún más el desarrollo de sistemas a gran escala.

Francia es el primer país europeo en apoyar la agrivoltaica con los programas de financiación de 2017 y realizaron en 2018 el primer sistema agrivoltaico en Pionlec con una capacidad instalada de 2,2 MWp instalada sobre unos viñedos de 4,5 ha. [11], [18]



Figura 4.11. Sistema agrivoltaico comercial en Pionlec, Francia. [11]

También, en el año 2018 al disponer de diferentes configuraciones para los sistemas agrivoltaicos era necesaria una clasificación y una primera aproximación fue dada por Lasta y Konrad, aunque Brecht años después sugirió otra clasificación distinguiendo las dos aplicaciones de sistemas agrivoltaica, la producción de las plantas, etc. Esta clasificación la veremos en su momento cuando comentemos los sistemas agrivoltaicos. [17]

Otros países han realizado programas de ayudas gubernamentales y se han unido en la carrera por la agrivoltaica como Estados Unidos (desde 2018), Corea del Sur, India, Israel, Alemania e Italia. [17]

La potencia instalada ha incrementado desde 5 MWp en 2012 hasta los 14 GWp en 2021. La implementación de agrivoltaica ha tenido lugar en climas subtropicales y regiones semiáridas, queda todavía investigar la tecnología para el resto de climas, pero el potencial para este tipo de climas se prevé ser bastante alto. [11], [17], [18]

4.1.3 Impactos de la Tecnología. Beneficios y Retos.

Se pretenden conocer cuáles son los impactos de determinados factores sobre la agrivoltaica para conocer sus éxitos y limitaciones, para más adelante realizar una tabla con los beneficios y retos de esta tecnología de forma general.

Comenzamos con los conocidos como **factores situacionales** entre los que se incluye la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del viento, dirección del viento, temperatura del suelo, humedad del suelo, temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor (VPD), definido este último como la diferencia entre la cantidad de vapor de agua máxima que puede llegar a contener el aire y la cantidad presente en el aire en ese momento. En [27] se realiza una revisión de artículos donde se estudian algunos de ellos (en ninguno de ellos se estudian los 8 en conjunto) y sus posibles efectos sobre determinados tipos de cultivo. Como resumen de los artículos [18], [27] y [30], podemos observar los siguientes impactos:

Factor Situacional	Impactos
Temperatura del aire	Ligera disminución de la temperatura ambiente a causa de los paneles y la presencia de plantas.
Humedad	Reducción de las elevadas variaciones de humedad a lo largo del día y aumento de la humedad relativa, sobre todo en verano, como resultado del crecimiento de cultivos sobre sistemas FV y de la altura del sistema APV.
Velocidad del viento	Cambios significativos en la velocidad del viento, de acuerdo al tipo de sistema, que provoca impactos importantes sobre el crecimiento de los cultivos.

Dirección del viento	Cambios aleatorios en la velocidad del viento a causa de los cultivos en sistemas APV.
Temperatura del suelo	Las variaciones de temperatura del suelo provocan disparidad en la cantidad de hojas producidas por las plantas.
Humedad del suelo	Una distribución heterogénea del sombreado causa grandes cambios en los perfiles de humedad y temperatura afectando al crecimiento de los cultivos.
Temperatura de la planta y tasa de crecimiento	La temperatura de los cultivos no sufren cambios considerables bajo sombreado y la tasa de crecimiento es similar a la de un sistema de agricultura convencional.
Déficit de presión de vapor (VPD)	Durante el crecimiento de los cultivos, el VPD en un sistema APV es inferior que en un sistema de agricultura convencional, evitando el estrés hídrico y beneficiando a su crecimiento.

Tabla 4.2. Impactos de Factores Situacionales sobre APV.

Además de los impactos de los factores situacionales, hay que revisar los **impactos de ciertos factores determinantes para los sistemas de generación en sistemas agrivoltaicos**, los cuales son expuestos por [27]:

Factor Determinante	Impactos
Radiación	Aunque algunos materiales FV transforman correctamente la radiación difusa, la radiación directa es más efectiva para la generación eléctrica.
Inclinación y Azimuth	El rendimiento de un panel FV se ve afectado por la orientación e inclinación del mismo, consiguiendo el máximo de radiación para AOI de 0°.
Temperatura ambiente	La eficiencia fotovoltaica disminuye con una tasa de aproximadamente un 0.5% a medida que la temperatura ambiente incrementa en 1 °C.
Temperatura del módulo	En [86] bajo unas condiciones particulares se han obtenido reducciones de temperatura del módulo en torno a 8.9 °C en sistemas APV frente a sistemas FV convencionales.
Acumulación de polvo	La densidad y tamaño de las partículas de polvo reducen significativamente la generación eléctrica entre un 1-3%/año.
Granja solar existente	Ajustar los tipos de cultivos a las necesidades estructurales de la granja para lograr una mayor productividad agrivoltaica.

Tabla 4.3. Impactos de los Sistemas de Generación para APV.

Para finalizar con los impactos, se presenta la **tabla 4.4** que determina los **impactos de factores que afectan conjuntamente a la producción agraria y fotovoltaica**, tal y cómo realiza [27]:

Factor Determinante	Impactos
Recolección de agua de lluvia	Requiere de una orientación óptima para maximizar su recolección, pero esta cantidad de agua es suficiente para limpiar la suciedad de módulos, incluso en algunos casos como pequeño respaldo para riego.
Idoneidad de las plantas	Cultivos con altos niveles de tasa fotosintética y tolerantes a la sombra son los más ideales para APV.
Pastoreo de ganado	Riesgo de daño de los paneles solares por animales o viceversa.
Sombreado	Reduce la cantidad de irradiación recibida por los cultivos afectando a su productividad, ya sea positiva o negativamente dependiendo del tipo de cultivo y del porcentaje de sombreado, y aumenta la productividad energética.

Tabla 4.4. Impactos sobre la Producción Energética y Agraria en APV.

Con el estudio de impactos hemos sido capaces de demostrar tanto los éxitos de esta tecnología como las limitaciones de la misma. En general, para lograr sistemas exitosos se requieren de sistemas bastante exclusivos regidos por características de diseño muy personalizadas. Esta es la principal causa por lo que la tecnología APV es una tecnología emergente que carece de estudios representativos para cada tipo de cultivo y condiciones. Por ello, el **análisis de beneficios y retos de la tecnología** se ha realizado con un toque optimista sobre los sistemas ya estudiados, por lo que a partir de la información contenida en [27], [31] y [32], obtenemos:

Beneficios	Retos
- Incrementa la eficiencia de uso del terreno. - Fomenta una agricultura sostenible, persiguiendo la resiliencia del sector. - Es una fuente de generación renovable que es posible auto-consumir en el propio recinto. - Favorece al aumento de eficiencia del agua al reducir los niveles de evapotranspiración.	<u>Respuesta de la planta:</u> - Optimizar el sombreado de la planta para potenciar su crecimiento. - Establecer el tipo de cultivo adecuado para cada clima. - Control sobre la calidad de los productos obtenidos.

• El sombreado puede afectar positivamente a factores ambientales como la temperatura y humedad mejorando las condiciones de crecimiento de los cultivos y aumentando la productividad agraria. • Permite una selección del espectro solar incidente sobre las plantas: la luz ultravioleta es la responsable del “quemado” de los cultivos y la infrarroja aumenta la temperatura de la planta impidiendo el proceso de fotosíntesis. • Protección de los cultivos frente a condiciones climatológicas adversas. • Mejora la actuación FV al reducir la temperatura de los módulos y al reutilizar el agua almacenada para limpiar los paneles. • Gran variedad de materiales FV para el diseño del sistema APV. • Adaptación a cualquier tipo de cultivo, mejoras significativas en cultivos de sombra. • Numerosa cantidad de diseños de sistemas APV, con posibilidad de modularidad para no afectar al entorno. • Se produce una doble fuente de ingresos para los agricultores: energía eléctrica y alimentos. • El aprovechamiento de las infraestructuras de cultivos ya existentes también contribuye a un beneficio para la sociedad.	<u>Desarrollo FV:</u> • Desarrollo de tecnologías FV novedosas para aplicación en APV. • Avance hacia tecnologías FV transparentes, eficientes y robustas. • Seleccionar un material FV flexible, ligero y transparente como apuesta para acaparar gran parte del mercado y reducir así costes de producción. <u>Modelado:</u> • Conseguir modelos que nos permita estimar de forma conjunta la productividad agraria y energética. • Avances del impacto de la suciedad sobre la luz recibida por los cultivos y por las células FV. • Desarrollo de herramientas económicas que tengan en cuenta la degradación y sean precisas para APV. <u>Política y Sociedad:</u> • Realizar políticas universales centradas en APV potenciando incentivos y subvenciones para su rápida integración. • Mejora en la atención de los problemas del agricultor para romper las barreras sociales. • Ofrecer un marco regulatorio personalizado para APV que agilice la puesta en marcha y el desarrollo de la actividad. • Regulación de tarifas para incentivar a invertir a empresas FV y beneficiar al agricultor.
---	--

Tabla 4.5. Beneficios y Retos de la Tecnología APV.

4.1.4 Clasificación de los Sistemas APV

Las soluciones técnicas para integrar la energía fotovoltaica en la agricultura son tan diversas como las propias técnicas de agricultura. Para asegurar unas condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas, los sistemas agrivoltaicos deben realizar unos ajustes de diseño más allá de los propios de un sistema fotovoltaico convencional. De acuerdo

con la clasificación realizada a cabo por el Instituto Fraunhofer de Energía Solar, los sistemas agrivoltaicos se clasifican ampliamente a nivel de sistema en dos ramas, los sistemas abiertos y cerrados, tal y como se muestra en la siguiente figura: [18]

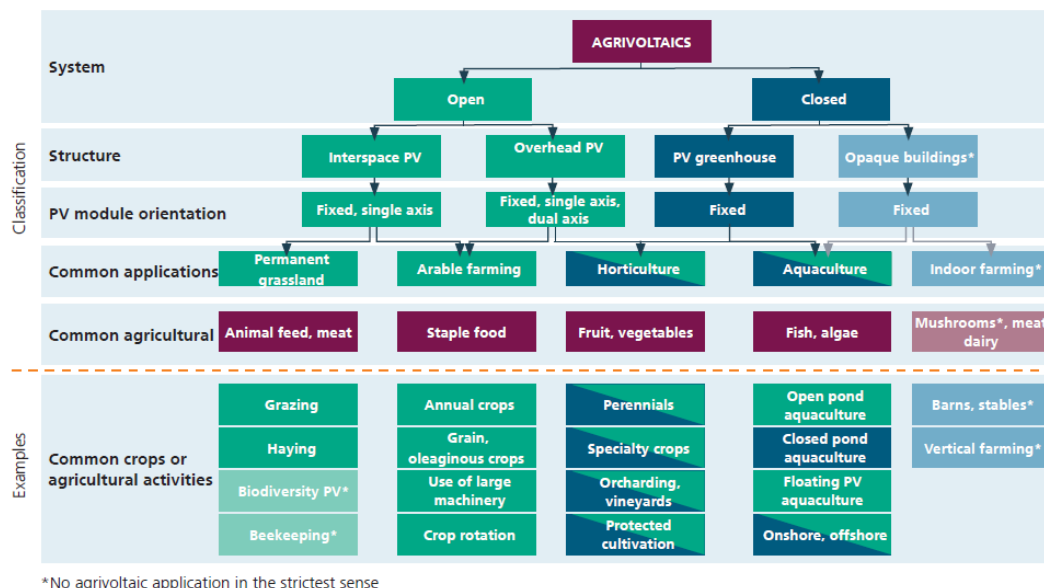


Figura 4.12. Clasificación Típica de los Sistemas APV. [18]

Los **sistemas cerrados** se pueden clasificar nuevamente de acuerdo a su estructura en invernaderos fotovoltaicos y construcciones opacas, aunque esta última es más bien un tipo de fábrica o casa con autoconsumo FV y técnicas de agricultura en su interior, luego no es APV en sentido estricto y no se va a considerar en el trabajo. Tal y como menciona [33], los invernaderos fotovoltaicos son espacios cerrados cubiertos con materiales transparentes o translúcidos como cristal, plástico de fibra reforzada y película de polietileno, en los cuales la luz pasa a través de su recubrimiento hasta incidir con su superficie interior causando un atrapamiento del calor dentro del invernadero y aumentando su temperatura, logrando unas condiciones de crecimiento en su interior más favorable para los cultivos y protegiendo a los cultivos de enfermedades, pesticidas, condiciones climatológicas, lo cual induce a una mejora en la productividad y eficiencia del terreno. Al ser esencial la transparencia en este tipo de estructuras, las tecnologías semitransparentes juegan un papel fundamental en invernaderos fotovoltaicos.



Figura 4.13. Invernadero FV con Tecnología FV Semitransparente. [33]

Los **sistemas abiertos** en cambio se disponen sobre espacios abiertos. Las estructuras fundamentales que nos podemos encontrar son la fotovoltaica interespacial (Interspace PV) y la fotovoltaica aérea (Overhead PV). La fotovoltaica interespacial dispone de cultivos en el espaciado producido en los módulos FV mientras que en la aérea los cultivos se disponen directamente debajo de la generación eléctrica, por lo que esta última dispone de más eficiencia del terreno y proporciona mayor protección para los cultivos a consta de aumentar los costes de instalación y aumentar el impacto sobre el medioambiente.

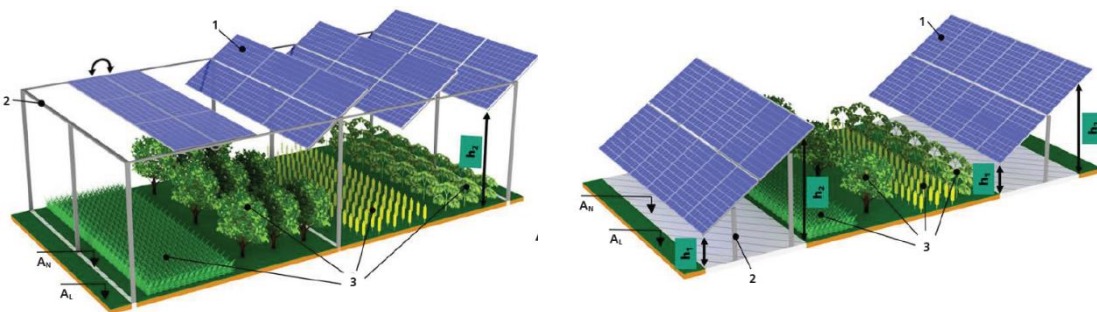


Figura 4.14. Overhead PV/ Interspace PV. [18]

De acuerdo a la norma DIN SPEC 91434, los sistemas aéreos deben como mínimo disponer de una altura de 2.1 m desde el suelo a la zona más próxima del módulo, mientras que en sistemas interespaciales se permite una altura inferior a los 2.1 m, pero esta va a depender de la maquinaria empleada para recoger el cultivo. [18]

En la instalación de este tipo de sistemas abiertos debe considerarse el impacto de la suciedad que puede afectar a la propia fertilidad del suelo y a la producción energética, es por ello que se toman acciones como el uso de maquinaria ligera y la rehabilitación de caminos para reducir su efecto. [17]

Desde el punto de vista fotovoltaico, la **estrategia de seguimiento del sol** va a ser fundamental para aumentar la productividad energética ayudando también a limitar la cantidad de suciedad sobre los módulos, sin embargo, por las condiciones ambientales y

estructurales del sistema hay casos como los sistemas cerrados dónde se desechan las estrategias de seguimiento, o el caso de los sistemas abiertos interespaciales que evitan el uso de seguidores a dos ejes.

Para finalizar con los tipos de sistemas destacar las **aplicaciones comunes** de cada uno de ellos. En los invernaderos fotovoltaicos destacan la *horticultura* y *acuacultura*, las cuales se ven altamente beneficiadas por un sistema altamente productivo como son los invernaderos. La fotovoltaica aérea ve sus oportunidades sobre todo en aplicaciones de *horticultura* por la protección extra que ofrece para las plantas, la posibilidad de recoger el agua de lluvia más eficientemente y la facilidad de recolección del producto, aunque también el *cultivo de herbáceos* (caso de los cereales) es empleado a pesar de requerir alturas suficientes para entrar maquinaria pesada y aumentar bastante el coste de la estructura. Un sistema interespacial resulta más beneficioso en el *cultivo de herbáceos*, ya que la altura de la maquinaria no es un problema para su recolección, pero su baja productividad conjunta lleva al uso de módulos FV verticales que mejoran la respuesta fotovoltaica en las horas extremas del día, a consta de empeorar las horas centrales, y facilita y mejora la producción agraria. Dentro de los sistemas interespaciales también se puede optar por un *pasto permanente* que consiste en dedicar durante varios años la tierra a la producción de pasto (cultivos herbáceos, plantas silvestres, etc.) pudiendo ser cultivado o de forma natural, sin rotación del cultivo y con el objetivo de alimentar a los animales, luego es una estrategia que potencia la biodiversidad del terreno sin sufrir gran erosión del suelo al evitar tareas intensivas. [17], [18], [33]



Figura 4.15. Pasto Permanente sobre FV-Vertical. [17]

4.2 Evolución de la Agricultura

Se pretende destacar el uso de la agricultura. Dentro de esta temática debemos de contemplar sus principales preocupaciones y tratar de darles respuesta a través de su evolución hacia una agricultura sostenible. Además, conoceremos las características o respuestas de la planta ante la luz, y los tipos de cultivo más adecuados de acuerdo a esa respuesta para su posible integración con un sistema agrivoltaico.

4.2.1 Modelos de Agricultura

La producción de alimentos agrícolas o agricultura es una tarea fundamental para la supervivencia de los seres humanos, y por ello es vital una constante revisión para una mejora de sus condiciones. Además, la agricultura es esencial para el desarrollo de la ganadería, y más aún en la actualidad con la gran desaparición de terreno virgen que impide el alimento “salvaje” de los animales. Por tanto, se puede decir que la agricultura es la solución natural del futuro para producir alimentos.

4.2.1-1 Agricultura Tradicional

La **agricultura tradicional** se basaba en técnicas rudimentarias tales como energía animal y labores manuales para su realización. Estos sistemas están desechados en la actualidad por su gran ineficacia, ya que son tareas muy costosas (referente a la cantidad de trabajo) en las que se necesita gran cantidad de tiempo para cumplir dichas tareas, impedía el tratamiento sobre una zona extensa, y la cosecha producida era escasa. [12], [19], [20]



Figura 4.16. Agricultura Tradicional. [19]

Ventajas	Inconvenientes
• No necesita energía eléctrica. • Mejora la cantidad de trabajo en la población. • No utiliza productos químicos, usa fertilizantes orgánicos. • Bajo impacto e incluso mejoras en la fauna. • Posible implementación dentro de una vivienda.	• Tareas muy costosas por gran cantidad de mano de obra y tiempo empleado. • Baja productividad de cosecha. • Contribuye a la deforestación porque requiere de grandes zonas para conseguir cantidades aceptables de productos. • Agota los nutrientes de la tierra de cultivo, requiere renovación natural sin cultivo durante ciertos años. • Poca diversidad de cultivos. • Las condiciones climatológicas adversas tienen un efecto nefasto sobre la cosecha. • Gran aumento de la población y de la demanda de comida.

Tabla 4.6. Ventajas e Inconvenientes Agricultura Tradicional.

4.2.1-2 Agricultura Industrial o Intensiva

Para solucionar la ineficacia de la agricultura tradicional surge la **agricultura industrial o agricultura intensiva**, que se basa en la sustitución de las tareas manuales por sistemas automáticos industrializados que, aunque tienen el principal inconveniente social de disminuir la mano de obra, permite una reducción significativa de costes para el productor. También permite un tratamiento sobre una zona extensa en un periodo de tiempo relativamente corto, y el uso de pesticidas, herbicidas y otros productos químicos para controlar las plagas y mejorar el crecimiento de los cultivos, aumentando así la productividad de la cosecha.

Idealmente, este tipo de agricultura es la más eficaz y viable económicamente, sin embargo, siguen apareciendo preocupaciones.

- Preocupaciones ecológicas: disminución de la productividad del suelo a causa de la erosión de la capa superficial del cultivo causada por el viento y el agua, deforestación, efecto nocivo de los productos químicos, desarrollo de una resistencia de determinadas especies dañinas para el cultivo, necesidad de reducción de los gases de efecto invernadero de acuerdo a la agenda 2030 de las Naciones Unidas, escasez de agua, etc.
- Preocupaciones sociales y económicas: la gran cantidad de planes, decisiones y leyes llevadas a cabo por los gobiernos imponen grandes exigencias, se manifiestan en grandes cantidades de dinero, que dificulta la entrada al negocio de agricultores.
- Impactos en la salud humana: las prácticas industrializadas normalmente suponen un riesgo potencial para la salud de los seres vivos a causa del uso de pesticidas y nitratos que ocasionan la contaminación del agua y de los propios alimentos. Además, los combustibles empleados por los sistemas son en su mayoría energías no renovables que aumentan los gases de efecto invernadero. [12], [20], [21]



Figura 4.17. Agricultura Intensiva. [20]

Ventajas	Inconvenientes
• Alta productividad agrícola. • Permite una producción a gran escala. • Mecanización de procesos. • Sistema rentable desde el punto de vista económico. • Permite gran variedad de productos en el mismo terreno. • Satisface las necesidades de gran cantidad de población.	• Sistema con mayor complejidad. • Contaminación del agua y de los alimentos a causa de los productos químicos. • Alta degradación del contenido orgánico del suelo. • Necesita muy elevadas cantidades de agua. • Contribuye a la deforestación y pérdida de la fauna. • Aumento de la emisión de gases contaminantes por la mecanización de los procesos. • Cumplimiento de elevadas leyes y decisiones que dificultan la entrada al mercado.

Tabla 4.7. Ventajas e Inconvenientes Agricultura Intensiva.

4.2.1-3 Agricultura Sostenible

La **agricultura sostenible** surge como respuesta a las principales preocupaciones relacionadas con el medioambiente manteniendo una alta productividad y la mecanización de los procesos. En la actualidad también recibe el nombre de agricultura regenerativa.

Es difícil dar una definición de agricultura sostenible, en [80] se lanzan varias de ellas y como conclusión de todas ellas podemos decir que la agricultura sostenible es aquel tipo de agricultura que combina todas las necesidades básicas de las personas, involucrándolas en comunidades sostenibles que otorgan de una organización económica y social, a la vez que se protege el medioambiente, la fertilidad de la tierra, los cultivos de condiciones meteorológicas adversas, y se realizan programas de gestión de plagas, todo ello manteniendo una alta productividad en los cultivos. Para poder desarrollarse y conseguir sus objetivos es necesario un enfoque sostenible:

- Sostenibilidad del medio ambiente: conocer las necesidades básicas de las personas, mantener las densidades de población ajustadas a la capacidad de la zona, ajuste de los perfiles de consumo y diseño de sistemas de energías renovables, buscar soluciones para sistemas no renovables ya construidos (conservar, reutilizar y reciclar), combinación de sistemas de energía con el terreno productivo, y mantener un impacto medioambiental lo más bajo posible.

Una vez sumidos dentro de un ambiente sostenible, para el desarrollo de la agricultura sostenible se pueden realizar las siguientes prácticas:

- Prácticas de agricultura sostenible: podemos encontrarnos diversas prácticas sostenibles, algunas realizadas a la vez, como son:
 - **Cobertura vegetal**: tiene que ver con el mantenimiento de forma temporal o permanente de una cubierta vegetal sobre la tierra de cultivo con el fin de

mantener fértil la tierra, protegiéndola frente a la erosión, conservando el agua, e incluso proporciona de alimento a la fauna de la zona.

- **Barbecho o labranza cero:** reducción del laboreo de la totalidad o una parte de la tierra de cultivos para la recuperación de la fertilidad y protección de la fauna existente, a costa de perder el cultivo durante ese periodo.
- **Rotación de los cultivos:** realizar ciclos de cultivo alternos es una tarea que previene el asentamiento de plagas, enfermedades y malezas, proporciona fuentes alternativas de nitrógeno al suelo, reduce su erosión y reduce la cantidad de agua contaminada por los productos químicos.
- **Mantillo o acolchado:** cobertura de materia orgánica (compost o estiércol) colocada en los terrenos de cultivo que actúan como abonos naturales mejorando la fertilidad del suelo, al conservar la humedad y la temperatura del suelo, a la vez que evita la proliferación de malezas.
- **Control animal de las plagas:** sustitución de los químicos por animales que no dañan el cultivo establecido y se encargan de realizar un control biológico de las plagas. [21], [22], [23]



Figura 4.18. Agricultura Sostenible. [22]

Un ejemplo de agricultura sostenible puede ser la **combinación de tierras de cultivo con la tecnología fotovoltaica**, ya que la tecnología fotovoltaica se postula como la mejor apuesta renovable para su inclusión en conjunto con la agricultura, al ser una tecnología madura, permite ahorro de agua, conserva la humedad del suelo, protege frente al viento y las fluctuaciones de temperatura, protege frente a tormentas, e incluso aumenta la productividad alimentaria, características que veremos más en profundidad en el siguiente capítulo.

Dentro de esta categoría podemos decir que los invernaderos con fotovoltaica proporcionan unas grandes condiciones microclimáticas para las plantas (facilita su crecimiento óptimo, se extiende la duración de la producción, se obtienen más cantidad de productos y de mejor calidad) a la vez que generan energía en algunos casos suficiente para abastecer las necesidades energéticas del invernadero (climatización, iluminación, etc.). Sin embargo, no todos los invernaderos son sostenibles, deben cumplir ciertas características de las mencionadas anteriormente para tratarse de una práctica de agricultura sostenible. [24]



Figura 4.19. Invernaderos Fotovoltaicos. [24]

Ventajas	Inconvenientes
• Cosecha altamente productiva. • Ahorro de agua y control climatológico. • Suelos fértiles y control de la maleza. • Abonos e insecticidas sin productos químicos. • Protección de la fauna. • Resiliencia de la agricultura a largo plazo. • Gran aceptación social. • Reducción de los gases de efecto invernadero. • En algunos casos promueve un sistema de producción combinando diferentes tipos de energía (eléctrica, térmica, acumulación de agua).	• Requiere de normativas y leyes que promuevan su crecimiento. • Aumento en la complejidad del sistema. • Requiere de nuevos conocimientos y habilidades en el agricultor. • Una implementación totalmente efectiva necesita de bastante tiempo. • Menor rendimiento a corto plazo, necesita de tiempo para una mejora de la biodiversidad y el suelo. • Sistema menos eficiente en gestión de plagas y enfermedades. • Menos eficiencia en la gestión de la maleza.

Tabla 4.8. Ventajas e Inconvenientes Agricultura Sostenible.

4.2.2 Respuesta de la planta a la luz

La luz es uno de los factores claves involucrados en el ciclo de vida completo de las plantas. No solo sirve como fuente de energía para la fotosíntesis, la cual comprende todas las reacciones fotofísicas, fotoquímicas y químicas mediante las cuales las plantas son capaces de convertir la energía de la luz (además del agua y dióxido de carbono) en azúcar de bajo peso molecular y oxígeno. También, la luz actúa como una señal que informa a las plantas sobre su entorno, constituyendo un programa de desarrollo complejo denominado fotomorfogénesis, capaz de modular una amplia gama de respuestas desde la germinación hasta la fructificación. Todas estas funciones son factibles a causa de las cualidades de las plantas de percibir con precisión las fluctuaciones en la intensidad, la calidad espectral, la direccionalidad, y la progresión diurna y estacional de la luz incidente mediante el uso de fotorreceptores. [24]

4.2.2-1 Fotosíntesis

La **fotosíntesis** es el proceso de conversión de la energía lumínica en energía química llevado a cabo sobre todo en las hojas de las plantas y otros organismos fotosintéticos como las algas y microalgas (aunque en menor medida también puede ocurrir el proceso en el tallo). En este proceso la luz se consume para convertir el agua y el dióxido de carbono (CO_2) en oxígeno (O_2), azúcar y energía calorífica, como puede verse en la siguiente figura:

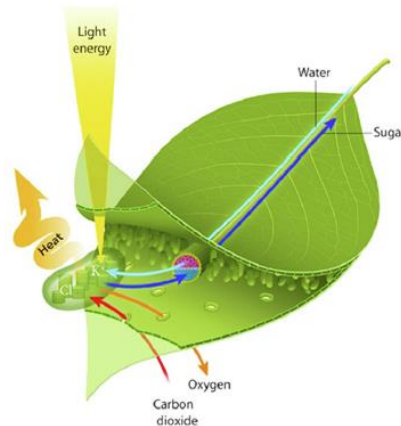


Figura 4.20. Proceso de Fotosíntesis. [12]

La radiación involucrada en la fotosíntesis comprende las longitudes de onda de la región de 400 a 700 nm y se denomina **radiación fotosintéticamente activa (PAR)**. Esta radiación es absorbida por la clorofila y carotenoides, que son pigmentos ubicados en los cloroplastos.

La clorofila es el pigmento verde soluble en lípidos disponible en dos formas principalmente, la clorofila a y b que absorben en las regiones del azul (430 y 453 nm, respectivamente) y del rojo (662 y 642 nm, respectivamente). Los carotenoides funcionan como pigmentos accesorios, capturando luz y transfiriendo energía a las clorofilas para impulsar la fotoquímica. Además, poseen la capacidad antioxidante en la prevención del daño de los radicales libres y de otras especies reactivas del oxígeno derivadas del exceso de luz. Por último, los carotenoides son los responsables de proporcionar una coloración amarilla, roja y naranja en muchas frutas, flores y verduras. (ver **figura 4.21**) [12], [24]

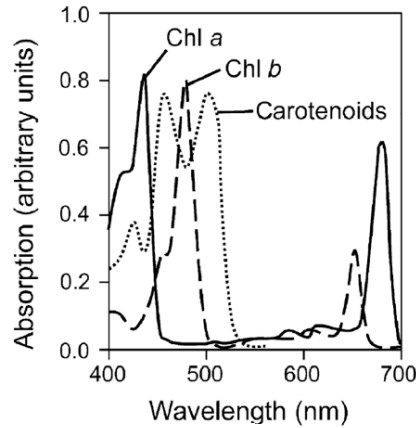


Figura 4.21. Espectro de Absorción de Clorofilas y Carotenoides. [24]

Cuando un pigmento no absorbe las longitudes de onda, estas son reflejadas, y por lo tanto el color visto es el de la luz reflejada. Si suponemos una planta de apariencia verde, esto quiere decir que la luz verde es la reflejada.

Si continuamos con el proceso, la energía lumínica absorbida por los pigmentos es transferida a los centros de reacción donde se produce una separación de cargas: las moléculas cargadas positivamente oxidan el agua a oxígeno molecular (O_2), mientras que los electrones son usados en una serie de reacciones llamadas reacciones dependientes de la luz para producir nicotiamida-adenina dinucleótido fosfato (NADPH) y trifosfato de adenosina (ATP). En la siguiente etapa, NADPH y ATP reducen el CO_2 para producir moléculas orgánicas necesarias para la función molecular y el metabolismo (azúcares) por medio de una serie de reacciones llamadas el ciclo de Calvin o “dark reactions”. Además, este tipo de reacciones son exotérmicas, es decir, liberan calor.

La tasa fotosintética medida como producción de O_2 o consumo de CO_2 , es muy afectada por las variaciones ambientales de la intensidad de la luz (cantidad de luz, concentración de CO_2 , suministro de agua, temperatura y disponibilidad de los minerales). Además, también es modificada por la especie y estado fisiológico de la planta (madurez, salud, floración, etc.). A menudo la tasa fotosintética se expresa como **densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD)** que mide el número de fotones fotosintéticamente activos (PAR), medidos en μmol , que recaen sobre una superficie determinada cada segundo ($\mu mol/m^2 \cdot s$). [12], [24]

$$PPFD = \int_{400}^{700} \frac{E_{plant}(\lambda) \cdot \lambda}{N_A \cdot h \cdot c} \cdot d\lambda \quad (4.1)$$

Donde:

- $E_{plant}(\lambda)$ es la irradiancia espectral en la longitud de onda λ .
- N_A es el número o constante de Avogadro = 6.02×10^{23} .
- h es la constante de Planck = $6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$.
- c es la velocidad de la luz = $3 \times 10^8 m/s$.

Sin embargo, en la práctica [25] ha propuesto una nueva variante, la fuente de luz usada para caracterizar las diferentes plantas tiene una distribución espectral medida normalmente por un dispositivo Licor LI-6800, $E_{\text{licor}}(\lambda)$, que varía respecto al que realmente incide sobre las plantas, luego para mejorar la precisión en los resultados se considera un factor de corrección espectral (MM), tal que:

$$MM = \frac{\int E_{\text{plant}}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{\int E_{\text{licor}}(\lambda) \cdot QY(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda} \cdot \frac{\int E_{\text{licor}}(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{\int E_{\text{plant}}(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda} \quad (4.2)$$

Donde:

- $QY(\lambda)$ es la absorción cuántica espectral del cultivo o rendimiento cuántico.

La productividad cuántica QY de las plantas se dispone en un ancho de banda entre 400-700 nm y se corresponde con una función de absorción típica de la planta como por ejemplo la propuesta por McCree, como se ve en la figura:

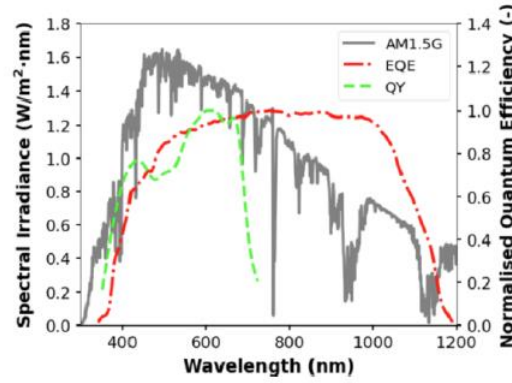


Figura 4.22. Productividad Cuántica de las Plantas. [25]

De esta forma, si aplicamos el factor de corrección espectral seremos capaces de obtener la densidad de flujo de fotones fotosintéticos de la planta ($PPFD_{\text{plant}}$) a partir del medido por el dispositivo:

$$PPFD = MM \cdot PPFD_{\text{plant}} \quad (4.3)$$

En [25], se obtiene una relación experimental entre $PPFD$ y la **tasa neta de fotosíntesis (PSN)**, ya que esta última nos proporciona los moles de dióxido de carbono producidos por la fotosíntesis por metro cuadrado, y es una medida de la productividad de la planta más interesante por ser un modelado que asegura una alta aproximación al caso real.

$$PSN = \int_{t_1}^{t_2} (a_0 + a_1 \cdot PPFD + a_2 \cdot PPFD^2 + a_3 \cdot PPFD^3 + a_4 \cdot PPFD^4) \cdot dt \quad (4.4)$$

Al integrar PSN en un intervalo de tiempo obtenemos el valor instantáneo medido en $\text{mol}(\text{CO}_2)/\text{m}^2$, que se corresponde con la medida de la productividad de la planta. Los coeficientes experimentales se pueden obtener para diversos tipos de cultivos en [25].

Las plantas además de realizar el proceso de fotosíntesis para prever a la atmósfera de oxígeno y dotar a la tierra de vida, es necesario que realice el proceso inverso, conocido como respiración para el desarrollo del propio metabolismo celular. Por tanto, hay que llegar a un compromiso entre estos dos procesos por medio de las siguientes curvas:

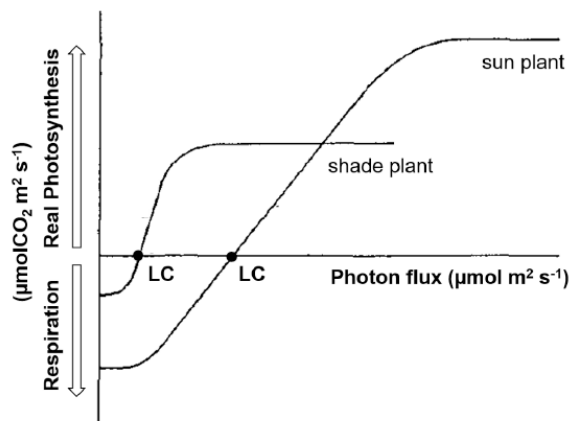


Figura 4.23. Curvas típicas de Tasa Fotosintética: Planta de Sol y de Sombra. [24]

En las curvas anteriores podemos observar dos puntos característicos, el punto de compensación de luz (LC) que es el valor de PPFD para el cual la tasa de fotosíntesis es igual a la tasa de respiración, y el punto de saturación a partir del cual un aumento de la intensidad lumínica no produce cambios en la tasa fotosintética.

Existen grandes diferencias en la respuesta del cultivo a la sombra entre diferentes especies de plantas, las cuales pueden ser clasificadas como favorecidas por el sombreado, tolerantes al sombreado y sensibles al sombreado. Las favorecidas por el sombreado son aquellas que muestran un incremento de su productividad bajo luz sombreada y disminuye bajo altas sombras. Las tolerantes al sombreado provocan una disminución del rendimiento algo menos que proporcional a la sombra. Mientras que las sensibles a la sombra muestran una disminución desproporcionada del rendimiento bajo sombreado.

En la **figura 4.23**, los investigadores han sustituido esta clasificación directamente por plantas de sol y plantas de sombra. Las plantas de sombra disponen de un LC menor, una menor tasa de respiración en oscuridad y una alta tasa de fotosíntesis a bajos flujos de luz. Además, la tasa de fotosíntesis de estas plantas tiene un máximo bastante más bajo, esto no es interesante ya que la luz intensa puede romper las moléculas de clorofila y activar los mecanismos de defensa como hojas plegadas, arrugadas y burbujeadas. Por otro lado,

las plantas de sol pueden alcanzar tasas más altas de fotosíntesis, disponen de mejores tasas de respiración a baja luz y realizan mejor la fotosíntesis bajo altas radiaciones solares. En general, se afirma que las plantas de sombra tienen hojas más finas y anchas, lo que maximiza la captura de luz, mientras que las hojas de plantas de sol son más gruesas y a menudo contienen una capa adicional de células para capturar la luz para la fotosíntesis.

Desde el punto de vista agrivoltaico, un criterio crítico a la hora de determinar el ratio de sombreado de un sistema y la idoneidad en el crecimiento de los cultivos es el **punto de saturación de luz**. Cuanto menor sea el punto de saturación, una planta puede recibir menos iluminación sin afectar a su rendimiento. Un sombreado óptimo además de optimizar la fotosíntesis requerida por la planta, también presenta la ventaja de reducir los requerimientos de agua, luego el estudio fotovoltaico va a ser fundamental. [12], [24]

Generalmente, en agrivoltaica interesan plantas de sombra ya que necesitan de menos iluminación para realizar la fotosíntesis de forma óptima. Sin embargo, las plantas de sol si se realiza una estrategia fotovoltaica adecuada como puede ser el concentrador luminiscente su implementación también será adecuada.

4.2.2-2 Fotomorfogénesis

La **fotomorfogénesis** consiste en un desarrollo de la planta mediado por la luz, a través del uso de fotorreceptores, durante etapas clave de la planta como son la germinación de semillas, crecimiento del tallo y floración. La detección de luz tiene lugar a través de una matriz de fotorreceptores, cada uno respondiendo a regiones específicas del espectro solar: los fitocromos perciben y responden a las regiones del rojo (R) y rojo lejano (FR), las fototropinas y criptocromos perciben y responden a las regiones UV-A y azules, mientras que el fotorreceptor UVR8 es sensible a luz UV-B.

Durante este proceso, los patrones de crecimiento de la planta responden al espectro de la luz, y su estudio se suele realizar mediante el uso de fuentes de luz controladas por frecuencia para hacer crecer las plantas.

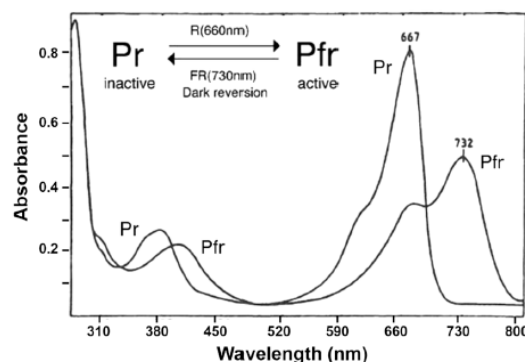


Figura 4.24. Espectro de Absorción de Fitocromos en Estado Pr y Pfr. [24]

De todos los tipos de fotorreceptores, los fitocromos han sido los más investigados en plantas. Existen dos posibles conformaciones con diferentes propiedades de absorción de luz: la forma biológicamente inactiva del fitocromo (Pr) se convierte en forma biológicamente activa (Pfr) bajo luz roja, mientras que la luz roja lejana y la oscuridad revierten Pfr a Pr.

Las reacciones mediadas por fitocromos se clasifican en función de la cantidad de luz y de si la irradiación es continua o provocada por pulsos de luz en:

- Respuestas de muy baja fluencia (VLFR): se inician en respuesta a tan solo 100 pmol/m^2 y tienen importantes consecuencias para las semillas y plántulas enterradas, permitiéndolas responder rápidamente a breves exposiciones de luz causadas por la perturbación del suelo.
- Respuestas de baja fluencia (LFR): se producen en el rango de $10 - 1000 \text{ } \mu\text{mol/m}^2$ y considera las respuestas de crecimiento y desarrollo como la germinación de semillas, la eliminación de la etiolación, el crecimiento del tallo, la expansión de las hojas y la inducción de la floración.
- Respuestas de alta fluencia (HIR): requieren luz continua con una fluencia superior a 10 mmol/m^2 y son importantes en la germinación, eliminación de la etiolación y la inducción de la floración a lo largo del día.

En cambio, las consecuencias producidas por los criptocromos al responder de forma controlada con la luz se corresponden con un alargamiento del tallo, expansión de las hojas, floración fotoperiódica (durante una época concreta por sus condiciones óptimas) y ritmos circadianos (oscilaciones de variables biológicas en intervalos de un día).

Por otro lado, las fototropinas están involucradas en el fototropismo (crecimiento direccional hacia una fuente de luz unilateral), apertura de estomas y movimiento de cloroplastos para optimizar la fotosíntesis ante cambios en la intensidad de la luz.

Como **ejemplo de aplicación del proceso de fotomorfogénesis**, destacar que la industria de la horticultura se ha encargado de manipular la luz ambiental para mejorar características como el crecimiento de las plantas, la calidad del follaje y la producción de flores y frutos, a la vez que ayuda en el control de plagas y enfermedades. En algunos casos se han añadido fuentes de luz artificiales adicionales, por ejemplo, cuando la luz natural no sea adecuada para el desarrollo óptimo de la planta. [24], [26]

4.2.3 Cultivos adecuados para Agrivoltaica

Como conclusión del apartado de fotosíntesis, en agrivoltaica podemos emplear prácticamente cualquier tipo de cultivo, ya sea favorable bajo condiciones soleadas o de sombreado, pero cada tipo con diferentes efectos en la productividad como consecuencia del sombreado. Se puede hacer una clasificación de los cultivos más utilizados en agrivoltaica de acuerdo a sus condiciones de sombra, como la realizada en [27]:

Major commercial shade-intolerant crops	Shade-tolerant-crops		
	Full shade	Moderate light	Low light
Cabbage, corn, cucumber, pumpkin, rice, tomato, turnip, and watermelon	Alfalfa, arugula, Asian greens, broccoli, cassava, chard, collard greens, hog peanuts, kale, kohlrabi, lettuce, mustard greens, parsley, scallions, sorrel, spinach, sweet potatoes, taro, and yam	Beans, carrots, cauliflower, coriander, green peppers, and onions	Mushroom

Tabla 4.9. Cultivos Potenciales en Agrivoltaica. [27]

Destacar que las plantas tolerantes a la sombra a diferencia de las intolerantes, destacan por tener una distinta orientación foliar, hojas más largas, anchas y finas, y también menos cantidad de hojas. Esta cantidad de atributos permiten que las plantas sean capaces de soportar poca luminosidad.

Además, en [28] se muestra un estudio de algunas instalaciones APV realizadas de forma comercial y experimental, y con qué tipo de cultivos se realizan:

No.	Location	Country	Electricity yield [kWh a ⁻¹]	Capacity [kWp]	Solar tracking	Cultivated crops	Source
Commercial facilities							
1	Monticelli D'Ongina	Italy	4,842,000	3230	Yes	Winter wheat, maize	Praderio and Perego (2017); Rem Tec (2017a)
2	Castelvetro	Italy	1,890,000	1294	Yes	Winter wheat, maize	Praderio and Perego (2017); Rem Tec (2017a)
3	Virgilio	Italy	3,325,000	2150	Yes	Winter wheat, maize	Praderio and Perego (2017); Rem Tec (2017a)
4	Abruzzo	Italy	Unknown	800	Yes	Pasture, tomato, watermelon, wheat	Corditec (2017)
5	Anhui province	China	887,000	544	Yes	Unknown	Rem Tec (2017a) (Rem Tec 2017b)
6	Zhejiang province	China	40,000,000	30,000	Yes	Rice	Tonking New Energy (2018)
Research facilities							
7	Arizona	USA	Unknown	Unknown	No	Cabbage, chard, kale, tomato, onion	Tricoles (2017)
8	Montpellier	France	Unknown	Unknown	Partly	Cucumber, durum wheat, French bean, lettuce	Marrou et al. (2013b); Valle et al. (2017)
9	Heggelbach	Germany	244,401	194	No	Winter wheat, clover grass, celeriac, potato	Authors' project
10	Santiago de Chile	Chile	21,437	Unknown	No	Various cabbage varieties (broccoli, cauliflower, kale), potato, pumpkin	Fraunhofer Chile Research (2017b); Fraunhofer Chile Research (2017c)
11	Chiba Prefecture	Japan	35,000	Unknown	No	Cabbage, cucumber, eggplant, peanut, tomato, taro, yam	Movellan (2013)

Tabla 4.10. Sistemas Agrivoltaicos Disponibles con Diferentes Cultivos. [28]

También, en [28] se realiza una revisión en distintos lugares de estudio sobre los efectos de un sombreado experimental (con lonas y mallas) con una gran variedad de cultivos, los cuales están sometidos a distintas condiciones de sombreado en distintas épocas del año, y pueden lograr efectos positivos o negativos en la productividad y calidad de los productos obtenidos.

Crop	Shade effect	Effect on yield	Further effects	Reference	RSR ^b [%]	Type/time of shade application	Study site
Field crops							
Sunflower	~/+	•Decreased seed set and number in all shading treatments	•Altered fatty acid composition	Cantagallo et al. (2004)	80	At various periods ^a	Buenos Aires, Argentina
				Izquierdo et al. (2009)	50/80	During grain filling ^a	Santamari-ne, Argentina
Oleiferous plants	~/+	•No details given	•Altered fatty acid composition	Izquierdo et al. (2009)	50/80	During grain filling ^a	Santamari-ne, Argentina
Potato	~/+	•Decreased tuber yield and number •Increased yield at some locations and shading times	•Increased plant height and leaf area	Kuruppuarachchi (1990)	50	Non-uniform shading; at various periods	Kalpitiya, Sri Lanka
				Sale (1973)	21/34	During entire growth period ^a	Australia
				Midmore et al. (1988)	50/67	At various times of the day ^a	Peru
Wheat	~/+	•Decreased grain yield and grain size •Increased yield for some cultivars under moderate shading conditions	•Increased protein content	Artru et al. (2017)	55	Non-uniform shading; Starting at flowering	Gembloux, Belgium
				Dufour et al. (2013)	25–60	Various; increasing intensity ^a	Montpellier, France
				Fischer (1985)	50–67	At various periods ^a	Various
				Jedel and Hunt (1990)	50±5 (of PAR)	Various ^a	Toronto, Canada
				Li et al. (2012)	8/15/23	From jointing to maturity ^a	Nanjing, China
				Mu et al. (2010)	22/33 (of PAR)	From jointing to maturity ^a	Nanjing, China
Maize	~/+	•Decreased grain yield due to reduced grain weight •Increased stover yield	•Increased fat and protein content •Decreased starch content	Reed et al. (1988)	50	At various growth stages ^a	Missouri, USA
				Jia et al. (2011)	55	For 2 weeks at different times ^a	Shandong, China
				Mbewe and Hunter (1986)	65	At various growth stages ^a	Ontario, USA
Rice	–	•Reduced grain yield through shading during reproductive and ripening stages	•Shading during vegetative stage had no effect	Islam and Morison (1992)	22/52/77	At various growth stages ^a	Joydebpur, Bangladesh
Cotton	–	•Decreased lint yield	•Decreased fibre strength •Increased fibre length	Chen et al. (2017)	21/38	Starting at flowering ^a	Nanjing, China
Horticultural crops							
Tomato	+	•Increased fruit yield under moderate shading conditions	•Increased plant height with increasing shade •Reduced number of fruits with sunscald •Decreased content of ascorbic acid, carotenoids and phenolics	Baharuddin et al. (2014)	25/50/75	Unknown	Bogor, Indonesia
				El-Gizawy et al. (1993)	35/51/63	Starting 1 month after transplanting ^a	Egypt
				Nangare et al. (2015)	35/50/75	Starting after transplanting ^a	Abohar, Punjab, India
Sweet pepper	+	•Highest yield under moderate shading conditions	•Increased plant height and quantity of flower nodes •Reduced number of fruits with sunscald	Rylski and Spigelman (1986)	12/26/47	During entire growth period ^a	Negev desert, Israel
Tree fruit and berry crops							
Kiwi	+	•Highest fruit yield under moderate shading conditions	•Decreased fruit drop and leaf fall in all cultivars •Increased storage quality •Reduced heat stress assumed	Wang et al. (2007)	70	During summertime ^a	Changsha, China
				Allan and Carlson (2003)	15/30/40/55	Unknown timing ^a	Pietmaritz-burg, South Africa
Mango	+	•No details given	•Decreased severity of postharvest diseases and thus increased fruit quality •Decreased anthracnose infestation through rain reduction during rainy season	Jutamanee et al. (2013)	26	Starting at beginning of flowering ^a	Nakhon Phanom, Thailand
Coffee	+	•Highest yields under moderate shade conditions	•Decreased yields under severe shading (> 50% reduction of incoming radiation)	Soto-Pinto et al. (2000)	30–70	During whole investigation period ^a	Chilón, Chiapas, Mexico
Black-berries	+	•Increased yield	•Extended harvest period	Rotundo et al. (1998)	40	From June–October ^a	Basilicata region, Italy
				Makus (2010)	40	Starting after third harvest ^a	Monte Alto, Texas, USA
Blue-berries	+/-	•Both increased and decreased yields depending on geographic location and shading period	•Extended harvest period	Lobos et al. (2013)	25/50/75	Starting 1 month after fruit set ^a	Gobles, Michigan, USA
				Retamales et al. (2008)	35/50	Starting at fruit set ^a	Miraflores, Chile

Tabla 4.11. Efectos del Sombreado Sobre Distintos Cultivos. [28]

De la **tabla 4.11**, destacar la presencia del término RSR “Reduction in solar radiation” que tiene que ver con la capacidad de reducir la radiación solar incidente, se considera hasta un 50% de RSR un sombreado moderado y de más del 50% un sombreado severo.

Hay cultivos como la papa, el maíz y el trigo que dependiendo de las condiciones de sombreado tienen un aspecto positivo o negativo en la productividad agrícola, al ser cultivos poco tolerantes al sombreado van a necesitar de sombreados más ligeros para así conseguir beneficios por sombreado en la productividad. Del mismo modo, su actuación dependerá del lugar de empleo, en estos casos los climas áridos y semiáridos, que disponen de más irradiancia solar, se consideran los más adecuados.

Por otro lado, hay cultivos que han obtenido resultados favorables al sombreado como son el caso del tomate y pimiento que obtienen beneficios productivos para el caso de sombreados severos mejorando la calidad de la planta y de los frutos. Estos tipos de cultivos funcionan adecuadamente en climas desérticos, como el de Egipto, tropicales, como en Indonesia, y también en climas áridos, como en zonas de la India.

Finalizamos con cultivos que son afectados negativamente por el sombreado, como el caso del arroz y el algodón. Según [28] una reducción de la radiación solar en un 20% conlleva a pérdidas en la productividad de arroz en casi un 20% y esta reducción continua de forma proporcional, esto se debe sobre todo a que el arroz necesita en sus primeras etapas de crecimiento de gran cantidad de radiación solar. Lo mismo ocurre con el algodón que es un cultivo que necesita gran cantidad de sol durante las etapas de floración y germinación, [29] recomienda a los agricultores controlar óptimamente el sombreado durante esas etapas para conseguir mejoras en la productividad, sin embargo, realizarlo con un sistema fotovoltaico va a resultar infactible.

Como conclusión, la productividad de un determinado tipo de cultivo es muy difícil controlar, ya que depende del porcentaje de sombra, la localización del sistema, la época del año y las condiciones de irradiancia, entre otros aspectos. Lo ideal en sistemas agrivoltaicos es su desarrollo en un clima árido o semiárido, con grandes cantidades de radiación solar, y con un tipo de cultivo y condiciones de sombra particulares de acuerdo al propio sistema. [17], [27], [28]

De acuerdo a su **pureza** los semiconductores se clasifican en:

- Semiconductores intrínsecos: Son cristales puros (todos los átomos son del mismo cristal), este tipo de material posee el mismo número de electrones que de huecos y a temperatura ambiente se comporta casi como un aislante.
- Semiconductores extrínsecos: Son cristales dopados (existen átomos en el cristal que son de distintos átomos), poseen distinto número de electrones que de huecos y a temperatura ambiente se comporta casi como un conductor al perder resistividad.
 - Tipo N: consiste en añadir átomos pentavalentes (por ejemplo: Sb) de forma que cada átomo pentavalente crea un electrón libre haciendo que el número de electrones libres en el semiconductor sea muy superior al número de huecos.
 - Tipo P: procede de añadir átomos trivalentes (por ejemplo: I, Ga, B) para que cada átomo trivalente sea capaz de crear un hueco, y el número de huecos en el semiconductor sea muy superior al de electrones. [34], [35]

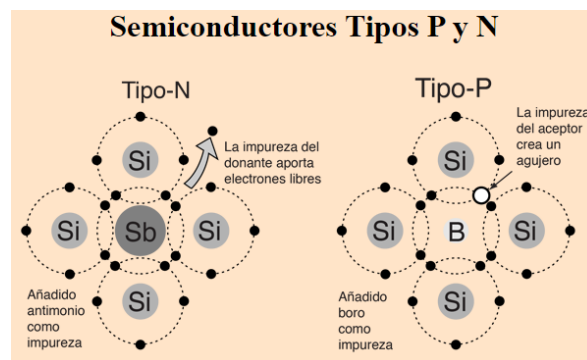


Figura 5.1. Estructura Semiconductores Tipo N y Tipo P [35]

Existe otro tipo de clasificación para los semiconductores de acuerdo a sus **diagramas energía-momento**:

- Semiconductores directos: son aquellos en los que el máximo de la banda de valencia coincide con el mínimo de la banda de conducción en el momento $k=0$, y por lo tanto bastaría con una energía igual a la del gap del material para liberar electrones. Es por ello que son más eficientes. Dentro de esta categoría se encuentra el **GaAs, GaN, InP, InGaAs, etc.**
- Semiconductores indirectos: en este tipo de semiconductores el máximo de la banda de valencia sigue permaneciendo en $k=0$, pero el mínimo de la banda de conducción ocurre para otros momentos. Esto quiere decir que además de tener un fotón con energía igual al gap requerimos de energía extra proveniente de otra partícula denominada fonón, que no es más que un tipo de cuasipartícula en forma de vibración que se encuentra en el material y que es producida por la energía térmica sobrante en el proceso de absorción de un fotón con una energía superior a la del gap del material. El **Si, Ge, AlAs** son tipos de semiconductores indirectos. [36]

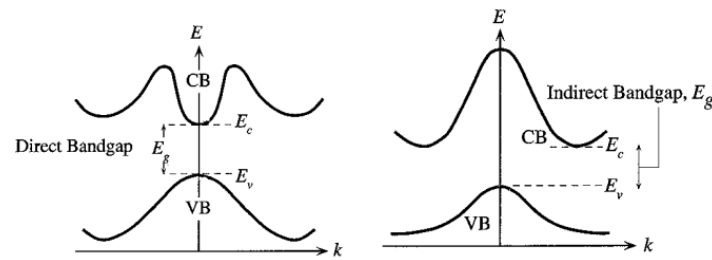


Figura 5.2. Bandas de Energía: Semiconductor Directo e Indirecto [36]

El siguiente paso es hablar del proceso de **absorción de luz** en el semiconductor. Este concepto nos servirá más adelante entender las posibilidades de transparencia en los módulos de acuerdo con la profundidad del material requerida para la absorción de fotones.

Cuando la luz solar incide sobre la superficie de un semiconductor pueden ocurrir varios procesos, la reflexión, la absorción en el material o la transmisión a través del material.

Por tanto, los fotones incidentes sobre un semiconductor se pueden encontrar en las siguientes situaciones:

- $E_{ph} < E_G$: interactúan débilmente con el semiconductor traspasando el material como si fuera transparente.
- $E_{ph} = E_G$: se produce una absorción eficiente (sin pérdidas térmicas) creándose un par electrón-hueco.
- $E_{ph} > E_G$: los fotones son fuertemente absorbidos, pero la energía por encima del gap es cedida de forma térmica por medio de un fonón. [37]

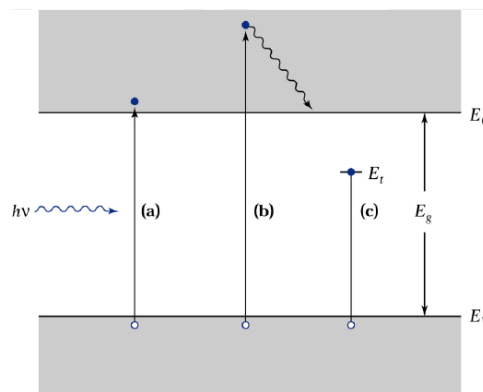


Figura 5.3. Fotones Incidentes sobre Semiconductor [37]

Una forma de expresar la absorción en un semiconductor es por medio del **coeficiente de absorción** que determina la penetración de una determinada longitud de onda de la luz antes de ser absorbida. La aplicación de estos coeficientes es ayudar a nivel científico para escoger un determinado material para la fabricación de células solares.

En el caso de los semiconductores hay una caída brusca del coeficiente de absorción de acuerdo con el ancho de banda prohibida, como se puede ver en la siguiente figura:

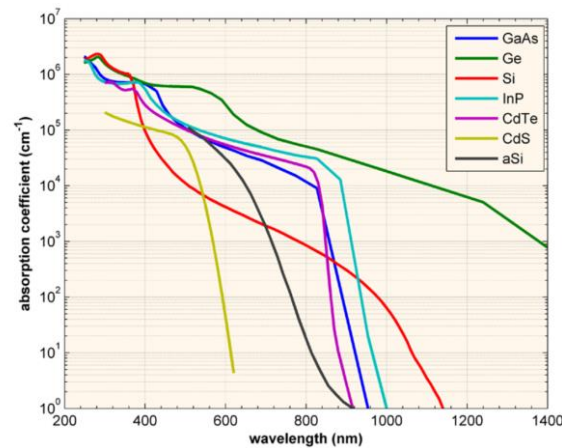


Figura 5.4. Coeficiente de Absorción sobre distintos Semiconductores [34]

Además, en la **figura 5.4** podemos observar que el coeficiente de absorción no es constante, de hecho, justo en el gap el coeficiente es bajo porque solamente pueden absorberse los electrones superficiales de la banda de valencia, conforme vamos aumentando la energía del fotón hay mayor número de electrones capaces de reaccionar a ese fotón y se facilita la absorción.

La inversa del coeficiente de absorción se corresponde con la **profundidad de absorción** que es la que cuantifica la penetración de la luz antes de ser absorbida en casi su totalidad (el 64% de su luz original).

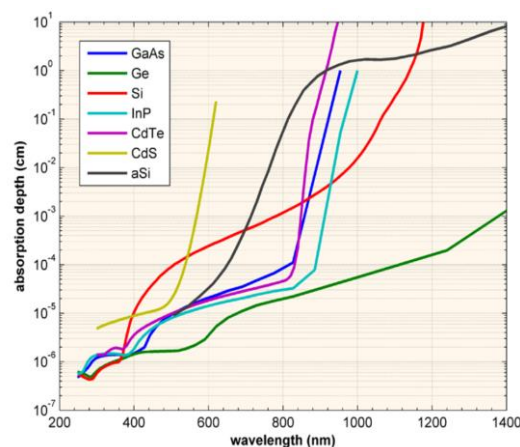


Figura 5.5. Profundidad de Absorción sobre distintos Semiconductores [34]

La anterior figura indica que para una absorción del 64% de la luz original se necesita de ciertas profundidades para distintas longitudes de onda y materiales. Por ejemplo, el GaAs

requiere de menos espesor para absorber la región visible del espectro que el Si. Además, la definición de profundidad de absorción nos indica que longitudes de onda más cortas son absorbidas con una profundidad menor que las más largas.

Para finalizar con las características ópticas de los semiconductores vamos a razonar bajo distintos espesores de semiconductores de GaAs y Si, los efectos de absorción, reflexión transmisión.

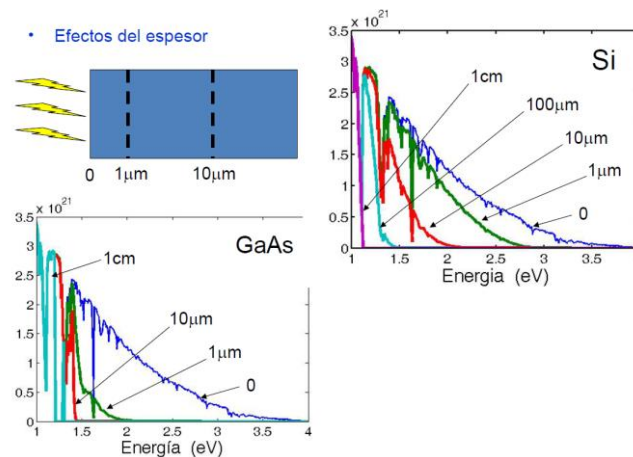


Figura 5.6. Efectos del Espesor sobre Semiconductor Directo e Indirecto [38]

Si en el eje vertical disponemos del espectro de la luz solar (fotones/ $\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{eV}$) y en el eje horizontal de la energía (eV), siendo la curva azul la correspondiente al espectro de la luz solar en la superficie del semiconductor, vemos que el resto de curvas se corresponde con la energía transmitida a cierto espesor mientras que la diferencia entre la curva azul respecto al resto es la cantidad absorbida y reflejada. A partir de esta información observamos que un semiconductor directo como es el GaAs necesita de un espesor de aproximadamente 1 μm para absorber casi toda la energía incidente, mientras que un semiconductor indirecto como el Si necesita de unas 10 veces más de espesor para conseguir un efecto parecido (1 μm). [38]

Respecto a la reflexión, su dependencia tiene que ver con el material que recubre su superficie: si la superficie es silicio pulido dispone de un coeficiente de reflexión entre el 33% y el 54% en el rango espectral 350 – 1100 nm, si utilizamos una capa antirreflexiva disminuyen las pérdidas por reflexión al 10%, con dos capas mejoramos al 3%, si utilizamos texturizado con una capa antirreflexiva logramos de nuevo un 3%, y por último si empleamos dos capas con texturizado podemos llegar a un 0,7% de pérdidas por reflexión. [39]

Con toda la información vista hasta ahora somos capaces de entender el comportamiento de la **Unión PN**.

Una Unión PN, principio de funcionamiento de los diodos, consiste en el dopado de un mismo semiconductor mitad tipo N y mitad tipo P. Al ponerse en contacto un

semiconductor con alta concentración de electrones con otro con alta concentración en huecos ambos tratan de alcanzar el equilibrio mediante la difusión de partículas excedentes. Si los electrones y los huecos no tuvieran carga el proceso de difusión continuaría hasta igualar ambas concentraciones.

Sin embargo, cada electrón que abandona la zona N crea un par de iones, un ion positivo a consecuencia del átomo pentavalente que ha perdido el electrón y un ion negativo en la zona P a causa del átomo trivalente que ha perdido el hueco. Este par de iones se encuentran fijos en la estructura del cristal, es decir no se mueven como partículas libres, y cada par de iones forma un dipolo.

Estos dipolos conforman una zona de depleción (zona vacía de portadores) y van creando un campo eléctrico que se opone a la difusión de portadores mediante una barrera de potencial.

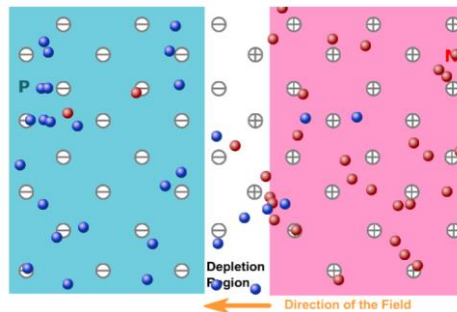


Figura 5.7. Funcionamiento Unión PN [34]

La mayoría de célula solares basan su funcionamiento en una **Unión PN** para la generación de energía eléctrica a partir de la radiación incidente del sol. En fotovoltaica, a este comportamiento se le conoce con el nombre de **efecto fotovoltaico**. El dispositivo electrónico capaz de realizar esta transformación mediante el efecto fotovoltaico se conoce con el nombre de **célula solar o célula fotovoltaica**, que es capaz de absorber los fotones incidentes y emitir electrones libres que al llegar a los contactos dan como resultado una corriente eléctrica. Una célula solar es un dispositivo de baja potencia (en células comerciales típicas proporcionan unos 6,12 W) y con área de transformación baja, es por ello que se pretenden conectar eléctricamente entre sí células para formar un **módulo fotovoltaico**, mediante una conexión serie y/o paralelo se tratan de ajustar los parámetros eléctricos para proporcionar una potencia superior y para lograr una protección mecánica (encapsulado, estructura soporte, marco). De forma comercial es típico encontrarse con un módulo formado por 72 células, de forma que la potencia del módulo alcance los 440 W. Esta conexión y cantidad de células en un módulo varía de acuerdo con el fabricante, actualmente se están probando experimentalmente módulos de hasta 700 W de potencia. Del mismo modo, para lograr grandes cantidades de potencia de kW o MW se asocian conjuntos de módulos fotovoltaicos en serie y/o paralelo en lo que se conoce como **generador fotovoltaico**. [40]



Figura 5.8. Célula-Módulo-Generador FV [41]

Generalmente, el funcionamiento de una célula solar (o sus variantes) se observa con el comportamiento de la curva IV, sobre la cual se pueden extraer diversos parámetros eléctricos fundamentales:

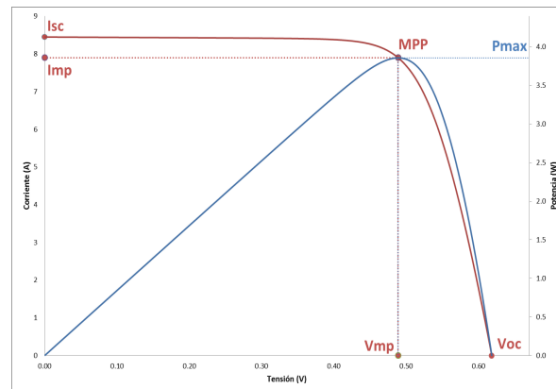


Figura 5.9. Curva IV de una Célula Fotovoltaica. [42]

- Corriente de cortocircuito, I_{sc} : es la corriente máxima que se puede obtener en la curva IV y se corresponde con la que circula por la célula cuando se cortocircuitan sus terminales de salida, es decir cuando la tensión es igual a cero voltios. Su valor depende sobre todo de la irradiancia incidente.
- Tensión de circuito abierto, V_{oc} : es la máxima tensión que se puede observar en la curva IV de la célula solar y tiene que ver con la tensión a la cual la corriente es igual a cero amperios. Este valor de tensión depende en gran medida de la recombinación de la célula y de la temperatura de operación.
- Potencia máxima, P_{mp} : es el punto de operación en el cual obtenemos la máxima potencia capaz de proporcionar una célula fotovoltaica. A su vez, esta potencia se define como el producto entre la tensión en el punto de máxima potencia (V_{mp}) y la corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}).
- Factor de forma, FF : es un parámetro que cuantifica la idealidad de la curva IV, ya que en cierto modo mide la calidad de la célula. Imaginariamente se observa como un

cuadrado, conforme más parecido en tamaño sea al caso real al ideal, más calidad tendrá nuestra célula fotovoltaica. [42]

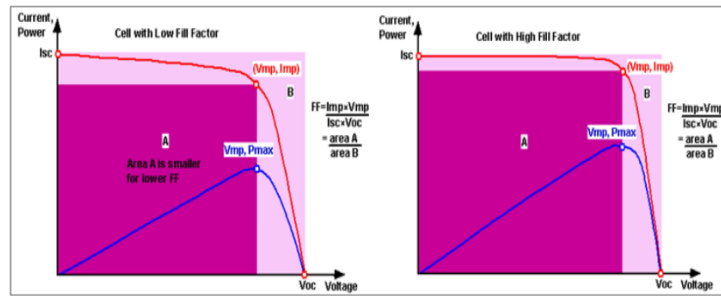


Figura 5.10. Factor de Forma (FF) de Dos Células Solares Distintas. [42]

Particularmente, en una célula solar es necesario, a parte del FF, de otro tipo de parámetros para determinar la calidad de la célula fotovoltaica, como son:

- Eficiencia, η : se define como la relación entre la potencia eléctrica generada a la salida de la célula solar y la radiación incidente sobre la superficie de la misma.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{G_{STC} \cdot A_{célula}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{G_{STC} \cdot A_{célula}} \quad (5.1)$$

Además, a nivel de laboratorio se definen dos parámetros adicionales que nos dan información acerca de la calidad de absorción de la célula solar:

- Eficiencia cuántica, **QE**: se corresponde con el número de electrones producidos por número de fotones para cada longitud de onda.

$$QE(\lambda) = \frac{N^{\circ} \text{ pares } e - h \text{ colectados}}{N^{\circ} \text{ fotones}} \quad (5.2)$$

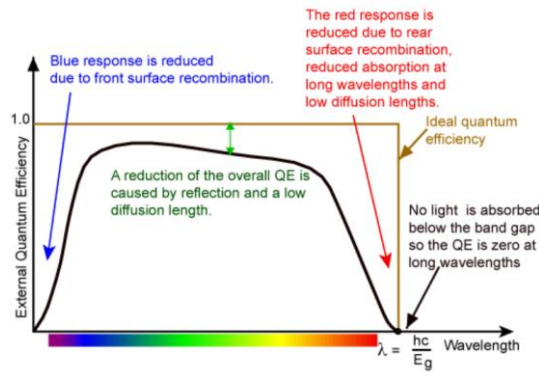


Figura 5.11. Eficiencia Cuántica Ideal vs Real. [34]

- Respuesta espectral, **SR**: es un concepto similar a la eficiencia cuántica, pero en lugar de hablar de electrones obtenidos por fotones incidentes, relaciona la corriente eléctrica generada (A) por unidad de potencia incidente sobre la célula solar (W).

$$SR(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} QE(\lambda) \quad (5.3)$$

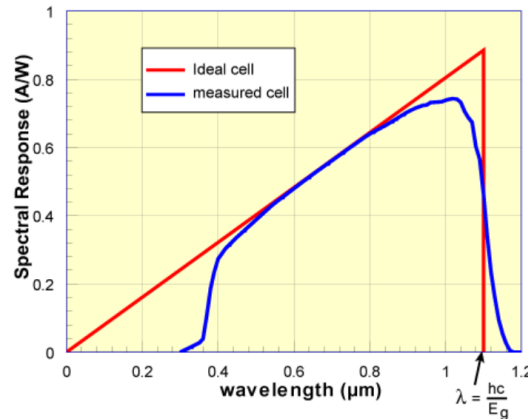


Figura 5.12. Respuesta Espectral de una Célula de Silicio con Cristal. [34]

En la **figura 5.12**, podemos comprobar que al tener un semiconductor indirecto la respuesta para energías por debajo de la banda prohibida no sufre un cambio brusco. [34]

5.2 Características Mecánicas y Visuales de los Materiales FV

Unas **propiedades mecánicas** adecuadas para las células solares son muy importantes para alargar su vida útil y para seguir proporcionando elevadas eficiencias durante el paso de los años. De acuerdo con las investigaciones llevadas a cabo en [43], el daño mecánico causado en células solares generalmente se debe a un excesiva flexión y daño por tracción. Por lo cual se llevan a cabo test de flexión y de tracción para observar los fallos mecánicos producidos.

Los **ensayos de flexión** consisten en introducir un material sobre una máquina que causa un doblado en el punto medio del material sin que se produzca la fractura de este. A partir de estos test son capaces de determinar propiedades de los materiales tales como la ductilidad, la resistencia a la flexión y la resistencia a la fractura. Este ensayo se realiza sobre materiales dúctiles sometidos a fuerzas de flexión para observar su comportamiento, si durante las diferentes pruebas el material soporta diferentes grados de flexión se asume que el material sometido a esas condiciones puede soportar el mismo grado en cualquier aplicación. [44]

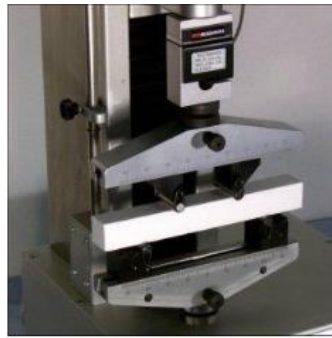


Figura 5.13. Ensayo de Flexión. [44]

Conjuntamente, el material también es sometido a **ensayos de tracción** el cual permite conocer la respuesta de un material dúctil ante una fuerza de tracción aplicada de forma constante que provoca el estiramiento del material.



Figura 5.14. Ensayo de Tracción. [45]

Con este método se valora la actuación elástica, plástica y de fractura sufrida por el material, ante una fuerza de tracción, por medio de la curva tensión-deformación:

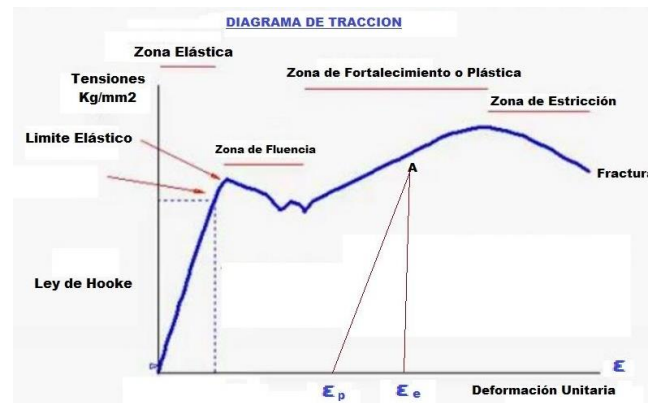


Figura 5.15. Curva Tensión-Deformación, Ensayo de Tracción. [45]

Para conseguir una buena actuación mecánica las células fotovoltaicas se encapsulan en conjunto con otras células formando un módulo fotovoltaico el cual dispone de la siguiente estructura:



Figura 5.16. Estructura Típica de un Módulo Fotovoltaico. [46]

- **Marco:** permite la instalación del módulo fotovoltaico sobre un soporte y proporciona robustez, normalmente es de aluminio (aunque también puede ser de acero inoxidable) tratado para ser resistente a las condiciones adversas y favorecer la disipación de calor. Por otro lado, la estructura del marco debe asegurar estanqueidad y evitar la acumulación de polvo, agua u otros materiales en su carcasa.
- **Cara frontal (Vidrio):** Desde el punto de vista mecánico la cubierta debe poseer suficiente dureza (Por ejemplo: alta resistencia al impacto y al rallado) y flexibilidad para integrarse a la superficie que queramos. Además, se requiere una superficie con alta transmitancia en las longitudes de onda de la tecnología empleada (no convienen todas las del espectro porque las que no absorben las células se transforman en calor en el dispositivo) y de baja reflectividad, la baja reflectividad se puede conseguir con un revestimiento anti-reflectante sobre la superficie o con un texturizado de la superficie como mencionamos anteriormente. Por último, debe proporcionar de forma conjunta con el marco impermeabilidad al agua, tener baja resistividad térmica y ser estable bajo una exposición prolongada a los rayos UV (que no se ponga amarillo el cristal). Para conseguir estas características se emplea vidrio templado por su reducido

contenido en hierro, su resistencia y estabilidad, su elevada transparencia e impermeabilidad al agua.

- Encapsulante: es de gran importancia porque proporciona una adhesión entre las células fotovoltaicas, la cara frontal y trasera del módulo. Debe ser transparente, tener una baja resistencia térmica y ser estable frente a altas temperaturas y prolongada exposición a rayos UV. Hay que prestar atención a la transparencia durante largas exposiciones al sol, y se debe buscar un índice de refracción similar con el vidrio superior para evitar alteraciones en la radiación. Puede ser de silicona o de EVA.
- Cara posterior (Tedlar): de nuevo debe disponer de una baja resistencia térmica y evitar la entrada de agua. El material utilizado en su inmensa mayoría es el Tedlar normalmente de color blanco para reflejar la radiación incidente por la cara posterior y no producir calor adicional al sistema. En sistemas bifaciales se sustituye esta capa de Tedlar por un vidrio con las mismas características que el vidrio frontal para precisamente aprovechar la radiación trasera. Uno de los principales problemas de degradación que se observan en un módulo fotovoltaico es el Tedlar, generalmente a causa de un punto caliente.
- Caja de conexiones: el cableado y las bornas de conexión están protegidas de la intemperie por medio de las cajas de conexiones. Deben disponer de una protección frente al polvo y al agua para evitar cortocircuitos y de una protección frente a contactos directos e indirectos para las personas. Además, en esta caja de conexiones se encuentran los diodos bypass del módulo fotovoltaico que permiten la desconexión de ciertas ramificaciones de células que están funcionando bajo unas condiciones de radiación distintas al resto y pueden provocar la destrucción de todo el módulo. [34], [46]

Dentro de las **características visuales** destaca la **transparencia de los módulos fotovoltaicos**, en el artículo [47] se menciona el proceso de realizar TPV a través de distintas estrategias. Destacar que en este informe se habla de fotovoltaica transparente, aunque en realidad este concepto se refiere a la fotovoltaica semitransparente que es uno de los aspectos clave de este informe.

El proceso de transparencia en fotovoltaica se refiere a la transmisión del espectro incidente en la región visible de tal forma que sea reconocida por los humanos cuando atraviese el panel fotovoltaico.

De acuerdo con el artículo de referencia [47], se deben conseguir cuatro aspectos fundamentales para la implantación comercial de TPV:

- Alta eficiencia de conversión de potencia para una transparencia aceptable: el aumento de transmitancia de la luz en los módulos fotovoltaicos disminuye la PCE. Además, al cambiar la posición del sol, el contenido espectral es distinto y cambia la PCE de un módulo transparente con el tiempo. Para conseguir una buena actuación se va a requerir de una estrategia y tecnología fotovoltaica que proporcione una gran eficiencia para altos niveles AVT, y de una estrategia de seguimiento solar para permanecer perpendicular al sol en todo momento.

- Adaptación estética a la construcción: la mayor implantación de esta tecnología es sobre los cristales de la construcción, de ahí que sea muy importante considerar la transmitancia y el color de los módulos fotovoltaicos (veremos que puede llegar a afectar a la eficiencia de conversión) para no afectar a la estética del edificio.
- Estabilidad a largo plazo: los módulos opacos que se comercializan en la actualidad disponen de una vida útil de aproximadamente 25 años, los módulos TPV que normalmente se corresponden con tecnologías orgánicas y thin-film son materiales inestables al afectar más la degradación y requieren de un mejor estudio sobre este aspecto.
- Costes de fabricación competitivos: es muy complicado estimar los costes de fabricación de TPVs al ser una tecnología que no ha llegado a explotar comercialmente en muchos casos. Una forma de estimarlos podría ser por medio de una comparación respecto a los procesos de fabricación de los módulos opacos, aunque los últimos parten con ventaja por disponer de un dominio de mercado.

Una vez comentados los aspectos que requiere un módulo transparente para su desarrollo en el ámbito comercial, hay que mencionar las diferentes técnicas o estrategias llevadas a cabo para el desarrollo de TPVs:

La tecnología fotovoltaica de absorción de la luz visible es una técnica que consiste en transmitir de forma parcial luz visible y absorber el resto de energía para generar electricidad. Dentro de esta distinción hay dos estrategias para su realización:

- El primer método consiste en realizar TPV con un material thin-film que transmite parcialmente la luz visible reduciendo el espesor de la capa de absorción de luz, aunque también transmite parte del infrarrojo al poseer estos materiales un coeficiente de absorción bajo para esas longitudes de onda como se puede ver en la **figura 5.17**.

La capa de absorción de luz dispone de un espesor que modifica la intensidad de la luz transmitida, de acuerdo con la ley de Beer-Lambert:

$$I_T = I_0 \times e^{-\beta I} \quad (5.4)$$

Donde:

- I_T es la intensidad de luz transmitida.
- I_0 corresponde con la intensidad de luz incidente.
- B es el coeficiente de absorción del material.
- I es el espesor de la capa de absorción de luz.

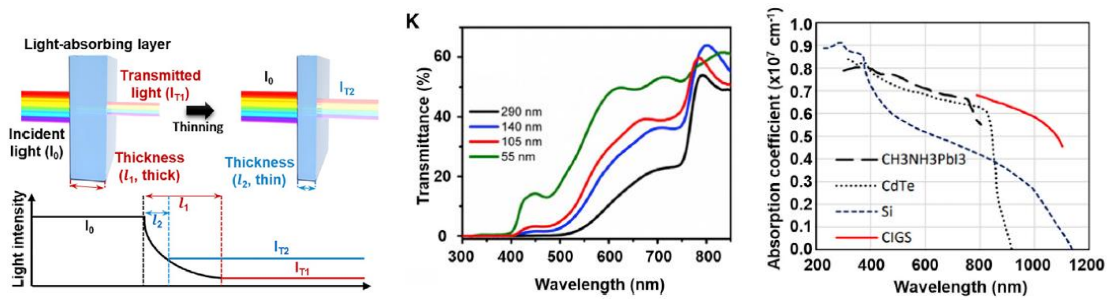


Figura 5.17. Transmisión de la Luz Incidente/Transmitancia de la Luz para Diferentes Espesores/ Coeficiente de Absorción para Materiales Thin-Film. [47]

Según la ley de Beer-Lambert, la transmitancia de la luz aumenta a medida que disminuye el espesor de la capa de absorción. Debido a esto, para conseguir transparencia un gran método consiste en aplicar materiales thin-film en sus distintas variantes: orgánicos (Polímeros, DSSC), inorgánicos (CIGS, a-Si, CdTe, QDSC) y perovskita.

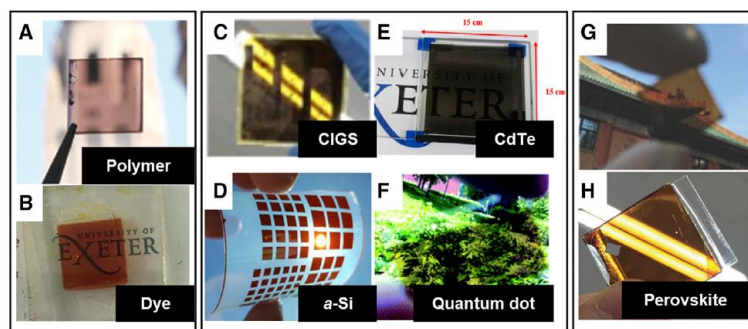


Figura 5.18. Tipos de Materiales Thin-Film con Posibilidad de TPV. [47]

En el artículo [47] se muestra una tabla de diferentes estudios que recoge datos de PCE de materiales thin-film para una determinada AVT:

Type	Material	AVT (%)	PCE (%)	Reference
Inorganic	a-Si	23.5	6.36	31
	a-Si	23.6	6.92	32
	a-Si	12.0	5.20	33
	a-Si	18.4	5.57	34
	CIGS	9.04	9.78	25
	CIGS	26.0	5.27	35
	CdTe	30.0	0.41	36
	quantum dot	26.0	7.40	37
	quantum dot	31.4	4.90	28
Organic	polymer	21.6	6.83	38
	polymer	14.0	5.20	39
	polymer	38.6	4.27	40
	polymer	54.0	6.06	41
	polymer	45.0	3.40	42
	polymer	35.0	7.00	43
	polymer	22.8	4.81	44
	polymer	24.6	9.40	45
	polymer	44.0	7.00	46
	polymer	23.5	8.50	47
	polymer	38.3	9.80	https://ubiquitous.energy/world-record/
	dye	25.0	5.15	24
	dye	24.0	3.50	48
	dye	10.0	5.18	49
Perovskite	perovskite	12.6	9.70	50
	perovskite	33.4	9.60	51
	perovskite	16.0	11.8	52
	perovskite	17.3	12.5	29
	perovskite	16.0	10.1	2
	perovskite	21.5	12.6	5
	perovskite	11.0	11.9	53
	perovskite	20.0	11.9	54
	perovskite	12.5	11.0	55
	perovskite	23.0	11.3	56

Tabla 5.1. PCE y AVT de Estudios sobre Materiales Thin-Film [47]

Una forma más gráfica de mostrar la influencia de los distintos tipos de materiales thin-film en términos de PCE es a partir de la siguiente figura:

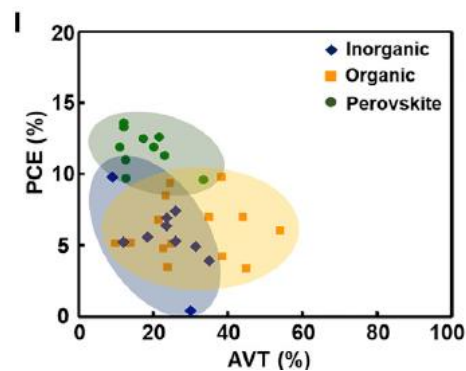


Figura 5.19. Eficiencia vs Transparencia en Materiales Thin-Film. [47]

Como conclusión de esta figura, los materiales thin-film orgánicos han obtenido PCEs de hasta 9.8% (38.3% de AVT), los inorgánicos consiguen hasta 9.78% (9.04% AVT) y los basados en perovskita hasta el 12.6% (21.5% AVT). Por otro lado, la necesidad de electrodos transparentes, parte frontal y trasera, en los materiales thin-film afecta negativamente al PCE al requerir una alta transmitancia y baja resistencia de los mismos.

- El segundo método tiene que ver con la tecnología de transmisión selectiva de la luz que tiene que ver con una transmisión de la luz a través de regiones selectivas del dispositivo.

Este método es ampliamente utilizado en BIPV por su simplicidad, básicamente consiste en aumentar la distancia entre células haciendo que se reduzca el área activa de células y por tanto disminuyendo la potencia del módulo a consta de transmitir la luz directamente a través de los huecos del espaciado. Como es evidente, al tomar de referencia un metro cuadrado si la potencia incidente sobre esa superficie es la misma, pero producimos menos el dispositivo es menos eficiente.

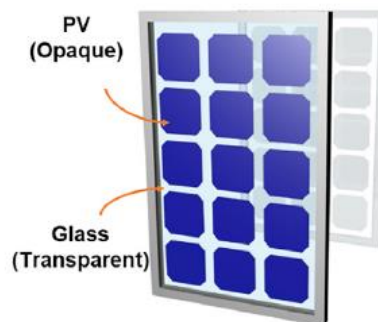


Figura 5.20. Tecnología de Transmisión Selectiva de la Luz. [47]

Como se puede observar en la **figura 2.60**, la zona activa de células es opaca a la luz y el espaciado es transparente a toda la radiación incidente, luego a medida que aumenta el espaciado entre células mayor será la transparencia global del módulo fotovoltaico. El Grupo SEO ha diseñado un módulo TPV de c-Si con color neutral capaz de conseguir PCE de hasta el 12.2% con un AVT del 20%. Se estima que la mejora en costes e incertidumbre de una tecnología tan desarrollada como el c-Si es fundamental para una rápida expansión de los módulos transparentes en fotovoltaica. [47]

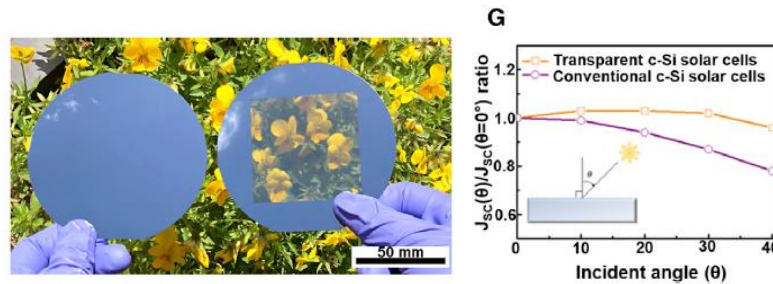


Figura 5.21. TPV de Color Neutro/Relación de Corriente bajo Ángulos de Incidencia Con y Sin Transparencia. [47]

La tecnología fotovoltaica de concentrador solar luminiscente (LSC) trata de buscar un alto nivel de transparencia en la región visible del espectro, varios estudios acerca de esta tecnología han sido llevados a cabo para generar electricidad absorbiendo únicamente el ultravioleta (<380 nm) y el IR (>780 nm). Esta tecnología basa su funcionamiento en un material luminiscente que es capaz de absorber y emitir luz en las regiones UV/IR. El material luminiscente se encuentra encerrado en un sustrato de polímero transparente y absorbe fotones UV o IR emitiendo simultáneamente luz de longitudes de onda en general más largas que la luz absorbida. Esta luz emitida por el material luminiscente es guiada hacia los extremos del sustrato polimérico transparente, donde una célula convencional opaca está instalada en finas líneas sobre el borde. El guiado de los fotones emitidos tiene que ver con una reflexión interna de acuerdo a la diferencia de índices de refracción entre el polímero y el aire. Por lo tanto, el LSC consta de dos partes: un área de absorción de la luz que incluye materiales luminiscentes y un área fotovoltaica convencional que genera electricidad.

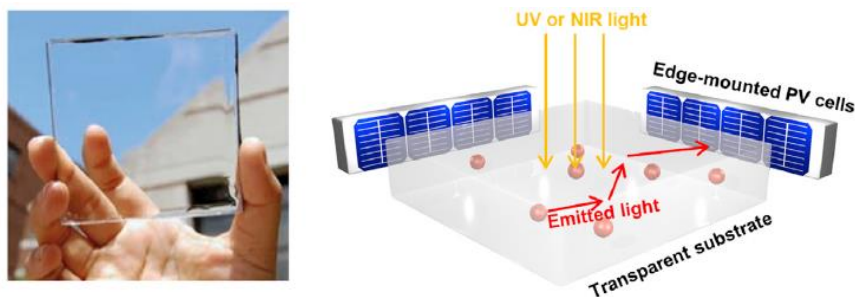


Figura 5.22. Estructura LSC y Funcionamiento. [47]

El hecho de disponer de un borde prácticamente insignificante es lo que permite al LSC adquirir la capacidad de crear módulos con casi ninguna absorción de luz en el visible. Los bordes fotovoltaicos se han realizado principalmente de c-Si, GaAs y InGaP, mientras que orgánicos (DSSC) y QDs han sido utilizados como materiales luminiscentes encerrados bajo un sustrato polimérico transparente.

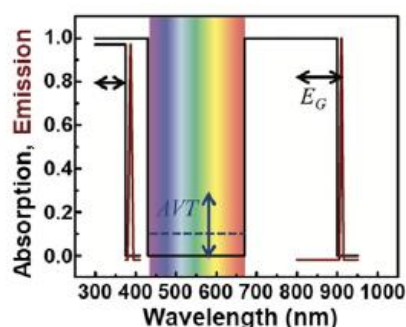


Figura 5.23. Características Ideales de un Material Luminiscente. [47]

La **figura 5.23**, muestra el comportamiento ideal que tendría un concentrador solar luminiscente. Sin embargo, hay varios factores que hacen que estemos lejos del caso ideal. Por un lado, existe una eficiencia óptica (OPE) que tiene que ver con la relación entre la energía emitida por el material luminiscente y la energía incidente del sol, si esta eficiencia la multiplicamos por el PCE de los módulos en el borde somos capaces de obtener el PCE del sistema, pues bien, el OPE varía dependiendo del tamaño del LSC ya que se producen pérdidas como puede ser el escape de la luz emitida por el material luminiscente antes de ser guiado a las células solares. Además, si a esto le sumamos la absorción y la emisión de un material luminiscente real, el cual tiene una absorción relativamente baja en las regiones UV e IR, ocasiona que menos fotones sean capaces de alcanzar las células y esto lleva a menores OPE. Un OPE bajo hace que finalmente el PCE sea muy bajo incluso comparado con la estimación ideal.

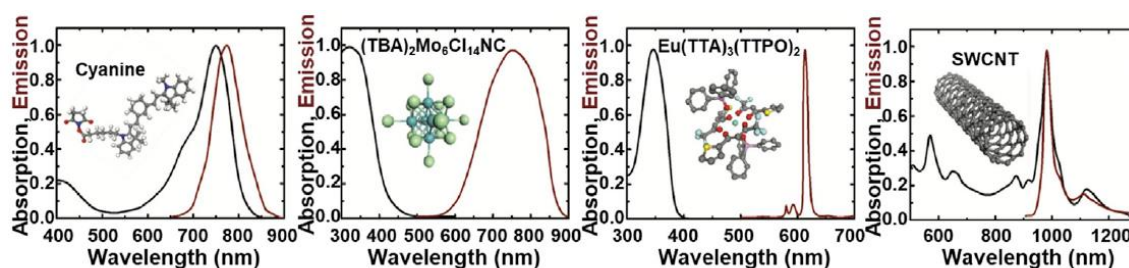


Figura 5.24. Características Reales de Materiales Luminiscentes. [47]

Por último, desde el punto de vista de la estabilidad del LSC destacar que principalmente los materiales de los que está compuesto (polímero transparente y células convencionales) disponen de una alta vida útil. Pero si evaluamos el material luminiscente (en la **figura 5.25** se evalúa el DSSC) se puede comprobar que hay algunos materiales que si han permanecido estables durante un periodo de dos años, aun así, la estabilidad es muy baja debido a que los materiales luminiscentes son muy sensibles al oxígeno y humedad bajo condiciones atmosféricas reduciendo bastante su vida útil.

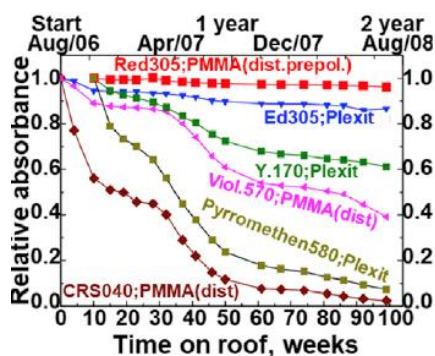


Figura 5.25. Absorbancia de Materiales Luminiscentes durante 2 Años. [47]

Finalmente, para terminar con este apartado presentamos una tabla a modo de resumen acerca de las ventajas e inconvenientes de cada tipo de tecnología transparente cuyos conceptos han sido extraídos del artículo [47]:

Tecnología Transparente	Ventajas	Inconvenientes
Thin-film	- Gran variedad de materiales para la capa de absorción. - Poca cantidad de material para su fabricación. - Se espera un coste del material menor que el opaco. - Al transmitir muy bien el IR genera menos calor en el dispositivo.	- Bajas PCEs en comparación con los opacos. (Orgánicos hasta 9.8% con AVT 38.3%, los inorgánicos hasta 9.78% con AVT 9.04% y pervoskita hasta el 12.6% AVT 21.5%). - Alta transmitancia en IR: color no neutro. - Requiere alta estabilidad y sólo la prometen los inorgánicos. - No admite elevadas transparencias. - El ángulo de incidencia en TPV afecta de la misma forma que en los convencionales. - Requiere de modularización para su aplicación.

Selectiva en Luz	• Puede emplear módulos comerciales los cuales son más baratos. • Dispone de una alta estabilidad. • Proceso de fabricación prácticamente igual de rápido y fácil que los convencionales. • Consigue un color neutro. • Afecta positivamente la transparencia a la corriente generada con distintos ángulos de incidencia.	• Es complicada su adaptación a la estética del edificio. • Mayor espesor que thin-film. • PCEs en función de AVT algo más bajos que Thin-film (hasta el 12.2% con un AVT del 20%). • No admite elevadas transparencias. • Requiere de modularización para su aplicación.
Concentrador Solar Luminiscente	• Alta transmitancia visible. • Permite conseguir un color neutro. • Se pueden realizar sistemas a gran escala con facilidad. • Permite el uso de materiales FV convencionales.	• Necesita un mayor estudio sobre materiales luminiscentes con mejores capacidades de absorción UV e IR. • PCEs excesivamente bajos (hasta 1.24% con AVT del 74.4%) • Baja estabilidad a causa de los materiales luminiscentes. • No hay estándares para encapsular eficientemente el LSC ni para evaluar su estabilidad.

Tabla 5.2. Ventajas e Inconvenientes Tecnologías Transparentes.

5.3 Color Materiales FV

El color de los materiales FV se puede considerar una característica visual, aunque en este TFM se ha optado por separar del apartado anterior para darle más importancia a la transparencia.

El color de las células y módulos fotovoltaicos pueden romper barreras sociales para una mayor integración de la fotovoltaica. En este sector hay varias empresas que están haciendo esfuerzos para conseguirlo.

Una primera aproximación es el uso de encapsulantes coloreados o cristal pintado en la superficie frontal, pero sufren una baja saturación de color y una alta pérdida de potencia.

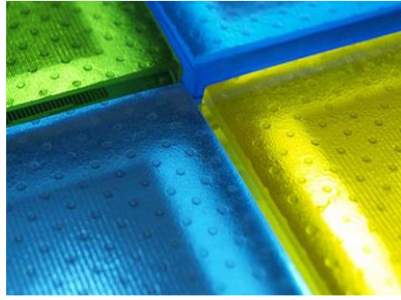


Figura 5.26. Módulo Fotovoltaico con Cristal Frontal Tintado. [48]

Por otro lado, la empresa Solartec.pl diseña módulos fotovoltaicos con el color que desees para integración en cualquier parte del edificio (fachadas, cubiertas, cristalerías, etc), para ello cambian el espesor de la capa antirreflejante y este cambio en las propiedades de la capa producen cambios de color. Esta sería una opción de reducir las pérdidas de los casos anteriores, pero el rango de color es limitado y bastante difícil de lograr. Uno de los principales inconvenientes de la capa antirreflexiva es la gran degradación que sufren, por lo que esta opción en estos momentos no es muy viable.



Figura 5.27. Módulo Fotovoltaico. Diferente Espesor de Capa Antirreflejante. [48]

Una de las soluciones para conseguir mayor eficiencia es mediante el uso de una capa de color “MorphoColor” que se corresponde con una estructura fotónica formada una capa fina de cristal en combinación con capas de alto/bajo índice de refracción y por un encapsulante por el cual la luz es transmitida, de esta forma es posible obtener una alta transmisión, mejorar la saturación del color y conseguir estabilidad angular. Se estiman unas pérdidas muy bajas, tal que la potencia se reduce en menos de un 6% respecto a un módulo básico.

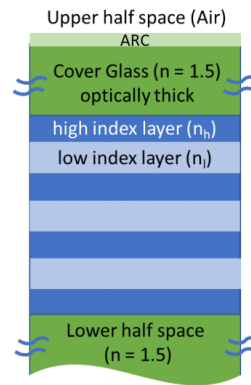


Figura 5.28. Estructura Capa MorphoColor. [49]

Otra forma de pintar módulos fotovoltaicos es en la parte trasera del módulo, en lugar de disponer de Tedlar se dispone de un cristal tintado, esta opción es bastante buena para una cristalería interior de un edificio, en ese caso no afectaría a la eficiencia del sistema. También se puede combinar esta opción con la anterior y tendremos un módulo tintado por ambos extremos. [48], [49]



Figura 5.29. Muro Cortina Fotovoltaico. Sede Schott Ibérica, Barcelona. [48]

5.4 Revisión Tecnologías FV Actuales/Emergentes

Se pretende realizar una revisión de las tecnologías fotovoltaicas disponibles en la actualidad. Haremos una clasificación de células solares de acuerdo a la tecnología empleada: **silicio cristalino**, **thin-film** y **multiunión**. A la vez, dentro de esta caracterización se encuentran diversos tipos de materiales y estructuras como veremos a continuación. Con esta revisión se pretende visualizar los beneficios e inconvenientes de cada tecnología para conocer su aplicación en agrivoltaica.

Antes de comenzar con el apartado, destacar que los materiales comerciales fotovoltaicos más utilizados en la actualidad son el silicio, CdTe, CIGS y GaAs como se puede ver en la siguiente figura:

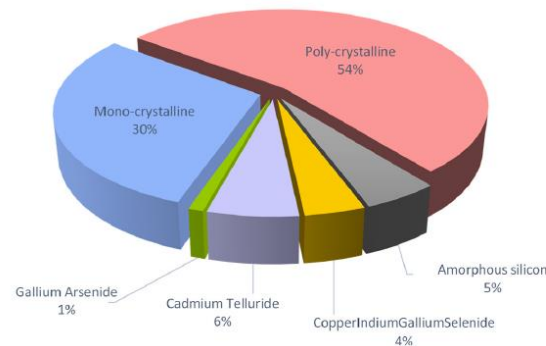


Figura 5.30. Módulos Fotovoltaicos en el Mercado Global. [31]

Asimismo, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) lanza una gráfica donde pueden verse los records de eficiencia alcanzados en laboratorio para las diversas tecnologías, en [55] se ha modificado la gráfica del NREL para clarificar conceptos:

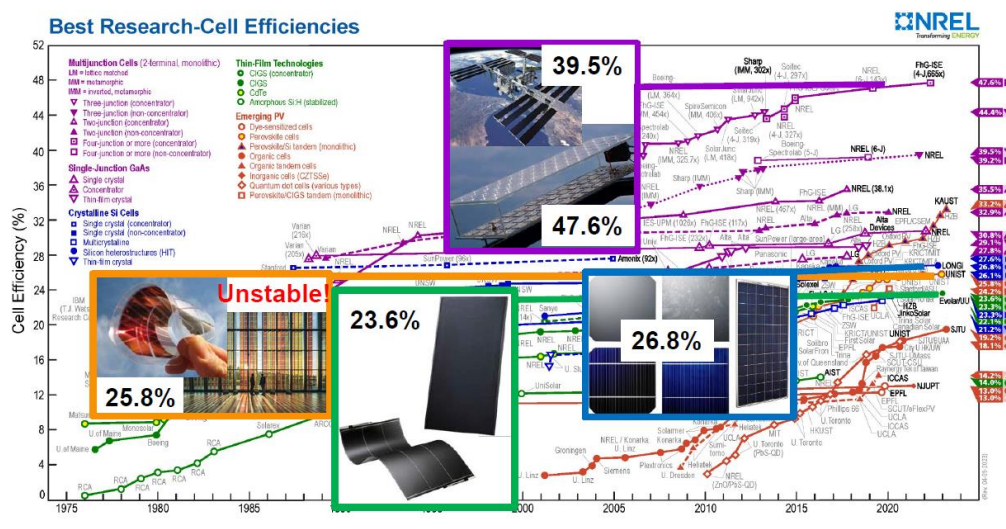


Figura 5.31. Records de Eficiencia de las Tecnologías FV en Laboratorio. [50]

Por otro lado, actualmente estamos viviendo una época de transición y desarrollo de nuevas tecnologías fotovoltaicas para la persecución de productos disruptivos que sean más eficientes a un menor costo como se puede ver a continuación:

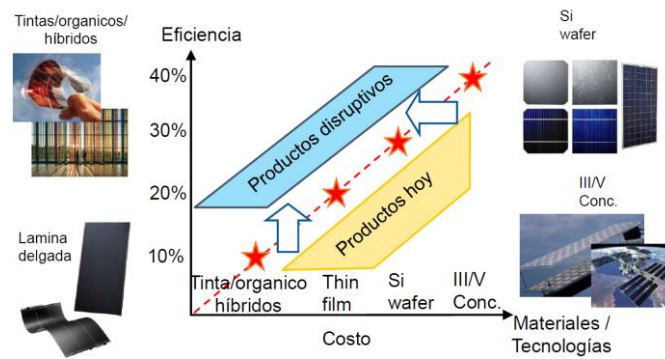


Figura 5.32. Metas del Desarrollo de Nuevas Tecnologías FV. [50]

Además, normalmente se hace una clasificación de las tecnologías fotovoltaicas de acuerdo con las generaciones:

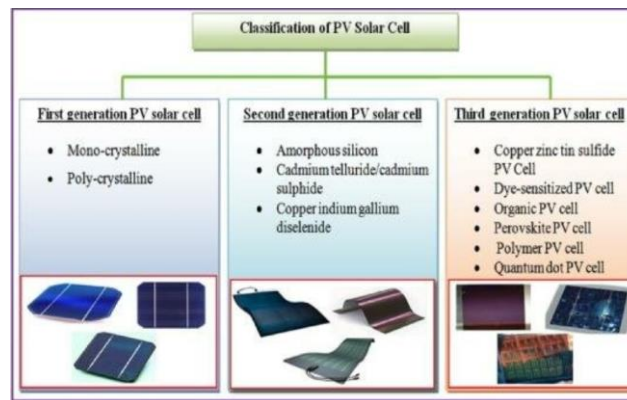


Figura 5.33. Clasificación de las Tecnologías FV por Generaciones. [51]

Sin embargo, esta clasificación desde el punto de vista práctico no tiene mucho sentido porque algunas células no están ordenadas en generaciones por características comunes, es por ello más lógico hacer una clasificación tal y como se ha mencionado al inicio.

5.4.1 Células de Silicio Cristalino

El silicio se ha convertido en la tecnología fotovoltaica más empleada con cerca de un 80% del mercado global. El silicio puro es un sólido de color gris plateado, se corresponde con el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre con un 27.5% situado justo después del oxígeno (50.5%) y esta disponibilidad es suficiente para abastecer la demanda global de energía. En la naturaleza se encuentra en forma de dióxido de silicio o sílice, siendo el cuarzo la forma más común de la sílice, el cual se encuentra abundantemente en la arena. La sílice es usada para producir silicio metalúrgico que pasa por varias etapas de purificación y refinado hasta obtener un silicio de alta pureza para la industria

fotovoltaica. Además de su abundancia hay otras razones por las cuales el silicio permanece como el material seleccionado para la fotovoltaica, el silicio no es tóxico en sus formas naturales, no es corrosivo y es capaz de formar una pequeña lamina protectora y químicamente estable de dióxido de silicio en la interfaz del silicio con la atmósfera. Esta capa protectora además de actuar como aislante eléctrico proporciona una pasivación que reduce el número de recombinaciones en la superficie, mejorando el funcionamiento de las células de silicio (la capa de óxido también disminuye el riesgo de degradación de la oblea de silicio). Este funcionamiento en conjunto proporciona una gran estabilidad a largo plazo para esta tecnología y es la razón de su elevado mercado. [52]

Dependiendo del método utilizado para hacer crecer los cristales de silicio podemos obtener **silicio monocristalino, policristalino o multicristalino**.

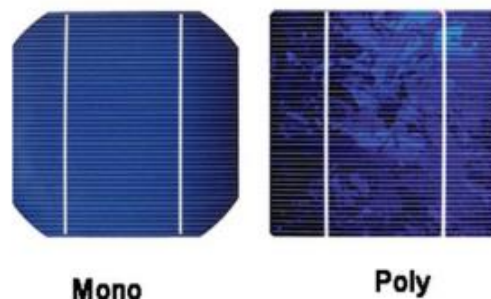


Figura 5.34. Paneles Solares Monocristalinos y Policristalinos. [53]

- El silicio monocristalino consiste en silicio en el cual la red cristalina de todo el sólido es continua, sin interrupciones en sus bordes y libre de cualquier grano en sus límites. El silicio monocristalino puede prepararse intrínseco, únicamente compuesto por silicio puro, o dopado, para cambiar sus propiedades semiconductoras. El crecimiento de silicio monocristalino tiene lugar en muchos casos mediante el método Czochralski que consiste en introducir una varilla con un cristal semilla en un crisol que contiene el semiconductor fundido, al pasar cierto tiempo se va solidificando la varilla y formando el cristal monocristalino de silicio, este método tiene un rendimiento en laboratorio del 22% y comercial del 17%. La eficiencia máxima registrado para una célula de silicio monocristalino de acuerdo con la **figura 5.31** es de 26.1% sin concentración.
- El silicio policristalino o multicristalino consiste en un material formado por silicio desalineado ya que está formado por múltiples pequeños cristales de silicio. Normalmente se forma a partir de los desechos electrónicos que se vuelven a fundir e introducir en un crisol y se dejan enfriar controladamente hasta obtener un cristal de peor calidad que el monocristalino con diversos granos y orientaciones entre ellos, este método dispone de un rendimiento en laboratorio del 18% y comercial del 13%. En principio el concepto de policristalino y multicristalino es el mismo, pero se le suele llamar multicristalino si el tamaño del grano del cristal es comparable o mayor que el espesor de la célula (dispone de un comportamiento parecido al monocristalino)

y en el policristalino el tamaño del grano del cristal es menor que el espesor de la célula y aparecen pérdidas en las fronteras entre cristales, obteniendo menor eficiencia. La eficiencia máxima registrado para una célula de silicio multicristalino de acuerdo con la **figura 5.31** es de 23.3%. [53]

5.4.2 Células Bifaciales

Una forma de aprovechar la radiación incidente por la parte trasera del módulo fotovoltaico es por medio de la bifacialidad. Este concepto tiene que ver con una modificación de la parte trasera del módulo para permitir el paso de luz, para lograrlo es necesario “duplicar” la composición de la cara frontal, es decir, hay que dotar al módulo en su parte trasera de unos contactos metálicos estrechos, un cristal y una capa antirreflexiva. La radiación que es capaz de convertir por la cara trasera tiene que ver con la componente difusa, siendo más significativa la directamente reflejada por el suelo (albedo). Este diseño va a ser capaz de proporcionarnos un extra de potencia del 5-30% respecto al caso monofacial, incluso con costes de fabricación más baratos.

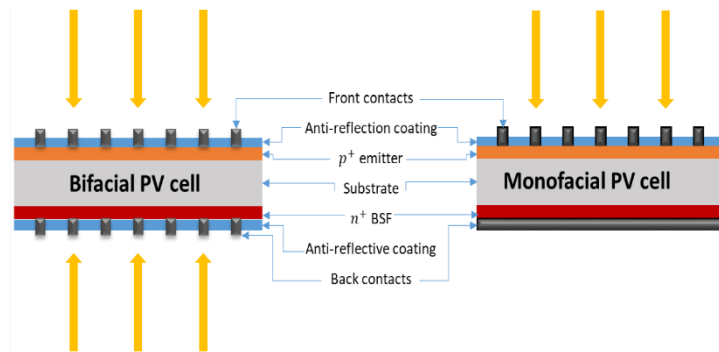


Figura 5.35. Células FV Monofaciales vs Bifaciales. [54]

El coeficiente de bifacialidad se define como la relación entre la característica IV de la cara posterior y la cara frontal de un dispositivo bifacial medido en STC, y es el factor por el que hay que multiplicar la irradiancia trasera para estimar la producción en la parte trasera del módulo. El 99% de las veces se corresponde con la relación entre la potencia trasera cuando incide 1000 W/m² sobre la cara trasera y la frontal está completamente sombreada y la potencia frontal cuando incide 1000 W/m² sobre la cara frontal y la trasera está completamente sombreada:

$$\phi_{Pm} = \frac{P_{mr}}{P_{mf}} \quad (5.5)$$

Vistas las grandes ventajas de una célula bifacial respecto a la monofacial, es el momento de comentar las estructuras típicas formadas por células de silicio cristalino.

5.4.2-1 Células Al-BSF

Comenzamos con uno de los diseños de célula fotovoltaica de silicio cristalino más básicos en la actualidad, la **célula Al-BSF** (Aluminium Back Surface Field).

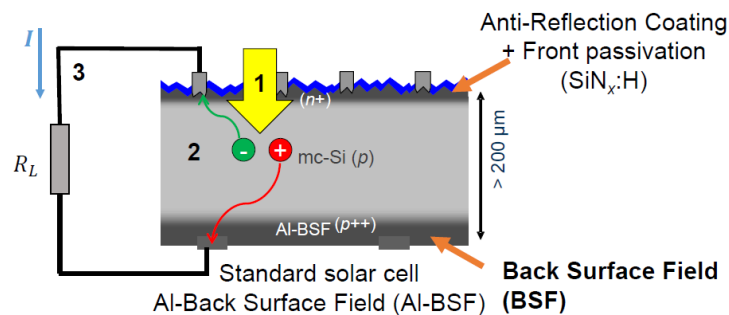


Figura 5.36. Célula Solar de Silicio Cristalino Al-BSF. [50]

Este diseño de célula ha sido utilizado para incrementar la eficiencia de una célula solar a través de la reducción de la velocidad de recombinación superficial, para ello se ponen capas fuertemente dopadas p^{++} en la superficie posterior para asegurarse que cerca de los contactos posteriores el número de huecos es muy elevado. La interfaz entre una zona muy dopada y poco dopada genera un campo eléctrico al igual que la unión PN que impide el flujo de portadores minoritarios hacia la superficie posterior. En la parte superior se suele disponer de una capa antirreflejante más una capa de material dieléctrico pasivadora para evitar las recombinaciones en los contactos superiores, también se emplea una zona altamente dopada tipo n^{+} para evitar el paso de los portadores minoritarios hacia la parte frontal. Las regiones altamente dopadas por tanto mejoran la difusión de portadores y también disminuyen las pérdidas por resistencia serie. Con esta estructura ha sido posible obtener eficiencias de células solares inferiores al 19%. [55]

5.4.2-2 Células PERC

A partir de este tipo de célula todas las que vamos a ver son bifaciales ya que permiten obtener una mejora en potencia con precios más baratos (emplea menos material conductor).

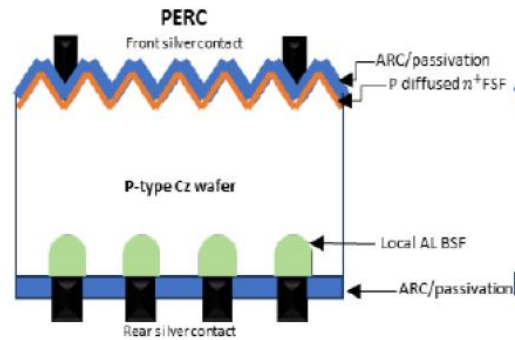


Figura 5.37. Célula Solar de Silicio Cristalino PERC. [54]

Una **célula solar PERC** o “Passivated Emitter and Rear Contact” básicamente proporciona una mejora respecto a la célula anterior por la adición de una capa de pasivación trasera, la cual es capaz de proporcionar tres beneficios: es capaz de reflejar la luz que pasa a través de la celda sin ser absorbida permitiendo un segundo intento de absorción (aumenta el camino óptico de la luz), reduce la recombinación de electrones y reduce la absorción de calor al aumentar la absorción de longitudes de onda más grandes que las que teóricamente podría absorber el material semiconductor y serían convertidas en calor. Además, al disminuir la superficie de contacto con la unión PN hemos sido capaces de reducir posibles recombinaciones. Con esta mejora somos capaces de obtener eficiencias superiores al 20%. Esta ganancia en eficiencia nos permite disminuir los costes del sistema y producir más por metro cuadrado. [56]

5.4.2-3 Células PERT

Las **células PERT** o “Passivated Emitter Rear Totally-diffused” consisten en una difusión completa en la parte posterior de la célula con un material tipo p o tipo n (en este caso tipo n) lo que proporciona un efecto de pasivación más efectivo que PERC y PERL.

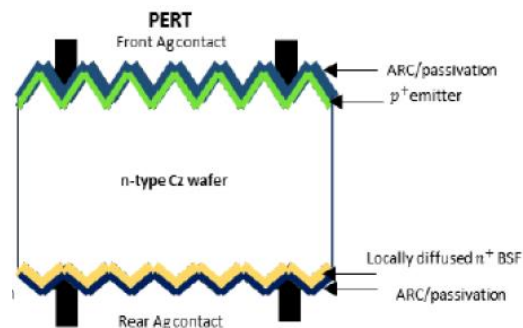


Figura 5.38. Célula Solar de Silicio Cristalino PERT. [54]

Normalmente es implementada sobre una base de silicio cristalino tipo n, ya que tiene ventaja sobre el p en soportar una mayor tolerancia a las impurezas metálicas, menores coeficientes de temperatura, mayor coeficiente de bifacialidad y menor degradación por luz inducida. Es por ello que se obtienen eficiencias del 23-24%. Sin embargo, requiere de procesos más caros para tratar la difusión del bromuro de boro y el cloruro de fosforilo a alta temperatura. A pesar de tener un proceso de fabricación más caro que el resto de células es interesante porque permite la integración de la estructura túnel de contacto pasivado con óxido (TOPCON) que veremos después. [57]

5.4.2-4 Células PERL

Las **células PERL** o “Passivated Emitter Rear Locally-diffused” se encuentra en un estado intermedio entre PERC y PERT.

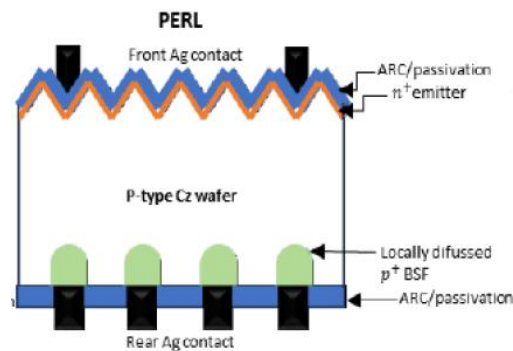


Figura 5.39. Célula Solar de Silicio Cristalino PERL. [54]

Al igual que las otras dos disponen de una superficie frontal y trasera pasivadas, la diferencia está en que la parte posterior se difunde localmente solo en los contactos metálicos para minimizar la tasa de recombinación mientras se mantiene un buen contacto eléctrico. La combinación de una capa altamente dopada localizada junto con la capa pasivadora (formada por óxido de alta calidad) logra un efecto menor de las recombinaciones del sistema. Esto implica pérdidas menores y eficiencias del 21-23%. [34]

5.4.2-5 Células TOPCON

Las **células TOPCON** o “Tunnel Oxide Passivated Contact” poseen en rasgos generales un comportamiento similar a las células PERT tipo n.

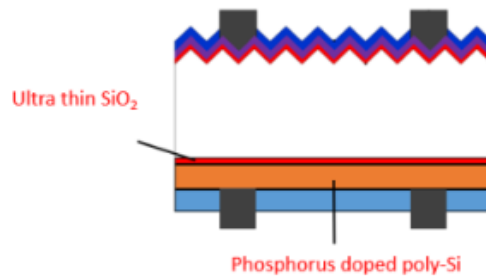


Figura 5.40. Célula Solar de Silicio Cristalino TOPCON. [58]

Típicamente, para mejorar una célula PERT a una TOPCON hace falta añadir una capa ultra fina de SiO_2 y también se requiere de una capa dopada de silicio policristalino. El SiO_2 actúa como capa de pasivación superficial entre la superficie posterior de silicio y la capa de silicio policristalino, esta debe ser lo suficientemente fina como para que la corriente pueda atravesarlo por efecto túnel. Por otro lado, la capa de silicio policristalino se encuentra altamente dopada para proporcionar una alta conductividad y actuar como contacto para la recolección de corriente, esta capa también es dopada con fósforo para proporcionar una pasivación. El Instituto Fraunhofer estima que esta nueva célula produce un aumento de cerca del 1% en la eficiencia de las células solares. De esta forma la eficiencia aumenta hasta situarse en torno al 25-26%. [58]

5.4.2-6 Células IBC

Las **células IBC** o “Interdigitated Back Contact” consisten en mover todos los contactos frontales o parte de ellos a la superficie inferior del dispositivo, ya que teóricamente los contactos traseros de la célula pueden conseguir más eficiencia. El potencial de esta tecnología se basa en la reducción del sombreado de los contactos frontales, por lo que será de gran utilidad para su aplicación en células de concentración fotovoltaica o en instalaciones grandes.

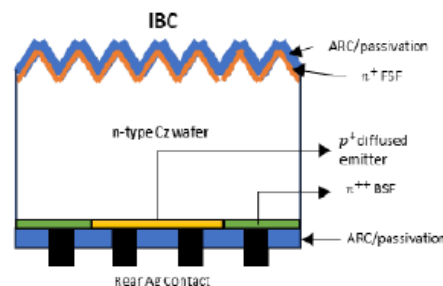


Figura 5.41. Célula Solar de Silicio Cristalino IBC. [54]

Otra de las ventajas de esta tecnología es la facilidad de interconexión de los contactos por su proximidad en la superficie trasera. Además, destacar una resistencia serie reducida al poder aumentar el tamaño de los contactos traseros y una mayor potencia de salida por metro cuadrado al poder tener un menor espaciado de células. Del mismo modo, las eficiencias alcanzadas por las células IBC varían entre 25-26%. [59]

5.4.2-7 Células HIT

Las **células HIT** o “Heterojunction with Intrinsic Thin-layer” consisten en un sustrato absorbente de silicio cristalino activo pasivado por una capa delgada de silicio amorfo intrínseco hidrogenado, o silicio nanocrystalino, y unos contactos selectivos amorfos debidamente dopados.

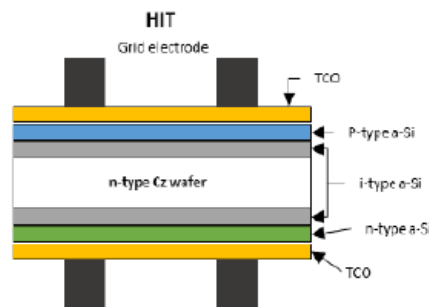


Figura 5.42. Célula Solar de Silicio Cristalino HIT. [54]

El material de contacto selectivo y el absorbedor tienen distintos anchos de banda, formando una heterounión que funciona de manera similar a una unión PN. Por otro lado, las capas intrínsecas de amorfo deben ser lo suficientemente gruesa para proporcionar una pasivación adecuada y lo suficientemente delgada para no impedir el transporte de portadores, de hecho, la gran eficiencia de esta célula se debe a las excelentes cualidades de pasivación de las capas intermedias. Respecto a las características de esta célula, posee el coeficiente de temperatura más bajo en comparación con los otros tipos, el factor de bifacialidad es superior al 90% (mientras que en las de tipo PERC se situaba cerca del 70%) y con ella se ha obtenido el record de eficiencia para células solares cristalinas de una sola unión sin concentración en laboratorio (26.8%). [60]

Para terminar con la revisión de las células cristalinas destacar que los valores de eficiencia expuestos para cada estructura son orientativos, ya que constantemente se hacen mejoras sobre estas tecnologías. Por último, destacar la tendencia durante los próximos años de las células basadas en silicio:

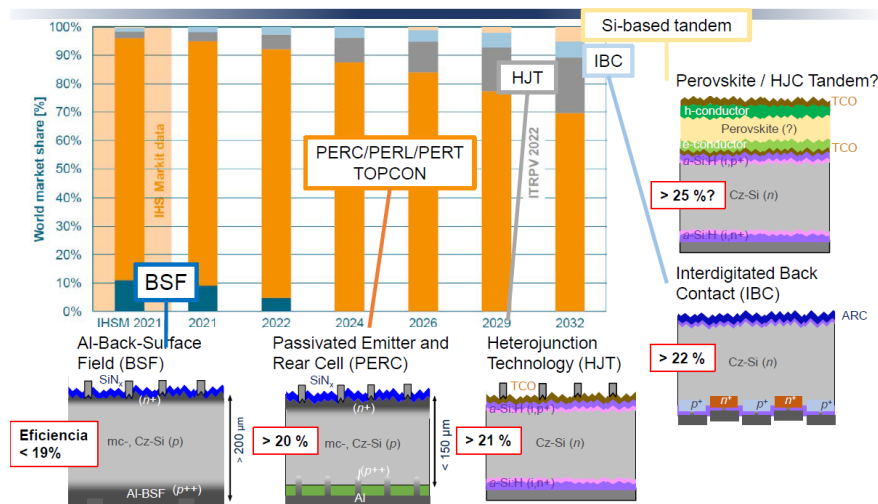


Figura 5.43. Tendencia Células Solares de Silicio Cristalino. [50]

La **figura 5.43** muestra una reducción de la tecnología Al-BSF por las limitaciones comentadas y un gran acaparamiento del mercado de las tecnologías PERC/PERL/PERT y TOPCON que van a liderar el mercado a corto/medio plazo, aunque a largo plazo se espera un gran aumento de otras tecnologías como HJT, IBC y las células tandem de silicio. Como último comentario, las células solares monocristalinas tienen la mayor vida útil variando entre 25-30 años con una tasa de degradación del 0.5% por año. (Las células tandem de silicio serán comentadas en el apartado de células multiunión).

5.4.3 Células Thin-film

Las células thin-film surgen por la gran cantidad de material y el gran precio que requieren los materiales que forman las células fotovoltaicas de silicio. Con las células thin-film es posible reducir la cantidad de material activo para producir células solares eficientes y con materiales baratos.



Figura 5.44. GFV con Células Thin-film. [61]

Este tipo de células son realizadas depositando una o más capas finas de material fotovoltaico sobre un sustrato, normalmente cristal, metal o plástico. Típicamente tienen un espesor que varía entre unos pocos nm y pocos μm , siendo mucho más finas que las de silicio. La capa de semiconductor activo puede ser más fina que en silicio por dos motivos: el empleo de una capa intrínseca de semiconductor con ancho de banda directo facilita una mayor absorción de fotones sin requerir fonones (el silicio tenía gap indirecto), o por el ajuste de las finas capas para absorber más fotones de acuerdo a un mejor ajuste del ancho de banda para una absorción óptima del espectro incidente.

Si seguimos comparando las células thin-film con las de silicio, las thin-film disponen de menores coeficientes de temperatura, es decir, actúan mejor bajo altas condiciones de temperatura que las de silicio. Otras ventajas tienen que ver con la gran flexibilidad, transparencia (como vimos en el apartado anterior) y poco peso de los módulos fotovoltaicos. A pesar de estas ventajas, también tiene unas limitaciones como son la alta degradación que sufren con el paso del tiempo (vida útil: 10-25 años) y las bajas eficiencias que son capaces de entregar (8-26%, dependiendo de la tecnología), lo que en algunos casos lleva a requerir hasta un 50% más de espacio respecto a un mismo proyecto diseñado con silicio. Por último, la gran desventaja que tienen todas las tecnologías que no son de silicio son la baja fabricación en masa de la tecnología que eleva los costes de fabricación. [61], [62], [63]

De acuerdo con la clasificación llevada a cabo en [47], las células thin-film pueden clasificarse en inorgánicas (a-Si, CIGS, CdTe, GaAs, QDSC), orgánicas y perovskitas. Sin embargo, la tecnología DSSC y perovskitas son tecnologías híbridas entre inorgánicas y orgánicas, luego se pueden clasificar las células thin-film en **inorgánicas, orgánicas e híbridas**. A continuación, se va a comentar brevemente el comportamiento de cada una de ellas:

5.4.3-1 Células de Silicio Amorfo

El silicio amorfo es la forma no cristalina del silicio. Es la tecnología thin-film más desarrollada al llevar en el mercado desde 1980 en relojes y calculadoras. Los paneles thin-film son fabricados mediante una técnica llamada deposición química de vapor mejorada con plasma que permite depositar láminas delgadas desde un estado gaseoso a un estado sólido sobre un sustrato, en este caso se utiliza una mezcla gaseosa de silano e hidrógeno para depositar una fina capa de aproximadamente 1 μm de silicio amorfo a baja temperatura sobre un sustrato de cristal o plástico.

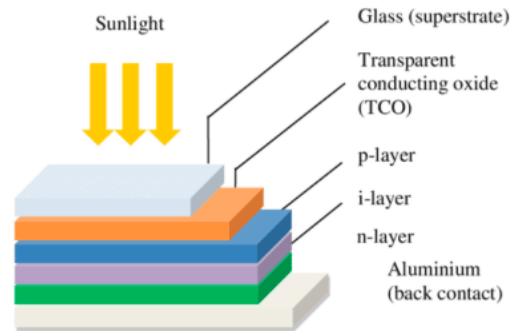


Figura 5.45. Estructura Célula de Silicio Amorfo. [64]

La unión que tiene lugar en este tipo de células puede ser p-i-n o n-i-p (conocida como heterounión pn), la capa intrínseca permite absorber los fotones con una fina capa de material a la vez que proporciona una barrera para mantener separados los portadores de carga en la zona n y p evitando así posibles recombinaciones. Al disponer la capa de silicio amorfo una movilidad de electrones 1 o 2 órdenes de magnitud superior a los huecos, se recomienda utilizar una estructura p-i-n para que la luz incida directamente sobre la zona p y la mayoría de portadores que crucen la unión sean electrones. Como contacto (aunque en la imagen se observa en zona inferior uno tradicional de aluminio) se recomienda tanto para la parte superior como inferior una TCO (óxidos conductores transparentes) que proporciona contacto eléctrico de baja resistencia sin bloquear la luz. Este tipo de contactos será de gran utilizada para módulos semitransparentes.

El silicio amorfo es un material abundante, requiere una temperatura de procesamiento baja, permite una producción en un sustrato flexible, es de bajo coste, se necesita de poco material de silicio para su diseño y es la tecnología thin-film más desarrollada. También, debido a su ancho de banda (1.7 eV) es capaz de absorber gran parte del espectro, donde se incluye un poco del ultravioleta, el visible y el infrarrojo, y funciona bien bajo condiciones de poca luz (funciona bastante bien bajo radiación difusa) cosa que los de silicio cristalino no tienen ese buen comportamiento.

Por terminar con las ventajas, las tecnologías de silicio presentan menos problemas que CdTe y CIGS, ya que no tiene el problema con la toxicidad y humedad de CdTe, ni bajos rendimientos de fabricación de CIGS a causa de la complejidad del material.

Sin embargo, el silicio amorfo posee varias desventajas. Por un lado, se produce una degradación durante los primeros seis meses de funcionamiento de entre el 15-35%. Este mecanismo de degradación se llama efecto Staebler-Wronski, y si se le realiza un recocido a 150 °C o más la degradación es perfectamente reversible, aunque esto no se hace y el material por su exposición al sol realiza parte de esa recuperación. Por otro lado, las eficiencias de conversión son del 8-12%, bastantes bajas comparadas con silicio cristalino. Para finalizar, destacar que la vida útil de estas células es de alrededor de 15 años, muy baja comparada con los aproximadamente 25-30 años de las células de silicio cristalino, con una tasa de degradación del 1% por año. [53], [62], [63], [64], [65], [figura 5.31]

5.4.3-2 Células de CIGS

Uno de los materiales más interesantes y criticados utilizados para realizar células solares es el seleniuro de Cobre-Indio-Galio (CIGS). Una célula solar CIGS se fabrica depositando finas capas de cobre, indio, galio y seleniuro sobre un sustrato de cristal o plástico, conectadas a través de unos electrodos situados en la parte frontal y trasera para recoger la corriente. Al igual que todos los materiales thin-film, este material posee un alto coeficiente de absorción al ser un material de gap directo, y por lo tanto necesita de una fina capa para absorber gran cantidad de radiación incidente.

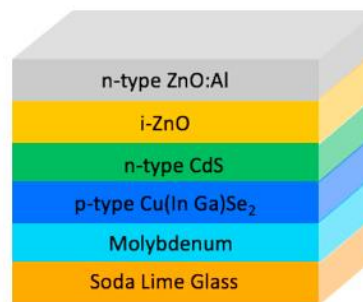


Figura 5.46. Estructura Célula Solar CIGS. [63]

Si nos centramos en su estructura, partimos de un sustrato (cristal, metal o plástico) sobre el cual se deposita una capa de molibdeno (actúa como electrodo inferior) a través de un proceso de deposición por pulverización catódica. Sobre el electrodo se deposita la llamada capa absorbente formada por una heterounión pn, la capa dopada p está formada por una aleación de CIGS sobre ella se posa una capa tipo n de CdS mediante deposición por baño químico. Continuamos colocando una fina capa intrínseca de ZnO encima de la capa buffer para protegerla y finalizamos con una capa superior formada por ZnO dopado con Al que actúa como TCO (contacto superior transparente).

En concreto, este tipo de célula posee la ventaja de ser depositada sobre un sustrato con alta flexibilidad (es un proceso realizado a baja temperatura), de gran ligereza y es capaz de obtener una eficiencia más alta que los de silicio amorfo, situándose entre el 12-15% comercialmente (en laboratorio se ha conseguido 23.6% en 2023). Por otro lado, posee un coeficiente de temperatura algo más bajo que el silicio amorfo, cerca del $-0.26\%/^{\circ}\text{C}$ frente al $-0.3\%/^{\circ}\text{C}$. Además, la vida útil de este tipo de célula se estima cerca de los 20-25 años.

Sin embargo, la controversia acerca de estas células se centra en la contaminación y elevados costes de producción. El cadmio es un material tóxico, hay que buscar un material sustitutivo que disponga de un mayor ancho de banda para además incrementar la transparencia del módulo, en algunos casos se utiliza el Zn, pero este hace que aumente todavía más los costes de producción. Todavía hay que hacer esfuerzos para intentar reducir el tamaño del CIGS a menos de $1\ \mu\text{m}$ para observar mejoras en estos aspectos. [53], [62], [63], [64], [65], [figura 5.31]

5.4.3-3 Células de CdTe

Las células solares de telururo de cadmio (CdTe) son la tecnología thin-film más empleada comercialmente. El CdTe es un material de gap directo con un gran coeficiente de absorción y una composición estable que puede ser producido por una gran variedad de métodos.

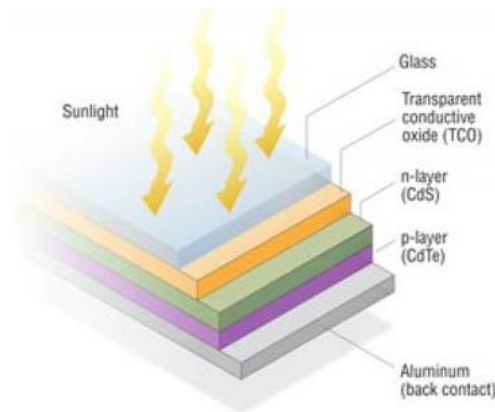


Figura 5.47. Estructura Célula Solar CdTe. [64]

La estructura seguida por este tipo de célula es muy parecida a la CIGS, sin embargo, la capa de molibdeno es sustituida por Cu_2Te para reducir el efecto de la resistencia serie y aumentar el Fill Factor (FF). Para aumentar la eficiencia se requiere una capa de agotamiento muy fina que es lograda mediante un contacto óhmico al emplear como electrodo un metal de alta calidad y una capa de Cu_2Te fuertemente dopada justo encima de él (no aparece en la imagen de arriba, es una combinación de [67] y [69]). El resto de elementos funcionan de la misma forma que la anterior, salvo porque el método de deposición es por transporte de vapor. Disponemos de una heterounión PN formada por una capa dopada tipo p de CdTe sobre la cual se dispone una capa tipo n de CdS. Sobre esta capa absorbente se incluyen una capa de óxido conductor transparente (TCO) normalmente de SnO_2 dopada con flúor que establece el contacto eléctrico superior.

Como ventajas, destacar qué es la segunda tecnología fotovoltaica en el mercado, es la única célula thin-film capaz de tener menores costes que las células de silicio cristalino en sistemas de múltiples kW, requiere menor uso de agua y menor huella de carbono durante su vida útil, dispone del menor tiempo de recuperación (menos de un año) y se obtienen eficiencias de aproximadamente el 22%.

Sin embargo, también presenta desventajas como puede ser el problema de toxicidad del cadmio (algunos investigadores tratan de ver que la contaminación durante la fabricación se compensa con el reciclado de los materiales), el telurio es un elemento muy poco abundante lo que dificulta la producción en masa de la tecnología, y finalmente la vida útil sigue siendo más baja que en silicio cristalino con aproximadamente 20 años. [53], [62], [63], [64], [65], [figura 5.31]

5.4.3-4 Células de GaAs

El arseniuro de galio (GaAs) es un semiconductor III-V de gap directo con una estructura cristalina de blenda de zinc (ZnS) usado en gran cantidad de dispositivos electrónicos al poseer ciertas ventajas sobre el silicio en este apartado, como es una movilidad de electrones más alta, por lo que los transistores pueden operar a alta frecuencia con bajo ruido, y además posee un voltaje de ruptura elevado.

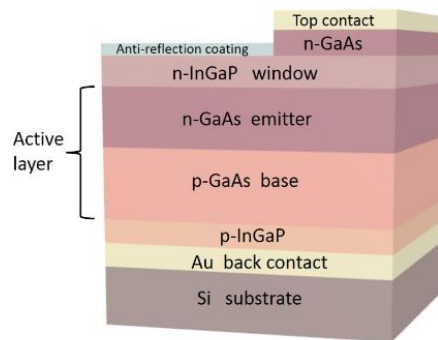


Figura 5.48. Estructura Célula Solar GaAs. [66]

Uno de los principales problemas de las células de GaAs tiene que ver con los altos costes de fabricación, alto coste de las técnicas de crecimiento epitaxial, es por ello que se trata de reutilizar el sustrato de GaAs o disminuir el espesor de la capa activa de GaAs para disminuir precios. Teóricamente, si la capa activa se hace más fina seremos capaces de reducir las pérdidas de eficiencia y reducir los costes de fabricación, sin embargo, si introducimos únicamente una capa de GaAs hay un problema para atrapar la luz en este tipo de estructuras por lo que aumenta la velocidad de recombinación en la superficie del material, ocasionando pérdidas de eficiencia. La solución es combinar la capa activa con otro tipo de estructuras capaces de atrapar la luz con materiales de gran ancho de banda como InGaP o AlGaAs, y de esta forma seremos capaces de controlar las recombinaciones en la superficie. En la estructura de la **figura 5.48** podemos observar una unión PN de GaAs que forma la capa activa, las capas de InGaP actúan como ventanas y campos de superficie traseros (BSF), respectivamente, el electrodo de metal superior es formado por una pila Ni/Au/Ge/Ni/Au. Finalmente, en la parte trasera nos encontramos con una capa de metal Pt/Au que hace la función de contacto trasero, y un sustrato de silicio que proporciona estabilidad mecánica.

Los beneficios de este tipo de células tienen que ver con algunas características comunes de los thin-film como son la flexibilidad y peso ligero. A estas ventajas hay que añadirle el coeficiente de temperatura más bajo de todas las tecnologías y disponen de la mayor eficiencia para células solares de una unión sin concentración en STC con 28.8%.

Como inconvenientes hemos mencionado que las técnicas de crecimiento epitaxial son muy caras, los materiales que la forman también lo son y en conjunto es la tecnología de simple unión más cara del mercado con cerca de 50\$/W. [53], [64], [66]

A continuación, se puede ver una tabla comparando las tecnologías fotovoltaicas vistas hasta este momento:

Solar Cell Technology	Crystalline Silicon (c-Si)			Thin-Film		
Type of Technology	Monocrystalline Silicon (mono c-Si)	Polycrystalline Silicon (poly c-Si)	Cadmium Telluride (CdTe)	Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)	Amorphous Silicon (a-Si)	Gallium Arsenide (GaAs)
Temperature Coefficient (average)	-0.446%/°C	-0.387%/°C	-0.172%/°C	-0.36%/°C	-0.234%/°C	0.09%/°C
Highest Recorded Efficiency	26.7%	24.4%	22.1%	23.4%	14.0%	29.1%
Market Share	36.0%	54.9%	5.1%	2.0%	2.0%	<1%
Price Range	\$0.16/W - \$0.46/W	\$0.24/W	\$0.40/W	\$0.60/W	\$0.69/W	\$50/W
Applications	Residential / Commercial / Industrial		Commercial / Industrial		Mostly building-integrated photovoltaics	Mostly space applications

Tabla 5.3. Características de las Principales Tecnologías Fotovoltaicas: Silicio Cristalino-Thin-Film. [64]

5.4.4 Células de Tecnologías Emergentes

Las células de tecnología emergente en FV en estos momentos tienen que ver con distintas variedades de **células FV formadas por materiales thin-film**. Sin embargo, las células multiunión pueden emplear combinaciones de capas de silicio y thin-film. En APV también se considera emergente a la tecnología FV con materiales semitransparentes cuyos casos de estudio serán analizados en el siguiente apartado.

5.4.4-1 Células de QDSC

Las células solares de puntos cuánticos, o QDSC, son un tipo de células solares que emplean como capa activa de absorción una especie de nanocristales procesados llamados puntos cuánticos. La ventaja que aportan los puntos cuánticos es la capacidad de modificar los niveles de energía de banda prohibida a partir del cambio de tamaño de los puntos, por lo que resulta una buena opción para realizar células multiunión.

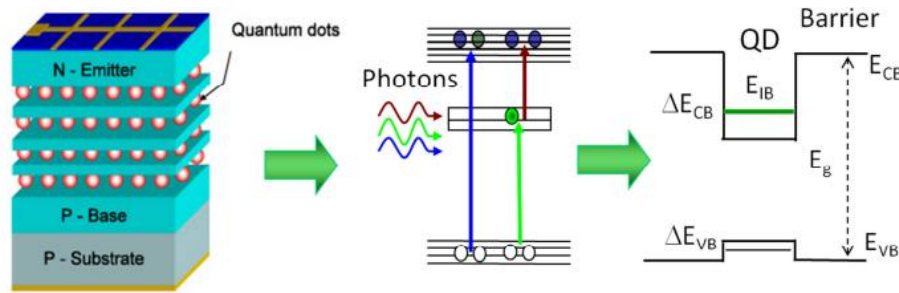


Figura 5.49. Principio de Funcionamiento QDSC. [53]

Existe un momento en el que tamaño de las partículas es tal que se empieza a perturbar la periodicidad de la red cambiando drásticamente las propiedades del material, a este fenómeno se le conoce como confinamiento cuántico. En un semiconductor cristalino este fenómeno se da cuando el tamaño de la partícula es más pequeño que el doble de su radio de Bohr. A la partícula semiconductor que debido al tamaño sufre el fenómeno de confinamiento cuántico se le conoce como punto cuántico, debido a este efecto el diagrama de bandas se distorsiona, las crestas y valles de las bandas se abren y deforman a causa del estiramiento y apretamiento del fenómeno, y como consecuencia se cambia el ancho de banda del material. Esta consecuencia puede resultar deseable para el diseño de células solares, de hecho, existen células solares de una sola unión con PbS que pueden ajustar el ancho de banda a regiones lejanas del infrarrojo, que son difícilmente alcanzadas con células tradicionales y que son de interés al disponer el espectro solar de una gran cantidad de energía en esa región.

Básicamente, la idea es utilizar una capa intrínseca de absorción localizada entre la unión PN, que contiene dentro de su estructura sólida una mezcla de nanopartículas en suspensión, de forma que seamos capaces de absorber determinadas bandas de energía en función del tamaño de los puntos cuánticos.

Los beneficios que aporta este tipo de célula tienen que ver con una facilidad de manejo de la célula en su fabricación, dispone de la posibilidad de producir a gran escala, utiliza métodos para distribuir los puntos cuánticos sobre el sustrato muy sencillos, baratos y flexibles (recubrimiento por rotación), y permite acceder de manera eficiente a regiones inaccesibles para otras tecnologías como es el caso del infrarrojo profundo.

Como desventajas destacar el cambio radical en la fabricación y montaje respecto a otras tecnologías, gran inestabilidad en ambientes húmedos y de gran temperatura (alta degradación), y aumento de la recombinación a causa de la deformación de la red que lleva a eficiencias del 14% para QDSC de PbS (alta toxicidad del Pb) y 16.6% para QDSC de perovskitas (aunque afecta más la degradación). Por último, aunque la vida útil de este tipo de células es una incógnita por su desarrollo prematuro se estima que puede variar entre 1-10 años en el peor caso. [53], [62], [67]

5.4.4-2 Células Orgánicas

Las células solares orgánicas o poliméricas tienen que ver con el uso de materiales orgánicos con altos coeficientes de absorción en la capa activa de absorción para entre otros comportamientos reducir el impacto ambiental de las células fotovoltaicas. Normalmente, como material orgánico se dispone de un polímero conjugado, el cual puede comportarse como un semiconductor de acuerdo al estudio realizado por Alan J. Heeger, Alan MacDiarmid y Hideki Shirakawa por el que recibieron el premio nobel de química en el año 2000. Destacar que en este caso el material no es cristalino, pero se distinguen dos regiones de energía LUMO y HOMO que se comportan como la banda de conducción y valencia, respectivamente.

Normalmente, podemos distinguir dos tipos de células solares orgánicas: bicapa y de heterounión distribuida.

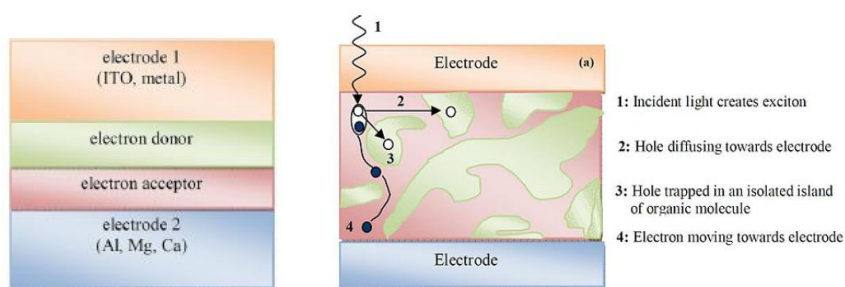


Figura 5.50. Célula Solar Orgánica Bicapa. [38]

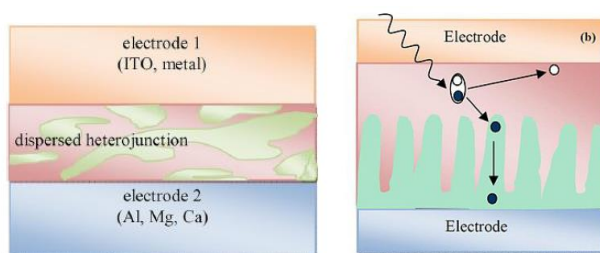


Figura 5.51. Célula Solar Orgánica Heterounión Distribuida. [38]

En las células bicapa se encuentra una capa donante, un aceptador, dos electrodos y capas selectivas de portador. Los dispositivos bicapa generalmente tienen capas selectivas de portadores para garantizar que un portador específico llegue al electrodo. Cuando incide luz sobre el material, el donante absorbe la luz con más eficacia, lo que ocasiona una diferencia en los niveles de energía LUMO y HOMO del donante y aceptador, creando un campo eléctrico. Durante la creación de pares electrón-hueco hay dos posibilidades de hueco, una llega al contacto y la otra no, por este motivo hay grandes pérdidas de eficiencia en el dispositivo.

Sin embargo, si utilizamos células de heterounión distribuida disponemos en la zona activa de una mezcla de materiales de tipo p y n en nanoescala formando una estructura de nanopilares. De esta forma, se acorta el recorrido de los electrones y los huecos a los contactos disminuyendo la recombinación y aumentando la eficiencia. A la capa activa de estas células se le conoce como Bulk Heterojunction (BHJ). Dentro de este tipo de células podemos encontrar dos estructuras de acuerdo a su geometría:

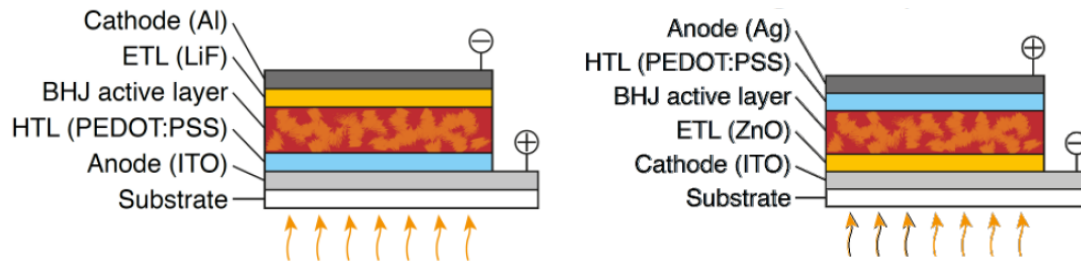


Figura 5.52. Célula Solar Orgánica DHJ Normal/Invertida. [38]

Los experimentos llevados a cabo en [68] demostraron que la arquitectura invertida muestra una eficiencia de conversión de energía superior a la arquitectura normal.

Respecto a los beneficios de las células orgánicas destacar el bajo impacto ambiental, alto coeficiente de absorción de los materiales empleados, gran cantidad de opciones para su fabricación, permite una gran adaptación estética a las condiciones requeridas, flexible por naturaleza, posibilidad de transparencia, bajo peso y bajo coste de la tecnología.

Sin embargo, presenta numerosos defectos como su baja resistencia y estabilidad que lleva a ciclos de vida inferiores al silicio cristalino (cerca de los 10 años), las longitudes de difusión son cortas, es necesario un espesor óptimo sin alterar el coeficiente de absorción y la longitud de difusión, por último, posee una eficiencia muy baja (alrededor del 11%, con un máximo de eficiencia registrado en 2023 de 19.2%). [38], [53], [62], [65], [68], [figura 5.31]

5.4.4-3 Células DSSC

Las células solares sensibilizadas por colorante (DSSC) se encuentran dentro de la distinción de híbridas, ya que basan su comportamiento en una absorción de luz de forma artificial tratando de imitar a la naturaleza, parecido a una fotosíntesis artificial. Su tecnología permanece en un estado emergente debido a su alta transparencia, capacidad de modificar el color del sistema y de convertir radiación difusa, tareas fundamentales para BIPV.

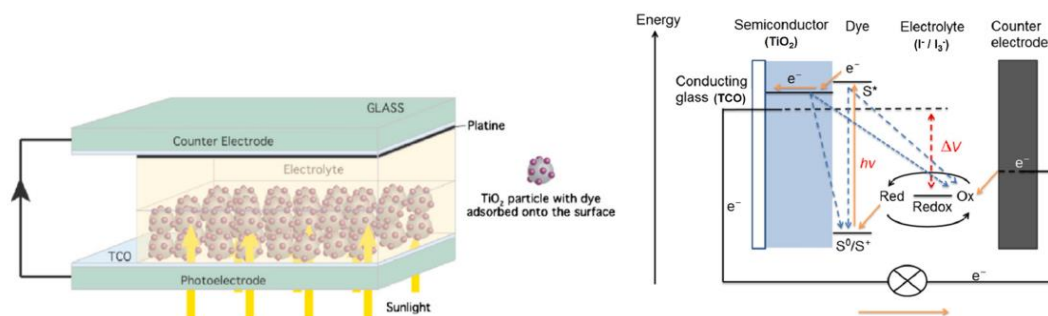


Figura 5.53. Célula Solar DSSC. Estructura y Funcionamiento. [24]

Respecto a su estructura, las células DSSC están compuestas por un sustrato rígido o flexible revestido por un óxido conductor transparente (TCO) que actúa como fotoelectrodo, una capa de semiconductor inorgánico (TiO_2), un sensibilizante absorbente absorbido sobre la superficie del semiconductor, un electrolito formado por un mediador redox y un contraelectrodo (CE) formado por un sustrato TCO cubierto por nanocluster de platino. En primer lugar, el fotón incidente es absorbido por el sensibilizante S, la tintura, formando el sensibilizante excitado S^* que inyecta electrones en la banda de conducción del semiconductor. El electrón inyectado fluye hasta el contacto transparente adyacente a través de la red de semiconductores hasta alcanzar el CE a través de una carga externa. El sensibilizante oxidado S^+ es regenerado por una reacción redox. El electrolito es, por lo tanto, reducido por el electrón que llega del CE, cerrando el circuito y formado un sistema de conversión de energía fotovoltaico.

Los beneficios de esta tecnología tienen que ver con la facilidad de fabricación del dispositivo a condiciones ambientales normales, bajo coste de fabricación (aunque puede ser aún menor si se utiliza como contraelectrodo grafeno), dispone de un gran funcionamiento a altas temperaturas de trabajo y ante luz difusa, facilidad de adaptar estéticamente a la construcción (color modificable), y posibilidad de flexibilidad y transparencia de los módulos.

Como inconvenientes, destacar las fugas que puedan ocurrir a causa de los líquidos de su interior, es necesario el uso de tinturas versátiles con alta disponibilidad y simplicidad, gran degradación de los materiales electrolíticos (15-20 años de vida útil del módulo), la temperatura de congelación de los electrolitos es baja mientras que la alta temperatura puede provocar problemas de sellado, para finalizar disponen de una eficiencia máxima alcanzada en 2023 del 13% con un valor medio de eficiencia del 11%, baja dentro de su categoría. [24], [53], [62], [68], [figura 5.31]

5.4.4-4 Células de Perovskita

La evolución de las células fotovoltaicas DSSC han permitido el reemplazo de la tintura absorbente por un semiconductor orgánico-inorgánico compuesto por una estructura cristalina de perovskita cuya fórmula química es ABX_3 , donde A, B y X se refieren a un catión monovalente, catión divalente y anión monovalente. A este nuevo tipo de células

fotovoltaicas se le conocen por el nombre de células de perovskita. La poca estabilidad de los electrolitos líquidos en DSSC (provoca bajas PCE) ha permitido el avance en el desarrollo de un material sólido que actúa como absorbente, como es el caso de la perovskita.

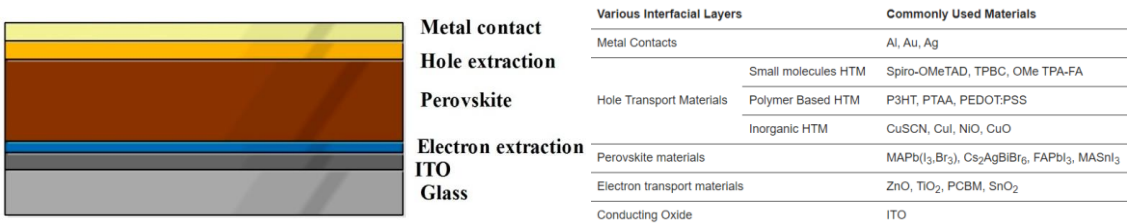


Figura 5.54. Célula Solar de Perovskita. Estructura y Materiales. [68]

La **figura 5.54** muestra la arquitectura básica de una célula solar de perovskita. La luz incide directamente sobre el electrodo conductor transparente. En primer lugar, se utiliza ITO, pero a causa de su poca estabilidad y alto coste se decide utilizar en muchos casos FTO. La luz incidente atraviesa la capa de transporte de electrones hasta llegar a la capa absorbente de perovskita. El material de las capas de transporte de electrones y huecos se selecciona para permitir la transparencia de la luz y conducir los excitones generados a los contactos. La capa de perovskita, que es absorbente por naturaleza, es capaz de generar pares electrón-hueco cuando los fotones incidentes sobre ella sean iguales o superiores al gap de energía del material. Una vez generados los pares electrón-hueco se producirá el transporte de electrones y huecos a través de las capas de transporte hacia el circuito externo. Destacar que las texturas superficiales de los materiales de transporte de electrones influyen en la PCE.

Como ventajas de esta tecnología destacar un elevado coeficiente de absorción, selección de gran cantidad de anchos de banda al permitir muchos materiales, buenas propiedades de transporte de electrones y huecos, técnicas de procesado sencillas y a baja temperatura, además de las características típicas de thin-film: poca cantidad de material, poco peso, posibilidad de transparencia y de disponerse sobre un sustrato flexible. También, presentan una gran eficiencia con aproximadamente un 25% (en 2023 se ha conseguido para una solar unión un 25.8%)

A pesar de esas grandes ventajas al ser una tecnología bastante nueva hay que mejorar ciertos aspectos, como puede ser la inestabilidad química durante la exposición a la luz, inestabilidad térmica, problemas con la humedad atmosférica, exposición excesiva a rayos UV, problemas de sellado y modificaciones estructurales. Todo ello lleva a una baja estabilidad en condiciones de operación, ocasionando una degradación de su estructura interna con tiempos de vida que según [69] se encuentran en torno a los 5 años en el año 2016. [24], [53], [62], [68], [69], [figura 5.31]

5.4.4-5 Células Multiunión

Existen dos caminos para aumentar directamente la eficiencia de conversión fotovoltaica. Una forma es mediante el apilamiento de materiales con distinta energía de gap para maximizar la absorción del espectro solar (células multiunión). Mientras que la otra manera es aumentando la concentración de luz que incide sobre el dispositivo (concentración fotovoltaica), ya veremos en el siguiente apartado como se pueden combinar ambos aspectos para obtener mejores resultados.

Las células multiunión o células tándem son células solares con múltiples uniones pn formadas por diferentes materiales semiconductores. La unión pn de cada material será capaz de producir una corriente eléctrica en respuesta a diferentes longitudes de onda. La célula “Top” es capaz de absorber los fotones iguales o por encima de su gap mientras que el resto son transparentes a esta célula y alcanzan la célula “Middle”, y así consecutivamente. Destacar que la elección del tipo de célula en cada capa es esencial para absorber óptimamente el espectro, hay que revisar detenidamente la respuesta espectral de la célula para conocer cómo de bien está absorbiendo esa parte del espectro y evitar bajas respuestas. También es interesante conocer la cantidad de células que se pueden interconectar, teóricamente se pueden conectar infinitas con una eficiencia máxima del 86.6% a muy alta concentración solar, pero también hay que valorar el precio y espesor de la célula global, para un tándem de dos células se ha conseguido cerca del 30% sin concentración y cerca de un 40% para tándem de tres células, estas últimas son las más utilizadas por presentar una alta eficiencia y fiabilidad. (ver **figura 5.31**), [53]

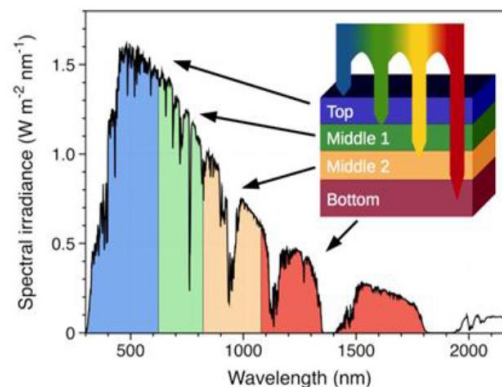


Figura 5.55. Célula Solar Multiunión. Absorción del Espectro Solar. [70]

Los **materiales** empleados por las células multiunión principalmente son elementos III y V de la tabla periódica, pudiendo construirse distintos semiconductores como combinación de los mismos:

- Semiconductor binario: GaAs, InP.
- Semiconductor ternario: $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. $0 \leq x \leq 1$.
- Semiconductor cuaternario: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. $0 \leq x \leq 1$ y $0 \leq y \leq 1$.

Aunque, también pueden construirse células multiunión con aleaciones de los grupos II y IV (CdSe, CdS, ZnS), de los grupos IV-VI (PbSe, PbS, PbTe), combinaciones cristalinas del grupo IV (c-Si, poly-Si), silicio amorfo y células orgánicas. [70], [71]

										VIIIA	
										2 He 4.003	
			IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA				
			5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.183			
			13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948			
IB	IIB			29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80
		47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30		
		79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)		

Tabla 5.4. Tabla periódica semiconductores comunes [34]

Podemos clasificar las **células multiunión atendiendo al modo de fabricación** en: células de apilamiento mecánico y células monolíticas.

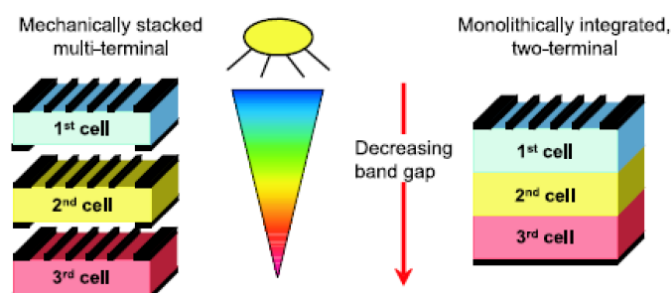


Figura 5.56. Célula Solar Multiunión. Apilamiento Mecánico vs Monolítica. [37]

- **Apilamiento mecánico:** los materiales son crecidos en células individuales, cada una con sus contactos, y luego unidas de forma mecánica. Esta unión mecánica requiere de bastante precisión y es una técnica más costosa, es por ello que se encuentra en desuso a favor de la monolíticas.
- **Monolíticas:** los materiales son crecidos sobre un único sustrato de forma conjunta y se comportan como varios cristales formando un único cristal, para la interconexión se requieren de uniones túnel. De forma adicional, se requiere que los materiales dispongan de constantes de red muy parecidas para evitar la formación de irregularidades en la unión que ocasionen recombinaciones. [37]

Dentro de las **células de multiunión monolíticas** podemos encontrarnos dos categorías **en función de su constante de red:**

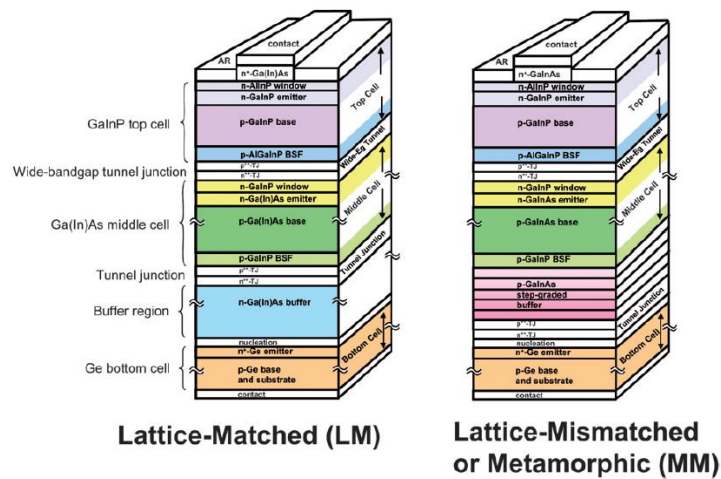


Figura 5.57. Células Solares Multiunión Monolíticas en función de la Constante de Red. [71]

- **Lattice-Matched (LM):** la forman materiales semiconductores con la misma constante de red, de esta forma se consigue una estructura dónde los materiales crecen de una forma mucho más sencilla es por ello que son los tipos de células multiunión más comercializadas actualmente.
- **Lattice-mismatched (MM):** consiste en la unión de semiconductores que difieren ligeramente en su constante de red, por lo que presenta ciertos defectos en sus uniones y aumenta la recombinación, además disponen de una estructura más compleja. Se pretende en un futuro desarrollar más este tipo de células ya que posiblemente permiten alcanzar eficiencias más elevadas, pero hay que ver si el aumento de coste se compensa con la ganancia en eficiencia.

Si analizamos la estructura de la célula multiunión monolítica LM de la **figura 5.57** podemos observar nuevas capas en comparación con las células fotovoltaicas vistas anteriormente:

- **Capa de nucleación:** permite adaptar la constante de red, en este caso del Ge, al material que se encuentra encima para una mejor superficie de crecido.
- **Capa buffer:** contiene los defectos y dislocaciones que ocurren tras el crecido y de las diferentes constantes de red entre los materiales de la unión con el objetivo de que este tipo de defectos no se encuentren en la zona de generación de las células.
- **Unión túnel:** permite la interconexión en serie de las células y que los electrones atraviesen la barrera de potencial por efecto túnel cuántico. [37], [71]

Por último, queda destacar las ventajas e inconvenientes de la tecnología multiunión. Dentro de las ventajas mencionar la gran eficiencia que son capaces de conseguir (33-40% sin concentración), la gran posibilidad de estructuras con diferentes materiales (incluso se pueden hacer tandem de thin-film con silicio amorfo para conseguir una célula con eficiencia cercana al 10% y flexible), gran capacidad de absorción de una amplia región del espectro solar. Como desventajas, el alto precio de los materiales junto con el

alto nivel de complejidad y de costes de los procesos de fabricación han llevado a esta tecnología fotovoltaica a ser la más costosa, haciendo que sus aplicaciones estén limitadas al espacio y concentración fotovoltaica. Otro de los principales problemas es la sensibilidad a los defectos producidos entre materiales. Por último y no menos importante, la vida útil depende de los tipos de células empleados lo que requiere un cuidado extra en el diseño. [53]

5.4.5 Ventajas/Desventajas para su Aplicación en APV

Aunque hemos mencionado a nivel de laboratorio los términos de eficiencia de célula a partir de la **figura 5.31**, para la comercialización las células se venden montadas en módulos fotovoltaicos. Debido a la interconexión de las células y las pérdidas correspondientes por tener condiciones de operación diferentes, el rendimiento final de un módulo fotovoltaico es varios puntos de eficiencia inferior. Por ello, el NREL lanza una tabla con eficiencias del módulo máximas registradas para las tecnologías fotovoltaicas más comercializadas en la actualidad, de acuerdo al tamaño de módulo empleado:

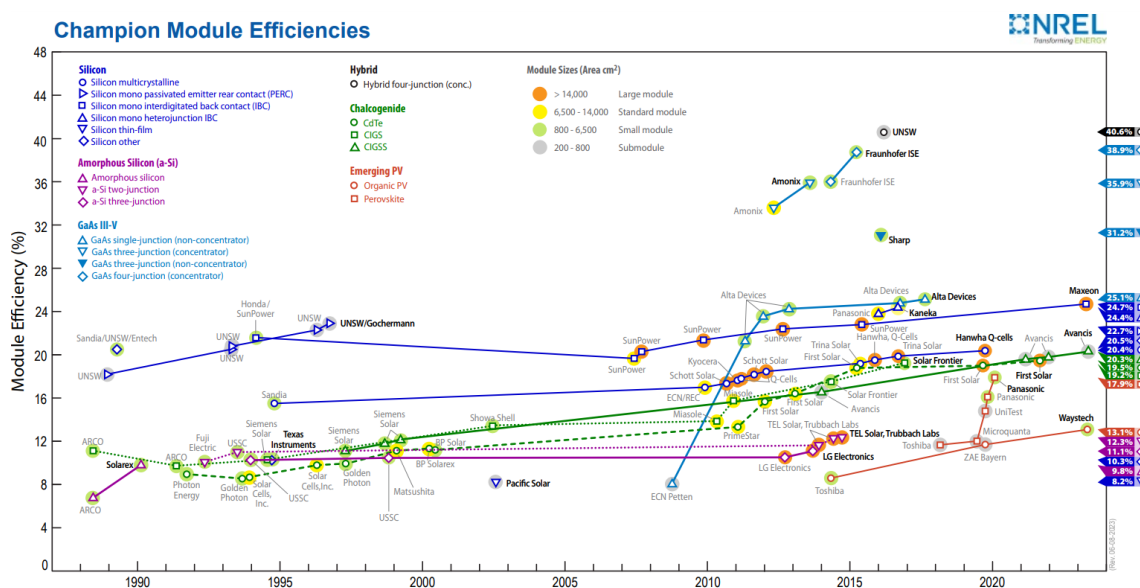


Figura 5.61. Eficiencias de Módulos Record NREL. [73]

Si nos damos cuenta en la **figura 5.61**, hay tecnologías de las que no se ha podido encontrar información acerca de la eficiencia de módulos, quizás debido a su poca comercialización y empleo en sistemas reales.

Para finalizar con la revisión de las tecnologías fotovoltaicas en la actualidad, en forma de conclusión se va a realizar una tabla con las ventajas e inconvenientes de cada bloque principal de tecnologías para así con un vistazo conocer las características de cada una de ellas.

Tecnología Fotovoltaica	Ventajas	Inconvenientes
Silicio Cristalino	• Material semiconductor más abundante, no es tóxico y corrosivo por naturaleza. • Tecnología más desarrollada con producción a gran escala y bajos precios de fabricación. • Eficiencias de célula elevadas (19-26% aprox). • Baja degradación (0.5%/año) que permite vida útil entre 25-30 años. • Tecnología de presente y futuro por su reducido coste.	• Bajo coeficiente de absorción (gap indirecto), necesita un aumento de tamaño (alto espesor y peso de la célula). • Transparencia limitada a métodos inestables, o de baja eficiencia y transparencia. • Necesita una alta cantidad de material semiconductor, y son materiales rígidos. • Técnicas de procesado a alta temperatura, y alto coeficiente de temperatura.
Thin-Film	• Gran cantidad de materiales: orgánicos, inorgánicos e híbridos. • Alto coeficiente de absorción (gap directo), se pueden combinar capas de poco espesor para un mejor ajuste del gap. • Técnicas de procesado a baja temperatura que permite trabajar con sustratos flexibles. • Bajos costes de fabricación por las técnicas y reducidos costes del material, sin embargo, el coste €/Wp es algo más caro que silicio cristalino. • Bajos coeficientes de temperatura. • Acepta un alto grado de transparencia manteniendo buena eficiencia. • Mejora la conversión de radiación difusa.	• Aumento de la complejidad de la estructura. • FF inferior que en silicio cristalino. • Algunas sufren inestabilidad térmica, problemas con la humedad y exposición a rayos UV. • Alta degradación que lleva a ciclos de vida variables entre los 5-20 años, dependiendo de la tecnología. • Eficiencias por lo normal bajas, y variables entre el 8-26%, de acuerdo con el tipo. • Tecnología de futuro (sobre todo en aplicaciones BIPV), baja participación en el mercado.

Multiunión	• Gran posibilidad de combinaciones con las otras tecnologías. • Absorción del espectro mucho más eficiente, con eficiencias de célula variables entre el 33-40%. • Posibilidad de conexión en serie de “infinitas” células fotovoltaicas. • Se pueden conseguir tandem de materiales thin-film de silicio amorfo flexible con una eficiencia cercana al 10% con cierta transparencia. • Tecnología más utilizada en CPV para conseguir las mayores eficiencias con altos niveles de concentración. • Su diseño es tan variable que pueden conseguirse estructuras de bajo peso y bajo coste.	• Normalmente poseen de un alto precio de los materiales, alto nivel de complejidad y de costes de fabricación que la convierten en la célula fotovoltaica más cara. • Gran sensibilidad a los defectos producidos entre materiales, hay que controlar la constante de red. • Se necesita de un estudio muy exhaustivo sobre los materiales utilizados para una absorción óptima. • La vida útil a priori no es conocida por la gran cantidad de diseños y combinaciones, pero se estima menor que las células de silicio cristalino por su uso.
--	--	---

Tabla 5.6. Ventajas e Inconvenientes Principales Tecnologías FV.

5.5 Aplicación de Tecnologías FV Semitransparentes en APV. Casos de Estudio.

En el ámbito de la BIPV, y en concreto en la APV, las tecnologías FV que están experimentando un gran crecimiento por su compromiso con el medio son las variantes semitransparentes de los materiales FV. Debido a la reciente incorporación de la APV, y de este tipo de materiales, veremos casos de estudio limitados a determinados tipos de cultivos, localizaciones y materiales FV.

5.5.1 Silicio Cristalino Semitransparente

El **silicio cristalino** es un material con una baja absorción, por lo que requiere de espesores lo suficientemente grandes para facilitar la absorción de luz. Este hecho, provoca que sea un material pesado e inflexible. Sin embargo, su principal ventaja es la alta eficiencia de conversión por su gran movilidad de portadores. Las características de este tipo de material evitan la transparencia en sí del propio material fotovoltaico (opaco) teniendo que acudir a **técnicas de transparencia selectivas en luz**, las cuales emplean

células FV convencionales (mayor facilidad de fabricación y precios competitivos) separadas cierta distancia para permitir la transparencia entre su espaciado. Por lo general, este tipo de material es complicado de adaptar a la estética del edificio, no admite elevadas transparencias y dispone de una eficiencia de conversión de energía baja para altos niveles de transparencia.

Respecto a los casos de estudios, destacar los estudios de Hassanien que examinó el efecto de módulos de silicio cristalino semitransparente en un invernadero donde se cultivan lechugas y tomates. Los módulos disponen de una potencia nominal de 170 Wp, y una eficiencia del 8.25% con una transparencia del 47%, en tres módulos de 64 células cada uno que conforman una potencia de 510 Wp con un área total de 6.1 m², que ocupan un 20% del área del invernadero. Los tomates fueron cultivados en filas con 1 m de separación y 0.5 m de separación de plantas, mientras que las lechugas ambas con distancias de 0.5 m. Como resultado se obtuvo una reducción de temperatura ambiente a causa del mayor bloqueo de luz, aunque no se observaron variaciones significativas en el crecimiento de lechugas y tomates. Por último, desde el punto de vista energético la energía producida por el sistema es de 24.5 kWh/m², suficiente para abastecer las necesidades energéticas del invernadero, con un tiempo de recuperación con descuento de 9 años. [31], [74], [75]



Figura 5.62. Invernadero de Silicio Cristalino Semitransparente. [74]

Localización	Kunming, China
Sistema APV	Invernadero FV
Tipo de Cultivos	Lechugas, Tomates
Potencia del Sistema	510 Wp
Material FV	Silicio Cristalino
Estrategia de Transparencia	Selectiva en Luz
Eficiencia/Transparencia	8.25%/ AVT= 47%
Productividad Energética	24.5 kWh/m ²
Efectos en Producción Agraria	Sin variaciones significativas

Tabla 5.7. Caso de Estudio: Invernadero FV en Kunming, China.

Otros sistemas APV empleados con este tipo de materiales FV suelen ser la fotovoltaica aérea o interespacial cuyas estrategias de transparencia son similares, solo que hay que realizar un ajuste por su diferente espaciado y recepción de luz.



Figura 5.63. Fotovoltaica Aérea con Módulos de c-Si Semitransparentes. [31]

En último lugar, un estudio innovador de la tecnología de silicio cristalino semitransparente está siendo llevado a cabo por la empresa Sphelar mediante la fabricación de microcélulas esféricas. Este tipo de células son capaces de recibir la radiación solar desde todas las direcciones debido a su forma, alcanzando grandes niveles de transparencia. También en [31] se analizan dos diferentes densidades de células sobre un sustrato de vidrio, 39% y 13%, con eficiencias del 4.5% y 1.6%, respectivamente. Los resultados obtenidos son positivos en localidades con alta radiación solar disponible, sobre todo por la capacidad de las microcélulas de absorber radiación difusa y reflejada del suelo y por las bajas pérdidas por inclinación.

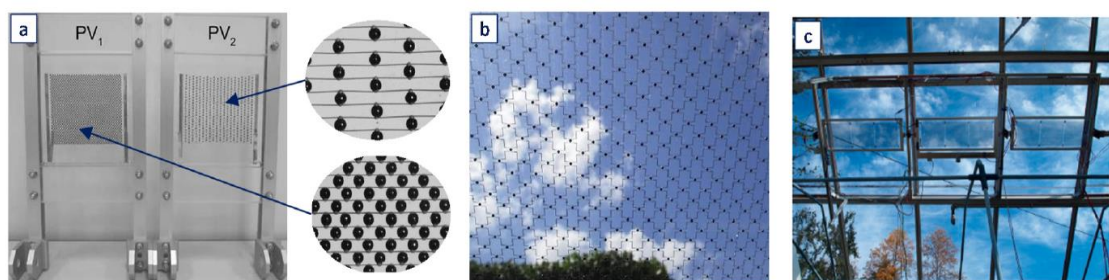


Figura 5.64. STPV con Microcélulas Esféricas. [31]

5.5.2 Silicio Amorfo Semitransparente

El silicio amorfo es un material abundante que forma parte de los materiales thin-film y se caracteriza por características tales como un bajo espesor de la célula solar que aportan bajo peso y flexibilidad. La baja cantidad de material empleada para su fabricación permiten a este material ser un dispositivo de bajo coste de fabricación y se espera que en un futuro compita con los materiales opacos. Sin embargo, como principal desventaja sufren una alta degradación que reduce bastante la vida útil de la célula FV.

El silicio amorfo al igual que el resto de materiales thin-film emplean una **estrategia de transparencia thin-film de absorción de la luz visible** que transmite cierta parte de la luz visible y absorbe el resto de energía para generar electricidad. De forma general, este tipo de estrategia frente a la selectiva en luz permite mayores niveles AVT afectando en menor medida a la PCE del dispositivo.

Si examinamos un caso de estudio podemos destacar los estudios de Aira que examinó el efecto de módulos de silicio amorfo semitransparente en un invernadero con una inclinación de tejado de 35° donde se cultivan productos hortícolas (lechugas y habas). El invernadero se encuentra dividido en dos secciones de 15 m² cada una, una superficie de vidrio convencional por un lado y un vidrio FV de silicio amorfo por otra parte. Los módulos disponen de una potencia nominal de 22 Wp, y una eficiencia del 5-10% (según Onyx Solar) con una transparencia del 30%, en un sistema de 60 módulos que conforman una potencia de 1.32 kW. Tanto las lechugas como las habas fueron cultivadas con espaciados de 40 cm entre ellas, dejando en cada fila una distancia de 2.5 m para su recolección. Como resultado se observó un mayor tamaño de las plantas a causa del cristal FV y un menor tamaño y cantidad de productos, aunque sin variaciones muy significativas. Desde el punto de vista energético, el sistema fotovoltaico produjo unos 90.15 kWh durante el mes de estudio siendo capaces de abastecer completamente la demanda de energía del invernadero FV. [31], [76]



Figura 5.65. Invernadero de Silicio Amorfo Semitransparente. [76]

Localización	Universidad de Valladolid, España
Sistema APV	Invernadero FV
Tipo de Cultivos	Lechugas, Habas
Potencia del Sistema	1.32 kW
Material FV	Silicio Amorfo
Estrategia de Transparencia	Absorción de Luz Visible: Thin-Film
Eficiencia/Transparencia	5-10%/ AVT= 30%
Productividad Energética	90.15 kWh/mes
Efectos en Producción Agraria	Sin variaciones significativas

Tabla 5.8. Caso de Estudio: Invernadero FV en Valladolid, España.

Por otro lado, existe un estudio realizado por Thompson que estudia un tipo de paneles FV tintados semitransparentes de silicio amorfo respecto al comportamiento de la planta sobre un cristal de borosilicato. En dicho informe se investiga el comportamiento de ambos materiales sobre el crecimiento de la albahaca y espinacas. Los módulos empleados son de una eficiencia del 8% para una potencia de salida de 66 W/m^2 capaces de absorber las partes azules y verdes del espectro permitiendo atravesar la luz roja con transparencias muy diversas de acuerdo a los estudios observados en [77]. Como conclusión de estos informes obtenemos una pérdida en la biomasa (conjunto de hoja, tallo, raíz) del 15% para albahaca y 26% para espinacas con el uso de cristal amorfo. Aunque esta pérdida es minimizada en cierto modo por una mejora en la PAR que aumenta el contenido proteico de los cultivos. Positivamente, los datos experimentales proyectan una mejora económica sustancial para la albahaca del 2.5% y espinacas del 35% respecto a la agricultura clásica. [77]

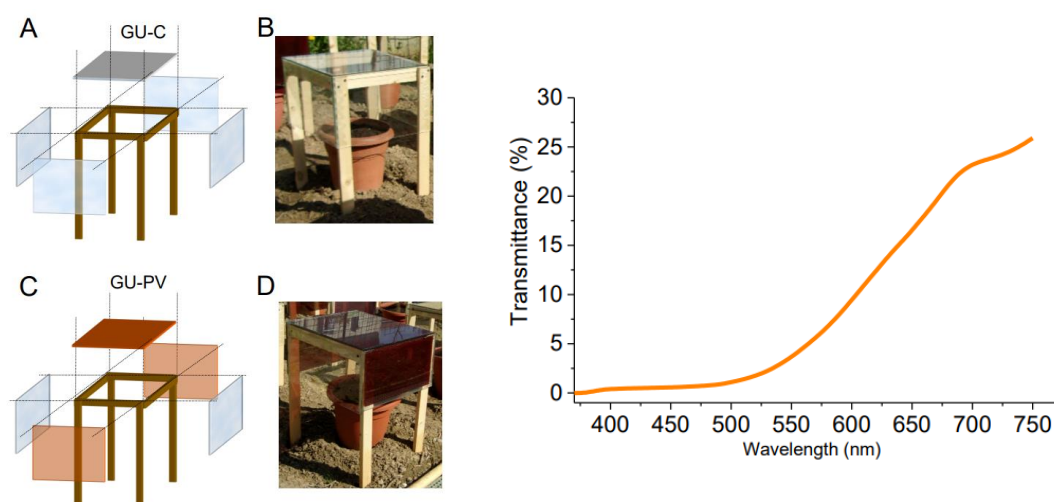


Figura 5.66. Paneles Tintados de Silicio Amorfo Semitransparente. [77]

5.5.3 Orgánica Semitransparente

Los materiales orgánicos o poliméricos forman células con uniones bastante complejas de bajo impacto ambiental y gran capacidad de absorción, bajo peso, gran flexibilidad y **estrategias de transparencia thin-film**. Sin embargo, son una opción que presenta baja estabilidad, es necesario un espesor óptimo para no alterar sus condiciones y posee una baja eficiencia.

Como caso de estudio destacar el trabajo realizado por Zisis. Los paneles OPV fueron integrados con una eficiencia de 2.1% y una transparencia del 19.4% en el techo de un invernadero mediterráneo cubriendo un 22% de su área total. La potencia de los módulos FV y del sistema completo es desconocido, aunque se conoce que el tipo de cultivo eran pimientos. En este estudio solo se valora la mejora en la productividad agraria, dejando como fuente energética de respaldo a la fotovoltaica para reducir los costes de operación. La transparencia realizada tiene que ver con una transmisión de parte del espectro visible, absorbiendo el resto de radiación. [24], [79]



Figura 5.67. Invernadero OPV / Condiciones de Sol de la Planta. [79]

Cómo podemos observar en la **figura 5.67**, se va a comparar la productividad agraria de plantas de pimiento bajo fotovoltaica, dentro del invernadero sin sombreado y a pleno sol. Debido a este método de transparencia, el sombreado OPV es capaz de proteger a las plantas de la radiación ultravioleta contribuyendo a un mejor desarrollo de la planta, tal y

como se observa en la siguiente figura con las mejoras en masa, cantidad y tamaño de los frutos y tallos. Como resultado, el sombreado OPV es capaz de producir un 9.9% más de frutas de pimiento y un 20.2% más de peso en el producto que las llamadas “Control Plants”. Además, produce un 36.8% más de frutas y 31.6% más de peso que las “Outdoor Plants”.

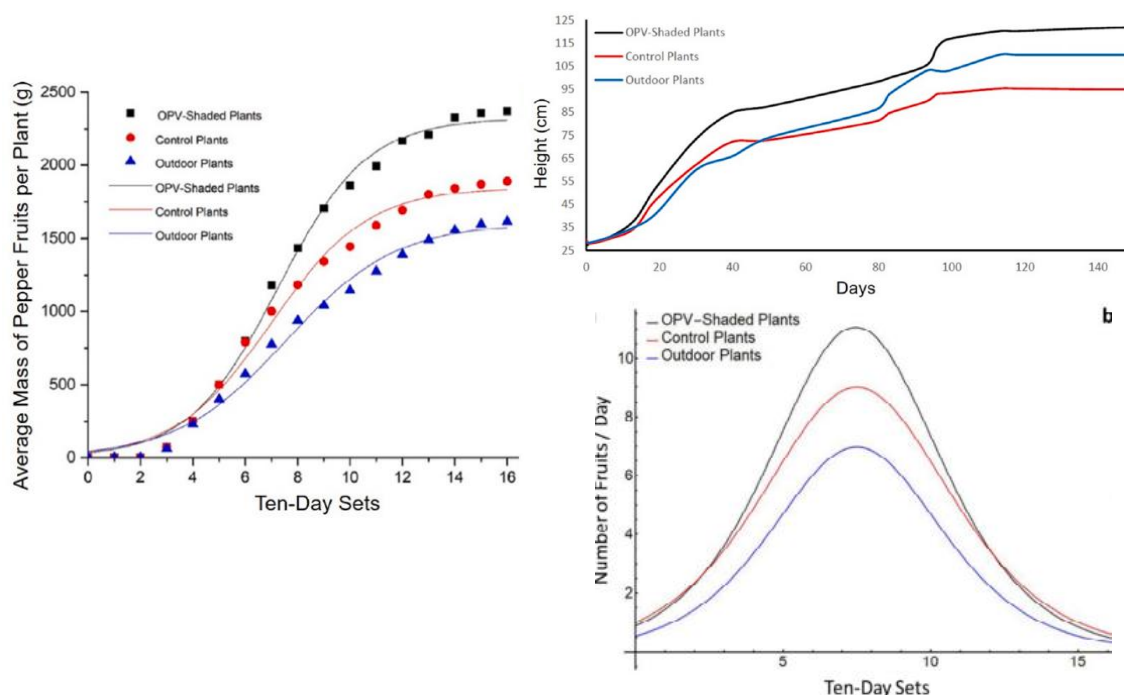


Figura 5.68. Comparación Producción Agraria Distintas Situaciones. [79]

Localización	Salónica, Grecia
Sistema APV	Invernadero FV
Tipo de Cultivos	Pimientos
Potencia del Sistema	Dsc
Material FV	Polímero
Estrategia de Transparencia	Absorción de Luz Visible: Thin-Film
Eficiencia/Transparencia	2.1%/ AVT= 19.4%
Productividad Energética	Dsc
Efectos en Producción Agraria	+9.9% frutas y +20.2% peso Control P +36.8% frutas y +31.6% peso Outdoor P

Tabla 5.9. Caso de Estudio: Invernadero OPV en Salónica, Grecia.

Por otro lado, hay algunos estudios como en [24] que tratan el punto de vista energético y afirman que un sistema OPV con un “coverage ratio” del 49% es suficiente para abastecer las necesidades del invernadero. Del mismo modo, para producir alimentos en

óptimas condiciones en la mayoría de los casos se requiere un invernadero con una transparencia de al menos el 50% de la región PAR. Aunque, ciertos organismos como las algas les basta con disponer de un 10% de transparencia.

En otros estudios como en [78], se menciona una forma de conseguir alta transparencia en células orgánicas mediante el empleo de materiales activos de absorción del infrarrojo para reducir o evitar la absorción del espectro visible, con ellos se pueden conseguir eficiencias de cerca del 11% con elevadas transparencias:

Active layer	Strategy	V_{oc} [V]	J_{sc} [mAcm ⁻²]	FF [%]	PCE [%]	AVT [%]
PCE10:A078	NIR absorbing donors/acceptors	0.75	20.4±0.8	70±3	10.8±0.5	45.7±2.1
PTB7-Th:IEICO-4Cl	NIR absorbing donors/acceptors	0.725	19.6	59	8.38	25.6
PTB7-Th:FNIC2	NIR absorbing donors/acceptors	0.727±0.002	21.42±0.48	71.6±1.4	11.1±0.2	13.9

Tabla 5.10. Materiales Activos para OPV. [78]

5.5.4 DSSC Semitransparente

Las células sensibilizadas por colorante disponen de un comportamiento híbrido al producirse una absorción artificial tratando de imitar a la naturaleza. La novedad de este tipo de células tiene que ver con el material de la capa absorbente que está formado por partículas de óxido de titanio recubiertas por una tintura absorbente en la superficie y bañadas en un electrolito, que permite su fabricación a condiciones ambientales con un bajo coste de fabricación, un gran comportamiento frente a luz difusa, color modificable, y posibilidad de flexibilidad y transparencia de los módulos. Pese a sus ventajas, todavía es una tecnología novedosa que necesita resolver los problemas de fugas del electrolito, degradación de la célula y baja eficiencia. De nuevo, al pertenecer a las células thin-film son soluciones que requieren de **estrategias de transparencia particulares para thin-film**.

Respecto a los casos de estudio, mencionar el trabajo realizado por N. Roslan. Los anchos de banda más importantes para el crecimiento de la planta corresponden con los picos de absorción de la clorofila localizados en las regiones del espectro rojas y azules. La región roja se sabe que afecta directamente a la fotosíntesis de la planta, mientras que la azul tiene que ver con la fotomorfogénesis de la misma. Aunque sólo estas dos ventanas son las necesarias para el crecimiento de la planta, debido a su complejidad de selección, en muchos casos como en este estudio se transmite toda la PAR hacia la planta, convirtiendo el resto en energía eléctrica.

N. Roslan diseñó un mini invernadero PV piloto donde se cultivó ortosifón, localizado en Selangor, Malasia con 4 paneles DSSC tintados de rojo de transparencia próxima al 40% con una potencia medida en STC de 2 W cada uno y con una eficiencia media variable entre los 0.9-1.5% con un valor máximo alcanzado de 2.9%, dispuestos sobre un tejado con una inclinación de 15° y estudiado durante un mes de funcionamiento en el año 2019. [80], [81]

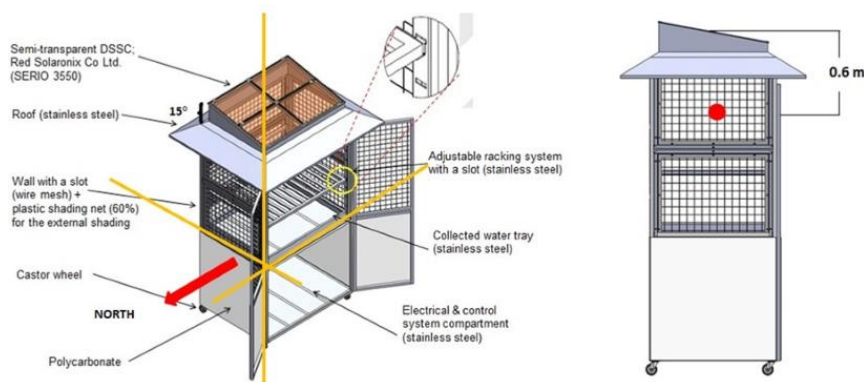


Figura 5.69. Mini Invernadero FV de DSSC. [80]

Este estudio se centró en los cambios en el crecimiento de la planta de ortosifón, dejando de lado la propia producción eléctrica, aunque se menciona que es capaz de abastecer energía suficiente para los dispositivos de medida. Como resultados, se muestra una disminución de la temperatura ambiente debajo de los paneles DSSC que junto con el aumento de la humedad relativa es beneficioso para el ahorro hídrico. Además, al bloquear la luz UV que llega a la planta se evita el bloqueo de la fotosíntesis, impulsando su crecimiento y reducción del uso de pesticidas. Además, el ortosifón es una planta que requiere baja radiación y el sombreado de este tipo de módulos le causa un retraso en la floración que puede resultar beneficioso desde el punto de vista medicinal. [80], [81]

Localización	Selangor, Malasia
Sistema APV	Prototipo de Invernadero FV
Tipo de Cultivos	Ortosifón
Potencia del Sistema	8 W
Material FV	DSSC
Estrategia de Transparencia	Absorción de Luz Visible: Thin-Film
Eficiencia/Transparencia	1-2.9%/ AVT= hasta un 40%
Productividad Energética	Suficiente para Dispositivos de Medida
Efectos en Producción Agraria	Retraso en Floración Ahorro Hídrico

Tabla 5.11. Caso de Estudio: Mini Invernadero DSSC en Selangor, Malasia.

Otro estudio realizado por J.J. Kim, realiza un invernadero FV con DSSC semitransparentes de absorción selectiva para las regiones del espectro azul y roja con distintos materiales sensibilizadores, obteniendo aproximadamente un 62% de transparencia a 660 nm (rojo) y 18% a 440 nm (azul), mientras que la eficiencia eléctrica es de cerca del 5%. Este diseño es más caro y complejo que el anterior, pero con un buen control es capaz de conseguir mejores transparencias y eficiencias. [82]



Figura 5.70. Experimento de Invernadero FV de DSSC. [82]

5.5.5 Perovskita Semitransparente

La perovskita consiste en una evolución de la DSSC que sustituye la tintura absorbente por un material semiconductor orgánico-inorgánico con estructura cristalina de perovskita. De esta forma se resuelve la inestabilidad del electrolito líquido, facilita la fabricación y aumenta enormemente su eficiencia. Sin embargo, todavía hay que resolver problemas en condiciones de operación que reducen bastante su vida útil.

La perovskita se puede considerar como un material thin-film perteneciente a la categoría híbrida, con sus características de flexibilidad, transparencia y bajo peso. Esto quiere decir que una célula únicamente basada en perovskita puede conseguir su **transparencia con una estrategia thin-film**.

La mayoría de células de perovskitas son combinadas en células multiunión para reducir los efectos de la degradación y conseguir un mayor barrido del espectro. Pese a ello, se siguen realizando artículos de investigación sobre células de perovskita semitransparentes. No se ha encontrado ningún caso de estudio de un sistema agrivoltaico experimental instalado con células básicas de perovskita semitransparente, sin embargo, si hay casos de estudio como el realizado por W.S. Subhani que analiza la eficiencia de este tipo de células a nivel de laboratorio con una gran transparencia. De acuerdo con el diseño de la célula de perovskita para su aplicación en APV se distinguen tres zonas: la región con longitudes de onda cortas, 300-500 nm, compuesta por fotones de alta energía y muy efectivos para la generación eléctrica. La región de longitudes de onda largas, 550-800 nm, que es radiación útil para la fotosíntesis, en especial para las especies vegetales

que prefieren sombra. Y, por último, la región infrarroja, más allá de los 800 nm, que es útil para el calentamiento y control de la temperatura del invernadero. [24], [83]

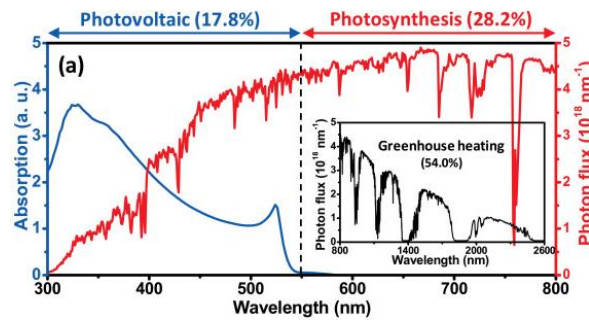


Figura 5.71. Flujo de Fotones en Sistema APV. [83]

Cómo resultados de este estudio destacar que la fuerza de interacción que tiene lugar entre un precursor anti-solvente y uno solvente puede reducir la cantidad de residuos para una mejor cristalización de la perovskita pudiendo conseguir altas eficiencias. Sin embargo, el uso de Au como metal de contacto limita la transparencia en gran medida. Si somos capaces de sustituir el Au, podremos obtener transparencias de hasta el 80%. Para el caso del artículo se empleó un espesor de 20 nm de Au para su aplicación en invernaderos logrando un PCE del 7.51% con un 40% de transparencia en las regiones entre 550-1000 nm. Además, con el diseño del sistema fotovoltaico de este informe se espera que sea capaz de proporcionar suficiente energía para el mantenimiento de la fotosíntesis de la planta, combinado con la energía suficiente para abastecer las necesidades energéticas básicas del propio invernadero. [24], [83]

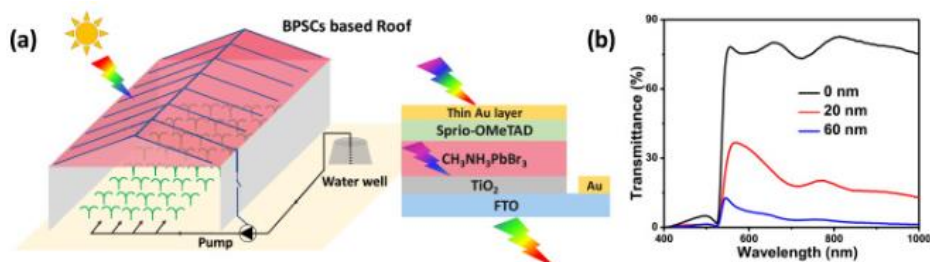


Figura 5.72. Simulación de Sistema APV de Perovskita Semitransparente. [83]

Localización	Laboratorio en China
Sistema APV	Prototipo de Mini Invernadero FV
Tipo de Cultivos	No Estudiado
Potencia del Sistema	Dsc
Material FV	Perovskita
Estrategia de Transparencia	Absorción de Luz Visible: Thin-Film
Eficiencia/Transparencia	7.51%/ AVT= 40%
Productividad Energética	Se estima suficiente para autoabastecerse
Efectos en Producción Agraria	No estudiado

Tabla 5.12. Caso de Estudio: Célula Solar Novedosa de Perovskita Semitransparente, China.

5.5.6 Concentración FV Semitransparente

La concentración fotovoltaica es una técnica capaz de conseguir una cantidad de radiación solar incidente sobre una superficie superior a la que teóricamente le corresponde por sus características. Esto se consigue con la integración de elementos ópticos que persiguen una disminución del tamaño activo de célula para lograr ahorros en material, pero una disminución del tamaño de célula, y con tanta radiación incidiendo sobre ella, necesita de una extracción de calor, luego de sistemas de refrigeración. Si queremos sistemas de concentración muy eficientes en APV tenemos que optar por células multiunión. También es cierto que podemos emplear para sistemas de baja concentración células de silicio o thin-film. De hecho, las primeras investigaciones se centran en este tipo de células, aunque se espera en un futuro su sustitución por células multiunión. [72]

Las células multiunión o tandem consisten en la unión de diversas capas de materiales con distintos anchos de banda, sobre todo silicio cristalino y thin-film, con el objetivo de convertir más eficientemente las diversas partes del espectro solar de interés. En principio, pueden emplear **cualquier tipo de estrategia de transparencia siempre y cuando el conjunto de materiales que la conforman lo permita**. A priori este tipo de células no tienen sentido sin concentración fotovoltaica ya que su eficiencia no suele compensar su complejidad y gran precio.

Del mismo modo, en un sistema APV interesa disponer de un sistema óptico de concentrador luminiscente (LSC), ya que permite desviar la radiación UV e IR a través del material luminiscente hacia los extremos del panel donde se encuentran localizados las células para absorberla, luego es la estrategia que dispone de mayor transparencia del visible. El principal problema de este sistema óptico es la baja eficiencia, pero si introducimos células multiunión puede ser una gran solución al requerir de poco espacio, gran conversión de energía, y al desviar la radiación para que incida directamente hacia la célula (las células multiunión solo convierten DNI).

También podemos encontrarnos con sistemas ópticos de concentración básicos con células multiunión que necesitan de un seguidor solar para funcionar correctamente, hasta este momento este tipo de instalaciones en sistemas APV han sido poco analizadas, quizás

por el incremento de precio que supone una buena estrategia de seguimiento solar, y en la mayoría de estudios se centran en la tecnología de concentrador luminiscente.

Respecto al caso de estudio de M.E. Loik basado en un concentrador luminiscente con células de silicio cristalino convencionales, se pretende analizar y comparar el comportamiento de unos cultivos de tomate en invernaderos completamente recubiertos por material luminiscente e invernaderos convencionales de cristal. El concentrador luminiscente forma parte de los sistemas fotovoltaicos de longitud de onda selectiva, donde un material luminiscente es capaz de absorber idealmente toda la luz no visible y reemitirla en longitudes de onda de radiación roja con el fin de reducir las pérdidas de reemisión y obtener mayores PCE, mientras que el resto de radiación llega completamente a los cultivos. Sin embargo, en un sistema real no toda la radiación visible llega a la planta y algunas partes del espectro azules y verdes son convertidas en electricidad.

En este artículo se disponen de paneles con células en la parte frontal (se observó mayor eficiencia que en los bordes) sobre un invernadero de 3.05 x 7.3 m con un coverage ratio del 12% y una transparencia AVT del 60% mostrando una eficiencia en operación del 4% (5% en laboratorio).



Figura 5.73. Invernadero LSC Experimental, Universidad de California. [84]

Como resultados se observó una disminución del coste del panel por la gran cantidad de material luminiscente ($\sim 10 \text{ \$}/\text{m}^2$) en hasta un 50% respecto al panel de silicio convencional ($\sim 300 \text{ \$}/\text{m}^2$, año 2017). Desde el punto de vista agrario, en bajas condiciones de luminosidad la tasa fotosintética en los tomates fue similar en ambos casos, mostrando una ligera disminución en el punto de saturación fotosintética. Esto llevó a mayores ahorros de agua, aunque en el LSC se observaron frutas algo más pequeñas y en menor cantidad (prácticamente similares que en el invernadero convencional). También se realizó un estudio para 18 tipos de cultivos, algunos con mayor y otros con menor productividad agraria, observándose en 5 de ellos mejoras significativas en la eficiencia fotosintética. Para finalizar con el apartado energético, el informe no se centra en este apartado en sí, aunque sí analiza el comportamiento durante

el año 2012-2013 de la productividad energética de un módulo fotovoltaico instalado sobre este invernadero, destacando que la producción energética del conjunto podría ser suficiente para abastecer las necesidades del invernadero. [31], [84]

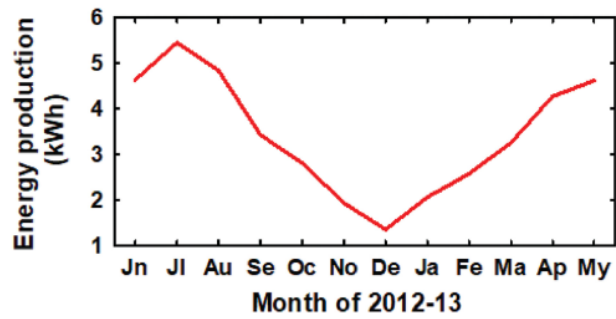


Figura 5.74. Producción Energética Mensual de Panel LSC. [84]

Localización	Arboreto de la Universidad de California
Sistema APV	Invernadero FV
Tipo de Cultivos	Tomates
Potencia del Sistema	Dsc
Material FV	Silicio Cristalino + Luminiscente
Estrategia de Transparencia	Concentrador Solar Luminiscente
Eficiencia/Transparencia	4%/ AVT= 60%
Productividad Energética	Se estima suficiente para autoabastecerse
Efectos en Producción Agraria	No Significativas

Tabla 5.13. Caso de Estudio: Concentrador Solar Luminiscente Semitransparente, Universidad de California.

5.5.7 Ventajas/Desventajas para su Aplicación en APV

Anteriormente analizamos las ventajas y desventajas de las distintas tecnologías FV de forma general. Una vez vistas las diferentes tecnologías FV semitransparentes que podemos encontrar en un sistema APV y algunos ejemplos de casos de estudio experimentales, es hora de realizar una comparación entre las distintas tecnologías.

Tecnología Fotovoltaica	Ventajas	Inconvenientes
Silicio Cristalino Semitransparente	• Material Abundante y Natural. • Mayor Desarrollo y Mercado. • Eficiencia Energética Alta. • Alta Vida Útil. • Coste Bajo/Medio. • Alta Productividad Energética.	• Baja Transparencia. • Baja Flexibilidad. • Alto Peso. • Productividad Agraria Dispar: Baja/Media. • Baja Selectividad de Color. • Mala actuación en climas con baja radiación solar. • Mala distribución del espectro solar sobre el cultivo. • No tienen sentido los cultivos amantes al sol.
Silicio Amorfo Semitransparente	• Material Abundante y Natural. • Eficiencia Energética Media. • Bajo Coste. • Productividad Agraria Media. • Transparencia Media. • Transparencia Homogénea. • Alta Flexibilidad. • Bajo Peso. • Selectividad de Color Media.	• Productividad Energética Media/Baja. • Bajo Desarrollo y Mercado de la Tecnología. • Vida Útil Media. • Dudoso Comportamiento en Operación. • Los cultivos amantes al sol sufren comportamientos muy diferentes.
Orgánica Semitransparente	• Material Orgánico. • Bajo Coste. • Productividad Agraria Media. • Transparencia Media. • Transparencia Homogénea. • Alta Flexibilidad. • Bajo Peso. • Selectividad de Color Media.	• Eficiencia Energética Baja. • Productividad Energética Media/Baja. • Bajo Desarrollo y Mercado de la Tecnología. • Vida Útil Baja. • Dudoso Comportamiento en Operación. • Los cultivos amantes al sol sufren comportamientos muy diferentes.

DSSC Semitransparente	• Material Híbrido: Orgánico/Inorgánico. • Bajo Coste. • Productividad Agraria Media. • Transparencia Media. • Transparencia Homogénea. • Alta Flexibilidad. • Bajo Peso. • Selectividad de Color Media/Alta. • Funcionamiento aceptable a elevadas temperaturas.	• Eficiencia Energética Baja. • Productividad Energética Baja. • Bajo Desarrollo y Mercado de la Tecnología. • Vida Útil Media/Baja. • Dudoso Comportamiento en Operación. • Los cultivos amantes al sol sufren comportamientos muy diferentes.
Perovskita Semitransparente	• Material Híbrido: Orgánico/Inorgánico • Eficiencia Energética Media/Alta. • Productividad Energética Media. • Bajo Coste. • Transparencia Media. • Transparencia Homogénea. • Alta Flexibilidad. • Bajo Peso. • Selectividad de Color Media. • Buen funcionamiento a elevadas temperaturas.	• Bajo Desarrollo y Mercado de la Tecnología. • Vida Útil Muy Baja. • Dudoso Comportamiento en Operación. • No se han encontrado estudios que valoren su comportamiento sobre cultivos.
Concentración FV Semitransparente (LSC)	• Material Luminiscente de Bajo Precio. • Coste Medio/Bajo. • Productividad Agraria Alta. • Transparencia Alta. • Transparencia Homogénea. • Alta Flexibilidad. • Bajo Peso. • Selectividad de Color Alta. • Gran actuación para cualquier tipo de cultivo.	• Eficiencia Energética Baja. • Productividad Energética Baja. • Bajo Desarrollo y Mercado de la Tecnología. • Vida Útil Baja. • Dudoso Comportamiento en Operación. • Queda por analizar su actuación frente a cultivos amantes al sol.

Tabla 5.14. Ventajas e Inconvenientes Principales Tecnologías FV Semitransparentes.

En la **tabla 5.14** se realiza un análisis comparativo de las ventajas/desventajas vistas a partir de la información previamente obtenida. Destacar de forma general que la tecnología de silicio cristalino es la más extendida en el mercado, con una alta eficiencia, baja flexibilidad, alto peso y baja transparencia. Un caso intermedio es el de los materiales thin-film que mejoran las últimas características a costa de reducir la eficiencia energética del conjunto. En último lugar, el otro caso extremo corresponde con LSC que permite mayor transparencia, reduciendo más la eficiencia.

A partir del análisis llevado a cabo somos capaces de observar las características de cada tecnología para plantearse su realización en un sistema real. Aún queda mucho trabajo por realizar como pueden ser modelos de simulación sobre el estado de los cultivos en sistemas APV, al igual que la observación de cada sistema APV con distintas variedades de cultivo en regiones con diferentes climas.

Pese a ello, desde un punto de vista personal creo que el futuro de la tecnología APV debe pasar por la implantación de sistemas APV interesaciales con tecnologías de silicio convencionales para ganarse la aceptación social por parte de los ganaderos. Una vez vaya progresando la tecnología, continuar su implementación hacia sistemas aéreos para observar ciertos beneficios en el agua y calidad de los cultivos. Y, por último, a largo plazo si la tecnología lo permite lo ideal sería progresar hacia tecnologías thin-film, si se resuelven los problemas de estabilidad, para mejorar la productividad de los cultivos o incluso mejor con la tecnología LSC que permite la mayor transparencia y aporta mejores beneficios para el cultivo. Si la tecnología LSC es capaz de ganarse un hueco en el mercado podríamos optar por valorar la inclusión de células multiunión en lugar de las de silicio cristalino para mejorar la eficiencia que es el mayor inconveniente de esta tecnología a costa de aumentar el coste de la tecnología.

6. CONCLUSIONES

Durante la realización del trabajo hemos presentado el estado del arte de la tecnología APV y de los materiales FV, para luego realizar una revisión de los materiales semitransparentes empleados en APV. Desde el punto de vista de la agrivoltaica se han comentado características como los tipos de sistemas APV, respuesta de la planta a la luz y los tipos de cultivos empleados en APV. Por otro lado, se han presentado las características mecánicas y visuales de una célula solar haciendo especial mención a la transparencia. Con vistas a este comportamiento, se ha optado por realizar una clasificación de las tecnologías FV actuales en función del tipo de material FV, y se ha destacado en una tabla resumen las ventajas e inconvenientes que pueden llegar a tener para APV. Llegados a este punto, se continua con el apartado fundamental de este TFM dedicado a las tecnologías semitransparentes con el desarrollo de estudios experimentales. Para finalizar, concluimos con una comparación de los materiales FV semitransparentes con vistas en su producción energética y agraria.

Los **resultados** obtenidos durante este informe destacan la idoneidad de instalación de sistemas APV en climas semiáridos y cálidos, queda por estudiar la influencia en otros climas con más humedad ya que hay tecnologías como la perovskita que no funciona muy bien ante esas condiciones. Del mismo modo, se han observado grandes ventajas en cultivos amantes de la sombra y grandes esperanzas para los cultivos amantes del sol con el empleo de materiales semitransparentes. Cada material FV tiene sus ventajas e inconvenientes, pero básicamente pueden resumirse con la siguiente observación. El silicio cristalino es una opción que ofrece la menor transparencia dentro de las estudiadas y con un alto peso, sin embargo, esa pérdida agraria es compensada con la gran eficiencia energética. Un caso intermedio es el empleo de materiales thin-film que proporcionan una buena transparencia a las plantas, aunque reduce la eficiencia energética y sobre todo queda en duda su comportamiento bajo condiciones de operación. Por último, el empleo de estrategias LSC se posiciona como el extremo opuesto al silicio cristalino, ofreciendo la mayor transparencia a causa de someterse a una baja eficiencia, aunque con el uso de células multiunión se espera que supere a las de silicio. En estos momentos se debe comenzar empleando la tecnología más desarrollada como es el silicio cristalino y realizar una transición por medio de los materiales thin-film hasta llegar en un futuro al caso ideal de un sistema LSC con alta transparencia y gran eficiencia.

Pese al desarrollo tan exhaustivo llevado a cabo en el informe, todavía quedan abiertas líneas de trabajo en el sector de la APV como pueden ser:

- Diseño de modelos económicos y financieros para valorar la producción agraria y energética en APV.
- Desarrollo de una tecnología FV estándar para APV que permita bajo coste, alta eficiencia y alta transparencia.

- Diseño de modelos capaces de estimar la producción agraria en un sistema APV.
- Establecer cuál es el tipo de cultivo adecuado para una zona con un determinado clima.
- Estimar el ahorro de agua y energético producido por la inclusión de la FV con el cultivo.
- Efectos del polvo en la producción energética y agraria.
- Potenciar la aceptación social y el desarrollo de un marco regulatorio.
- Proporcionar subvenciones e incentivos para promocionar la tecnología.
- Mayor cantidad de estudios para cada tecnología y con variedad de cultivos.
- Aumentar los casos experimentales para valorar su operación durante su vida útil.

Durante la realización del TFM han entrado en manifiesto los conocimientos adquiridos durante el máster. He podido comprobar que es necesario establecer un compromiso en sistemas tan complejos como el estudiado. De hecho, la gran posibilidad de configuraciones permite dar cierta libertad de diseño a los encargados de este tipo de sistemas. Además, este proyecto me ha servido de ayuda para comprender que sistemas tan complejos y detallados pueden ser factibles en un futuro. De igual forma, el propio trabajo me ha ayudado a estructurar las distintas etapas y partes en las que se debe estructurar un proyecto de investigación.

BIBLIOGRAFIA

- [1] The World Bank, “World Bank Data”, Última consulta: 24/05/2023. [Enlace](#).
- [2] UNEF, “Informe Anual de la UNEF 2019”, Última consulta: 24/05/2023. [Enlace](#).
- [3] Antonio Barrero F, “España ha instalado en 2022 más potencia solar fotovoltaica que nunca antes en un año”, Revista Energías Renovables, 2022, Última consulta: 24/05/2023. [Enlace](#).
- [4] Euronews, “La UE va camino de superar el objetivo en renovables para 2030”, 2023, Última consulta: 24/05/2023. [Enlace](#).
- [5] Real Academia Española, “Concepto de Renovable”, Última consulta: 31/05/2023. [Enlace](#).
- [6] Asociación de Empresas de Energías Renovables, “Renovables, tipos y ventajas”, Última consulta: 31/05/2023. [Enlace](#).
- [7] Naciones Unidas, “¿Qué son las energías renovables?”, Última consulta: 31/05/2023. [Enlace](#).
- [8] International Renewable Energy Agency, “Renewable capacity highlights”, 2022.
- [9] Natanael Bolson, Pedro Prieto, “Capacity factors for electrical power generation from renewable and nonrenewable sources”, 2022.
- [10] International Renewable Energy Agency, “Renewable Power Generation Costs in 2021”, 2022.
- [11] Carlos Toledo, Alessandra Scognamiglio, “Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)”, 2021.
- [12] Shiva Gorjian, Farid Jamshidian, “Technological advancements and research prospects of innovative concentrating agrivoltaics”, 2023.
- [13] AreaTecnologia, “Efecto fotoeléctrico y fotovoltaico. Explicación y Aplicaciones”, Última consulta: 30/05/2023. [Enlace](#).
- [14] Baltasar Hortet, “El Surgimiento de la Energía Solar”, Greening-e, Última consulta: 30/05/2023. [Enlace](#).
- [15] Wikipedia, “Anexo: Cronología del desarrollo de las células solares”, Última consulta: 30/05/2023. [Enlace](#).
- [16] Plataforma Tecnológica Española Fotovoltaica, “Pervoskita, células solares de bajo coste”, 2016, Última consulta: 30/05/2023. [Enlace](#).
- [17] Max Trommsdorff, Ipsa Sweta, “Agrivoltaics: solar power generation and food production”, 2022.

- [18] Fraunhofer ISE, “Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition”, 2022.
- [19] Página Web, “Top 5 differences between traditional farming and modern farming, Impact & Types”, Última consulta: 10/07/2023. [Enlace](#).
- [20] Aida Guardado, “¿Qué es la Agricultura Intensiva?”, 2021, Última consulta: 10/07/2023. [Enlace](#).
- [21] Kim Etingoff, “Sustainable Agriculture and Food Supply”, 2016, [Enlace](#).
- [22] Página Web, “Agricultura regenerativa: un paso más sostenible”, Última consulta: 10/07/2023. [Enlace](#).
- [23] Patricio Cuasapaz, “Agricultura regenerativa”, 2023, Última consulta: 10/07/2023. [Enlace](#).
- [24] Luca La Notte, Lorena Giordano, “Hybrid and organic photovoltaics for greenhouse applications”, 2020.
- [25] Eduardo F. Fernández, Antonio Villar-Fernández, Jesús Montes-Romero, Laura Ruiz-Torres, Pedro M. Rodrigo, Antonio J. Manzaneda, Florencia Almonacid, “Global energy assessment of the potential of photovoltaics for greenhouse farming”, 2022.
- [26] Página Web, “Fotomorfogénesis”, Wikipedia, Última consulta: 12/07/2023. [Enlace](#).
- [27] Mohammad Abdullah Al Mamun, Paul Dargusch, “A review of research on agrivoltaic systems”, 2022.
- [28] Axel Weselek, Andrea Ehmann, “Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review”, 2019.
- [29] B.I. Chen, H.K. Yang, “Effect of shading on yield, fiber quality and physiological characteristics of cotton subtending leaves on different fruiting positions”, 2017.
- [30] K. Ezzaeri, H. Fatnassi, “The effect of photovoltaic panels on the microclimate and on the tomato production under photovoltaic canarian greenhouses”, 2018.
- [31] Shiva Gorjian, Erion Bousi, “Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology”, 2022.
- [32] Eduardo F. Fernández, “Seminario: Agrivoltaic technology: Potential and challenges”, Universidad de Jaén, 2023.
- [33] Shiva Gorjian, Francesco Calise, “A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses”, 2021.
- [34] PVEducation, “Propiedades de la luz del sol”, Última consulta: 06/06/2023, [Enlace](#).
- [35] Página Web, “El Dopado de Semiconductores”. Última consulta: 19/06/2023, [Enlace](#).
- [36] Esteban Sanchis, “Detección de luz e imágenes”, Universidad de Valencia, 2008. [Enlace](#).

- [37] Eduardo Fernández Fernández, “Material de Clase, Materia 3: Conversión Fotovoltaica”, Universidad de Jaén, 2022.
- [38] Francisco M. Gómez Campos, “Dispositivos para Energías Renovables: Tema 2- Células Solares”, Universidad de Granada, 2022.
- [39] Carlos A. Nova, Rubén S. Jovaní, “Fabricación de paneles solares”, Universidad Jaume I. [Enlace](#).
- [40] Catálogo DS New Energy, “Célula Solar de Silicio Tipo P: Monocrystalina Bifacial de 166mm”, Última consulta: 19/06/2023, [Enlace](#).
- [41] Miriam Vilaragut, Guillermo Duyos, Miguel Castro, “Modelación del funcionamiento de un parque fotovoltaico de 1MW, conectado a la red eléctrica”, 2015.
- [42] Aitor Barrenetxea Pascual, “TFM: Detección de diferentes tipos de defectos en módulos fotovoltaicos instalados en campo”, 2016. [Enlace](#).
- [43] Xinmiao Meng, Daobo Zhang, “Review on mechanical behaviour of solar cells for building integrated photovoltaics”, 2021. [Enlace](#).
- [44] Página Web, “What is a Bend Test?”, Test Resources, Última consulta: 21/06/2023, [Enlace](#).
- [45] Página Web, “Ensayo de Tracción”, Área Tecnología, Última consulta: 21/06/2023, [Enlace](#).
- [46] Página Web, “Qué es un Módulo Fotovoltaico”, Última consulta: 21/06/2023, [Enlace](#).
- [47] Kangmin Lee, Han-Don Um, “The Development of Transparent Photovoltaics”, Cell Reports Physical Science, 2020.
- [48] Nuria Martín Chivelet, “Asignatura 6: Aplicaciones Fotovoltaicas, Tema 2: Integración de fotovoltaica en edificios”, Universidad de Jaén, 2023.
- [49] Benedikt Bläsi, Thomas Kroyer, “The MorphoColor Concept for Colored Photovoltaic Modules”, 2021. [Enlace](#).
- [50] Dr. Jan Amaru Palomino Töfflinger, “Seminario: Caracterización de diferentes tecnologías fotovoltaicas bajo condiciones de ensayo particulares”, Universidad de Jaén, 2023.
- [51] Abdelaziz Farouk, “Economic Evaluation of Renewable Energy Systems, CaseStudy: an Eco-House Powered by Nano-Crystal PV in NewAswan, Egypt”, 2019.
- [52] Elizabeth A. Gibson, “Solar Energy Capture Materials”, 2019. [Enlace](#).
- [53] Askari Mohammad Baguer, “Types of Solar Cells and Application”, 2015. [Enlace](#).
- [54] Elmehdi Mouhib, Leonardo Micheli, Florencia M. Almonacid, Eduardo F. Fernández, “Overview of the Fundamentals and Applications of Bifacial Photovoltaic Technology: Agrivoltaics and Aquavoltaics”, 2022. [Enlace](#).

- [55] Dricus De Rooij, “Aluminum Back Surface Field Solar Cells”, Última consulta: 27/06/2023, [Enlace](#).
- [56] Página Web, “¿Qué son las células PERC de los paneles solares?”, Última consulta: 27/06/2023. [Enlace](#).
- [57] Keng Siew Chan, “What is a PERT solar cell?”, 2019. [Enlace](#).
- [58] Keng Siew Chan, “What is a TOPCON solar cell?”, 2019. [Enlace](#).
- [59] Página Web, “Células Solares IBC: definición, beneficios frente a tecnologías similares”, Solar Magazine, 2022, Última consulta: 28/06/2023. [Enlace](#).
- [60] Página Web, “Heterojunction solar cell”, Wikipedia, Última consulta: 28/06/2023. [Enlace](#).
- [61] Página Web, “What is thin-film solar panels?”, SRNE, Última consulta: 28/06/2023. [Enlace](#).
- [62] Página Web, “Thin-film solar cell”, Wikipedia, Última consulta: 28/06/2023. [Enlace](#).
- [63] Taesoo D. Lee, Abasifreke U. Ebong, “A review of thin film solar cell technologies and challenges”, 2017.
- [64] Página Web, “Paneles solares de película delgada: una guía detallada”, Última consulta: 28/06/2023. [Enlace](#).
- [65] Página Web, “¿Qué son los paneles solares de película delgada?”, Última consulta: 28/06/2023. [Enlace](#).
- [66] Juanling Xiao, Hanlin Fang, “Paths to light trapping in thin film GaAs solar cells”, 2018.
- [67] Miguel Albaladejo-Siguan, “Stability of Quantum Dot Solar Cells: A Matter of (Life)Time”, 2021. [Enlace](#).
- [68] Santhosh Sivaraj, “A Comprehensive Review on Current Performance, Challenges and Progress in Thin-Film Solar Cells”, 2022. [Enlace](#).
- [69] Ilke Celik, Zhaoning Song, “Life Cycle Assessment (LCA) of perovskite PV cells projected from lab to lab”, 2016.
- [70] H. I. Ikeri, A. I. Onyia, Asogwa P.U, “Investigation Of Optical Characteristics Of Semiconductor Quantum Dots For Multi Junction Solar Cells Applications”, 2019. [Enlace](#).
- [71] Hector Cotal, Chris Fetzer, “III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics”, 2008.
- [72] Eduardo F. Fernández, Florencia Almonacid, Pedro M. Rodrigo, Pedro J. Pérez-Higueras, “CPV Systems”, 2018.
- [73] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart”, 2023. [Enlace](#).

- [74] Reda Hassanien, "Influences of greenhouse-integrated semi-transparent photovoltaics on microclimate and lettuce growth", 2017.
- [75] Reda Hassanien, "The integration of semi-transparent photovoltaics on greenhouse roof for energy and plant production", 2018.
- [76] José Ramón Aira, Sara Gallardo Saavedra, "Analysis of the Viability of a Photovoltaic Greenhouse with Semi-Transparent Amorphous Silicon (a-Si) Glass", 2021.
- [77] Elinor P. Thompson, "Tinted Semi-Transparent Solar Panels Allow Concurrent Production of Crops and Electricity on the Same Cropland", 2020.
- [78] Yepin Zhao, "A review on semitransparent solar cells for agricultural application", 2021.
- [79] C. Zisis, "Organic Photovoltaics on Greenhouse Rooftops: Effects on Plant Growth", 2019.
- [80] N. Roslan, "Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC): Effects on Light Quality, Microclimate, and Growth of *Orthoisthmus stamineus* in Tropical Climatic Condition", 2021.
- [81] N. Roslan, L. Lu, "Thermal analysis of a portable DSSC mini greenhouse for botanical drugs cultivation", 2020.
- [82] J.J. Kim, M. Kang, "Fabrication and Characterization of Dye- Sensitized Solar Cells for Greenhouse Application", 2014.
- [83] W. S. Subhani, K. Wang, "Anti-solvent engineering for efficient semitransparent CH₃NH₃PBBr₃ perovskite solar cells for greenhouse applications", 2019.
- [84] M. E. Loik, S. A. Carter, "Wavelength-Selective Solar Photovoltaic Systems: Powering Greenhouses for Plant Growth at the Food-Energy-Water Nexus", 2017.