

Proyecto Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS

Autor: Adela Pozo Herrera

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

José Manuel Salmerón Lissen

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS

Autor:

Adela Pozo Herrera

Tutores:

Francisco Javier Pino Lucena
Profesor Titular de Universidad
José Manuel Salmerón Lissen
Profesor Titular de Universidad

Grupo de Termotecnia. Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Carrera: ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS

Autor: Adela Pozo Herrera

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena
José Manuel Salmerón Lissen

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo incondicional durante todos estos años y por todo el amor que me han demostrado siempre. Todo lo que he conseguido es gracias a ellos.

A mi hermana y mi familia por estar siempre apoyándome y animándome.

A mis amigas, por todos los buenos y malos momentos vividos juntas en estos años.

A mi tutor, por permitirme realizar este proyecto y haber posibilitado que lo adaptase a esta nueva normalidad.

El objetivo de este proyecto es realizar un estado del arte relativo a los sistemas fotovoltaicos híbridos. Para ello se divide el trabajo en cinco bloques.

En primer lugar, se comienza con una introducción a las tres transformaciones energéticas que se han sucedido a lo largo de la historia humana. La tercera, de los combustibles fósiles tradicionales a las nuevas energías no fósiles se está produciendo en la actualidad. Para entender este fenómeno se analizan las emisiones de dióxido en la actualidad y la generación de energía producida en la actualidad a través de las energías renovables.

En el segundo capítulo se realiza una introducción literaria a los estudios basados en los sistemas fotovoltaicos híbridos. Este repaso de la literatura abarca desde los primeros estudios hasta los análisis más recientes.

Posteriormente, se presenta la tecnología fotovoltaica híbrida. Se propone una clasificación de las PVT, la cual, se utilizará en el resto del documento para presentar el estado del arte de los sistemas fotovoltaicos híbridos.

El siguiente apartado se enfoca en el estado del arte, se presentarán los últimos avances respecto a materiales, rendimientos y aplicaciones. Para realizar este análisis se utilizará la clasificación descrita en el apartado anterior, haciendo distinción entre sistemas fotovoltaicos híbridos concentrados y no concentrados.

El quinto apartado, recoge los sistemas fotovoltaicos híbridos comercializados, sus características y porque compañías son comercializados.

El trabajo termina con una conclusión sobre todo lo desglosado en el presente documento.

Abstract

The objective of this project is to provide a review of photovoltaic thermal systems. To achieve this, the work is divided into five blocks. To begin, there will be an introduction of the three energy transformations that have taken place throughout human history. The third, from traditional fossil fuels to new non-fossil energies, is currently being produced. To understand this phenomenon, the current emissions of dioxide and the generation of energy produced today through renewable energies are analyzed.

The second chapter provides a literary introduction to studies based on hybrid photovoltaic systems. This literature review ranges from the earliest studies to the most recent analyses.

Subsequently, photovoltaic thermal technology is presented. A classification of PVTs is proposed, which will be used in the rest of the document to present the state of the art of hybrid photovoltaic systems.

The next section focuses on the latest review, the latest advancements in material, performance and application will be presented. To carry out this analysis, the classification described in the previous section will be used, distinguishing between concentrated and non-concentrated photovoltaic thermal systems.

The fifth section includes the commercialized photovoltaic thermal systems, their characteristics and why companies are commercialized.

The work ends with a conclusion on everything detailed in this document.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxi
1 Contexto de la transformación energética	1
1.1. <i>Antecedentes: transformaciones energéticas</i>	1
1.2. <i>Emisiones de dióxido de carbono</i>	2
1.3. <i>La generación actual de energía proveniente de energías renovables</i>	4
2 Introducción y desarrollo histórico de la tecnología fotovoltaica híbrida	7
2.1. <i>Antecedentes</i>	8
2.2. <i>Avances más recientes</i>	9
3 La tecnología fotovoltaica híbrida	11
3.1. <i>Clasificación de los sistemas fotovoltaicos híbridos</i>	13
3.3. <i>Sistemas PVT no concentrados</i>	15
3.3.1. <i>Sistemas PVT de tipo agua</i>	15
3.3.2. <i>Sistemas PVT de tipo aire</i>	16
3.2. <i>Sistemas PVT concentrados (CPVT)</i>	17
4 Estado del arte, últimos avances.	18
4.1. <i>Sistemas PVT no concentrados</i>	18
4.1.1 <i>Sistemas PVT con base de agua</i>	20
4.1.2 <i>Sistemas PVT basados en aire</i>	25
4.1.3 <i>Sistema PV / T con material de cambio de fase (PCM)</i>	30
4.1.4 <i>PV / T con nanofluido</i>	33
4.1.5 <i>Sistema PVT enfriado por caloducto</i>	37
4.2. <i>Sistemas PVT concentrados</i>	40
4.3. <i>Aplicaciones</i>	45
5 PVT comercializados	49
6 Conclusiones	51
Bibliografía	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de la eficiencia global y eléctrica del módulo PVT desarrollado por Aste et al	21
Tabla 2. Resumen de los tres módulos PVT considerados en el estudio de Bombarde et al.	22
Tabla 3. Resultados de los promedios diarios de los rendimientos eléctricos, térmicos y globales	26
Tabla 4. Resultados experimentales del PVT diseñado por Teo et al.	29
Tabla 5. Publicaciones de estudios de PVT con PCM	32
Tabla 6. Incremento porcentual máximo de la eficiencia energética térmica, eléctrica y general de los sistemas PVT, utilizando nanofluidos como refrigerante	35
Tabla 7. Resumen de los resultados respecto a la eficiencia de los sistemas PVT concentrados	44
Tabla 8. Sistemas PVT comercializados	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Niveles globales de CO ₂	2
Figura 2. Emisiones de CO ₂ relacionadas con la energía, 1990-2019	3
Figura 3. Cambio en las misiones de CO ₂ relacionadas con la energía entre 2018-2019	3
Figura 4. Tasa de crecimiento de la demanda de electricidad y generación de energías renovables, 2010-19.	4
Figura 5. Crecimiento anual de la generación de electricidad renovable por región y tecnología, 2019.	6
Figura 6. Evolución de la generación de energía renovable en el sistema eléctrico nacional (GWh).	6
Figura 7. Crecimiento anual de la generación de electricidad renovable por región y tecnología, 2019.	7
Figura 8. Concepto de un sistema PVT	11
Figura 9. Representación que muestra la temperatura de (a) una placa PVT y (b) una placa PV	11
Figura 10. Esquema de un sistema PVT	12
Figura 11. Clasificación de los sistemas PVT	13
Figura 12. Clasificación de los sistemas PVT	14
Figura 13. Esquema de una placa plana PVT de tipo agua	15
Figura 14. Esquema de diferentes tipos de sistemas de aire PVT	16
Figura 15. Esquema de una placa CPVT	17
Figura 16. Capas de un módulo PVT de placa plana	18
Figura 17. Módulo PVT comercial	19
Figura 18. Módulo PVT sin vidriar con factor de cobertura del 65%	19
Figura 19. Módulo PVT vidriado con factor de cobertura del 100%	19
Figura 20. Vista del colector PVT desarrollado por Aste et al	20
Figura 21. Configuración de placa absorbente y colector PVT	21
Figura 22. La parte delantera y trasera del panel fotovoltaico con el sistema de aspersión de agua específico	23
Figura 23. Esquema de intercambiador de calor de canal convergente	24
Figura 24. Construcción del elemento de enfriamiento, lámina de cobre con arcilla.	24
Figura 25. Diseño de colector de agua PVT con absorbedor de flujo en espiral.	25

Figura 26. Vista esquemática en sección transversal de: módulo fotovoltaico (PV-I), colector de aire solar básico PVT (PV / T-II), colector de aire solar PVT vidriado (PV / T-III) y solar de doble paso vidriado colector de aire PVT (PV / T-IV)	26
Figura 27. Histograma comparativo de la media diaria de eficiencias energéticas eléctricas, térmicas y generales para cuartas configuraciones	27
Figura 28. Sección vertical de la instalación de secado de forrajes en Savoy	27
Figura 29. Diagrama esquemático de las dimensiones de la aleta	28
Figura 30. Módulo fotovoltaico con intercambiador de calor de panel	28
Figura 31. Boceto de la matriz	29
Figura 32. Fotografía de la instalación experimental del colector de aire PVT estudiado en la Universidad Shahid Bahonar de Kerman	29
Figura 33. Clasificación de los materiales de cambio de fase	30
Figura 34. Esquema del sistema PVT con nanofluido como (a) refrigerante, (b) filtro espectral, (c) refrigerante y filtro espectral con canal de doble paso y (d) refrigerante y filtro espectral con canales separados	33
Figura 35. Diagrama esquemático de la configuración experimental desarrollado por Waeli et al.	36
Figura 36. PVT enfriado por caloducto	37
Figura 37. Esquemática PVT enfriado por caloducto	38
Figura 38. Caleoducto acoplado a una placa PVT	39
Figura 39. Fotografía del prototipo del sistema CPVT de Karathanassis et al.	40
Figura 40. Sistema PVT de cilindro parabólico investigado por Calise y Vanoli	40
Figura 41. Sistema PVT de canal parabólico investigado por Yazdarifard et al.	41
Figura 42. Sistema BFI-ACPPV	41
Figura 43. Colector PVT de plato parabólico investigado por Buonomano et al.	42
Figura 44. Sistema PVT de lente Fresnel	43
Figura 45. Principales aplicaciones utilizadas en un sistema PVT	45
Figura 46. Sistema de agua caliente sanitaria PVT	46
Figura 47. Sistema PVT de refrigeración / calefacción de espacio	46
Figura 48. Esquema de un secador de invernadero con un sistema PVT de aire	47
Figura 49. Esquema de un sistema de desalación PVT	48

Notación

IEA	Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency)
Twh	Teravatio-hora
CO ₂	Dióxido de carbono
PPM	Partes por millón
PV	Fotovoltaico
PVT	Fotovoltaico híbrido
CPVT	Paneles híbridos de concentración
IPVTS	Paneles integrados no vidriados
DSHP	Calentamiento de agua con bomba de calor
BIPVT	PVT integrado en la edificación
FPC	Colector de placa plana
PTC	Colector cilíndrico parabólico
PDC	Colector de disco parabólico
CPC	Concentrador parabólico compuesto
LFR	Reflector lineal de Fresnel
BFI-ACPPV	Concentrador fotovoltaico parabólico compuesto asimétrico integrado de fachada de edificio
a-Si	Silicio amorfo
C-Si	Silicio cristalino
mC-Si	Silicio multicristalino
Si	Silicio
Ge	Germanio
TiO ₂	Dióxido de titanio
SiO ₂	Dióxido de Silicio
SiC	Carburo de silicio
Cu	Cobre
GaAs	Aserniuro de galio
PCM	Materiales de Cambio de Fase (Phase Change Materials)
EE.UU.	Estados Unidos (United States)
GEI	Gases de efecto invernadero
ASME	Asociación americana de ingenieros mecánicos (American Society of Mechanical Engineers)
N/A	No Disponible (Not Available)
M	Rendimiento
KJ	Kilojulios
W	Vatios
S	Segundos
Mm	Milímetros

Kg	Kilogramos
M	Metros
m ²	Metros cuadrados
Nm	Nanómetro
Mt	Mega toneladas
Gt	Giga toneladas
T	Temperatura
K	Kelvin
°C	Grados Celsius
%	Porcentaje
/	Separación
,	Coma
.	Punto

1 CONTEXTO DE LA TRANSFORMACIÓN ENERGÉTICA

La energía es fundamental en la sociedad moderna. Es un pilar clave para el bienestar humano, el desarrollo económico y el alivio de la pobreza. Es imprescindible porque es la vía para cubrir las necesidades humanas, cosas tan básicas como la alimentación, higiene o transporte. Por ello, hay una fuerte dependencia de las naciones en los combustibles fósiles, que de donde, tradicionalmente se ha obtenido la energía. Pero estos comienzan a agotarse debido al consumo excesivo. Además, los recursos energéticos convencionales tienen un impacto indeseable en el medio ambiente, siendo estos la raíz de la contaminación ambiental y los problemas de calentamiento global. Todo esto, ha provocado que se cree un gran interés por el uso de recursos energéticos no contaminantes, no agotables y dependientes del sitio, como la energía solar.

Se analizará a continuación cual es la situación actual de la energía, cuáles son los recursos renovables que hay a nuestro alcance para obtener energía y, por último, se profundizará en la energía solar.

1.1. Antecedentes: transformaciones energéticas

En la historia ha habido dos grandes transformaciones en el desarrollo energético: la transformación de la madera al carbón y luego al petróleo y el gas. Y el futuro verá la tercera gran transformación del petróleo y el gas a las nuevas energías.

Desde que los humanos primitivos comenzaron a usar el fuego, la energía se ha convertido en un recurso esencial para la supervivencia humana. La madera de fácil acceso satisfacía la calefacción, la cocina y otras necesidades básicas para la supervivencia de los humanos primitivos. Con los avances tecnológicos en la minería del carbón, el uso del carbón empezó a difundirse, este tenía una mayor densidad energética. En 1769, Watt inventó la máquina de vapor. En 1875, los franceses construyeron la primera central eléctrica de carbón del mundo. El progreso de la civilización humana aceleró el desarrollo de la industria del carbón, y el carbón representó la mayor parte de la combinación de energía primaria en la década de 1780, superando a la madera por primera vez. Esta fue la primera transformación: de madera a carbón.

En 1886, Daimler inventó el motor de combustión interna, provocando un gran aumento de la demanda de petróleo y gas como recursos energéticos eficientes. Los avances en la teoría geológica y las tecnologías de perforación, terminación y refinación impulsaron la producción de petróleo y gas. En consecuencia, la participación del petróleo y el gas en la combinación de energía primaria creció rápidamente a más del 50% en 1965. Estos recursos energéticos reemplazaron al carbón como la energía más grande del mundo, registrando la segunda transformación: de carbón a petróleo y gas.

Con el aumento sostenido de la demanda económica y social de energía y los requerimientos de una sociedad con bajas emisiones de carbono, la tercera gran transformación de los combustibles fósiles tradicionales a las nuevas energías no fósiles será inevitable. En los últimos años, se ha elevado los problemas ecológicos y ambientales causados por el uso de carbón, petróleo y otros recursos energéticos con alto contenido de carbono. Con la creciente demanda de un entorno ecológico verde, el gas natural y las nuevas energías como recursos de energía limpia ocuparán una mayor participación en la combinación de energía primaria.

1.2. Emisiones de dióxido de carbono

A causa de la acción del hombre, de sus sistemas de producción y de consumo de energía a partir de la Revolución Industrial, la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera crece de forma constante. Y, a mayor concentración de CO₂, más calor se queda atrapado dentro de la atmósfera terrestre. El mayor impulsor de ese calentamiento global es el CO₂ y está unido fundamentalmente a la quema de los combustibles fósiles: el carbón, el petróleo y el gas. Algunas de las consecuencias de este aumento de temperatura son: el deshielo de masas glaciares, la inundación de ciudades costeras, la desertificación de zonas fértiles y la proliferación de huracanes devastadores.

En los últimos 800.000 años, las concentraciones de CO₂ en la atmósfera nunca habían alcanzado las 300 partes por millón. Pero esa cifra se superó por primera vez en 1950 y no ha parado de incrementarse desde entonces.

El siguiente gráfico muestra la evolución de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera desde el año 1000 hasta la actualidad. A partir del año 1950 se observa un crecimiento drástico de la concentración de CO₂.

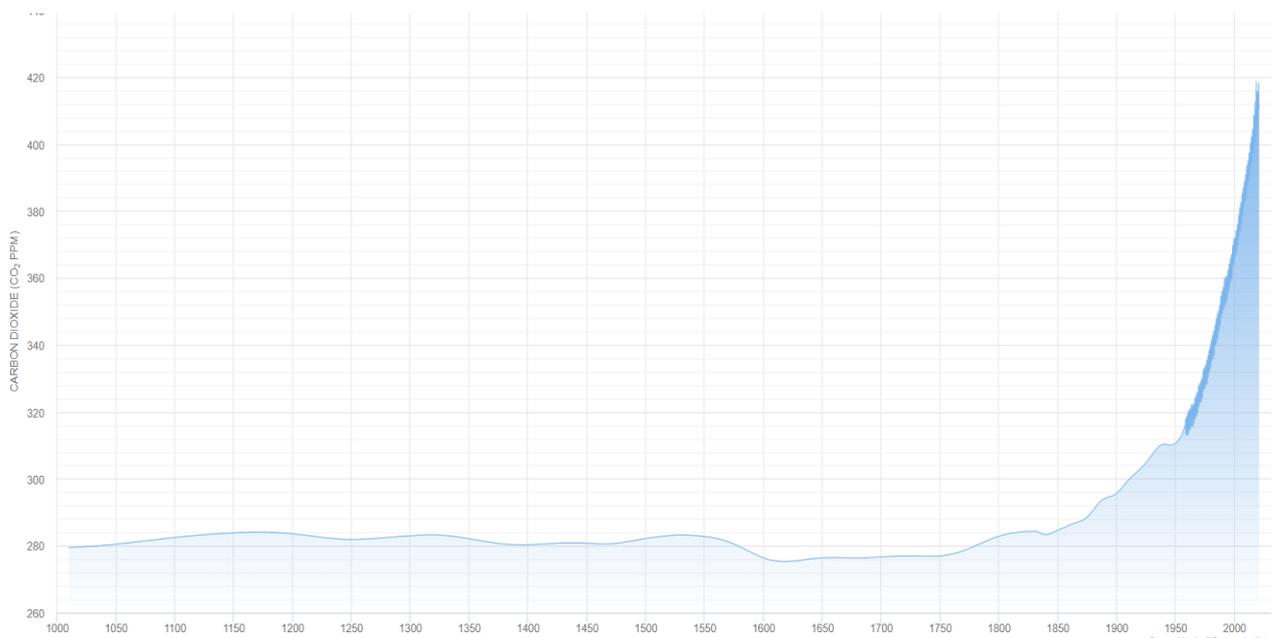


Figura 1. Niveles globales de CO₂.

[Fuente: 2 degrees institute]

En el último año, 2019, las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con la energía se mantuvieron con pocos cambios, 33,2 gigatoneladas (Gt), tras dos años de aumentos. Esta estabilización fue provocada, principalmente, por una fuerte disminución de las emisiones de CO₂ del sector eléctrico en las economías avanzadas. Las emisiones del sector energético cayeron gracias a la expansión papel de las fuentes renovables (principalmente eólica y solar fotovoltaica), el cambio de combustible del carbón al gas natural y una mayor producción de energía nuclear.

Las emisiones globales de CO₂ derivadas del uso del carbón se redujeron en más de 220 millones de toneladas (Mt), o 1,5%, compensando los aumentos en las emisiones de petróleo y gas natural. En las economías avanzadas, las emisiones se redujeron en casi 380 Mt, o 3,2%, siendo el sector eléctrico el máximo responsable de casi el 90% de la caída.

El siguiente gráfico recoge los datos anteriormente planteados.

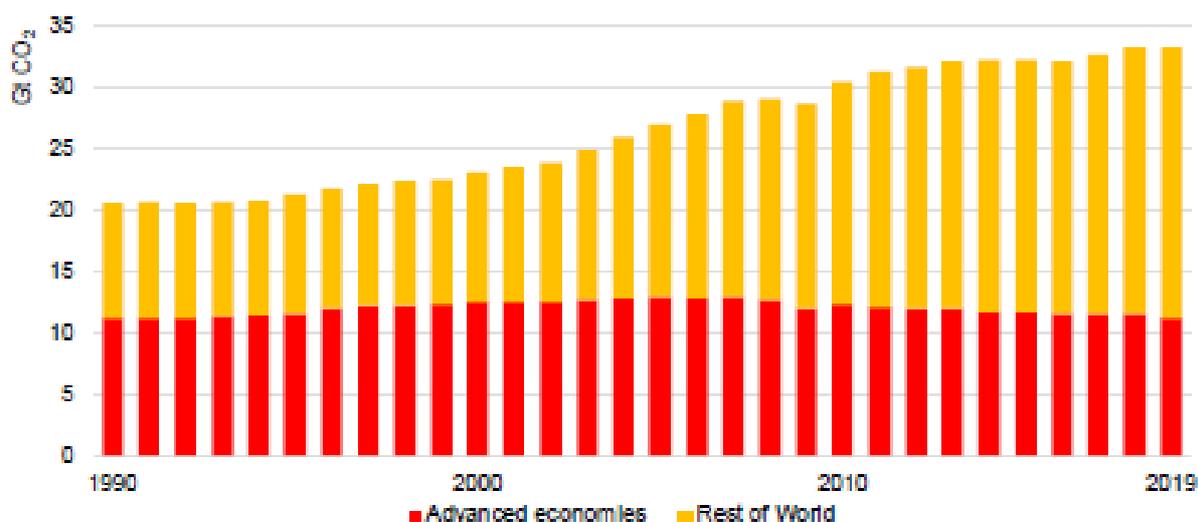


Figura 2. Emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, 1990-2019

[Fuente: IEA 2020]

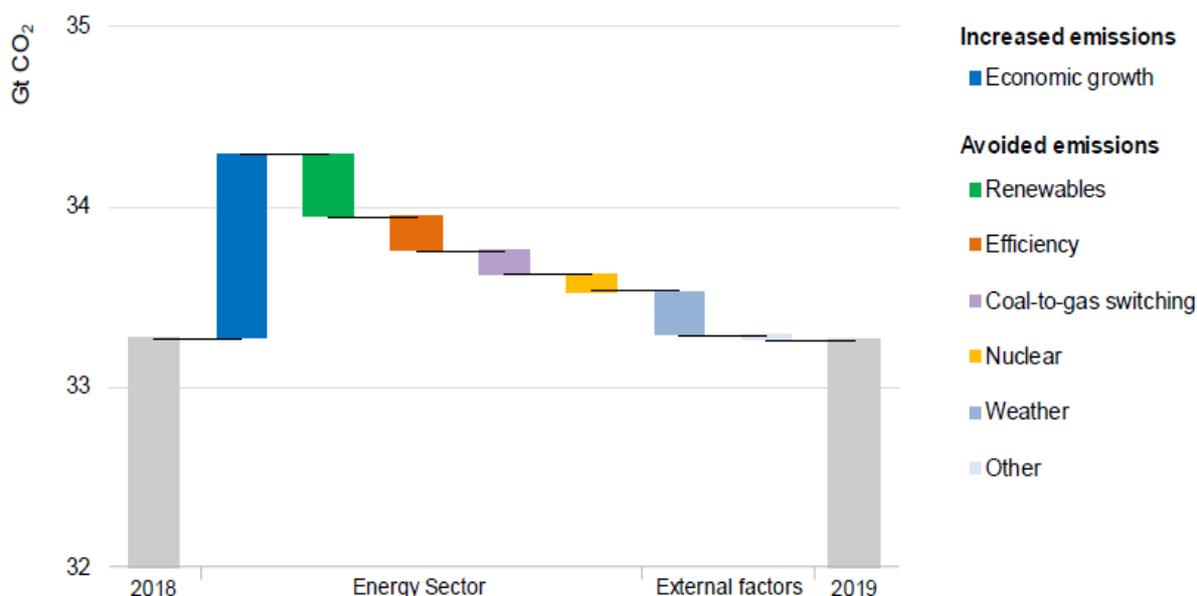


Figura 3. Cambio en las misiones de CO₂ relacionadas con la energía entre 2018-2019

[Fuente: IEA 2020]

El cambio de combustible de carbón a gas se aceleró en 2019, reduciendo las emisiones de carbono en 120 Mt, más de 30 Mt que en 2018. Las reducciones por emisiones del cambio de combustible de carbón a gas se concentraron en la Unión Europea y los Estados Unidos. En estas economías, el gas se ha convertido en una alternativa cada vez más atractiva al carbón para la generación de electricidad debido a la evolución de los precios del gas. El consumo de gas también creció sustancialmente en China, donde las políticas de calidad del aire continúan fomentando la utilización de gas para usos industriales y de calefacción.

La energía nuclear también jugó un papel importante para contrarrestar nuevos aumentos en las emisiones de combustibles fósiles en 2019. Los aumentos en la producción nuclear redujeron el crecimiento potencial de las emisiones en cerca de 100 Mt de CO₂. La mayor parte del aumento de la

producción nuclear se produjo en China, donde muchos reactores puestos en servicio a finales de 2018 completaron su primer año de funcionamiento en 2019. En Japón, los reactores nucleares aumentaron su producción en 2019. Al igual que aumentó la producción nuclear en Corea. La generación de electricidad a partir de la flota nuclear mundial alcanzó un nivel récord de 2800 TWh, satisfaciendo el 10% de la demanda mundial de electricidad con una producción superior a los niveles anteriores a Fukushima.

A medida que las economías se expandieron en 2019, la creciente demanda de servicios energéticos ejerció una presión al alza sobre las emisiones. Pero el impacto combinado del creciente despliegue de energías renovables, las mejoras en la eficiencia energética, el cambio de combustible de carbón a gas y una mayor producción de generadores nucleares fue suficiente para compensar esta presión. La importancia y escala de muchos de estos efectos sugiere que se están produciendo transiciones de energía limpia, lideradas por el sector energético.

Las emisiones del sector energético mundial se redujeron en más de 170 Mt, o un 1,3%, en 2019. Las mayores caídas se produjeron en las economías avanzadas, donde las emisiones de CO₂ se han hundido a los niveles de finales de la década de 1980, cuando la demanda de electricidad era un tercio menor.

1.3. La generación actual de energía proveniente de energías renovables

La humanidad está buscando nuevos métodos para proteger el planeta y luchar contra el cambio climático, creando un entorno más sostenible. Una forma imprescindible para alcanzar este objetivo es el uso de las energías renovables.

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) informa que la generación de energía a través de fuentes renovables ha sido la fuente de más rápido crecimiento recientemente (IEA, 2019). Esto se debe a las políticas de los países desarrollados y la caída de los costos de la tecnología.

En 2019, la generación mundial de electricidad a partir de energías renovables aumentó 440 TWh, el segundo aumento más alto después de 2018. El crecimiento interanual de la generación de energías renovables fue del 6,5%, más rápido que cualquier otro combustible, incluidos el carbón y el gas natural. La participación de las energías renovables en el suministro eléctrico mundial alcanzó el 27% en 2019, el nivel más alto jamás registrado. La energía eólica, la energía solar fotovoltaica y la energía hidroeléctrica en conjunto representaron más del 85% del crecimiento de las energías renovables, acompañado por la bioenergía.

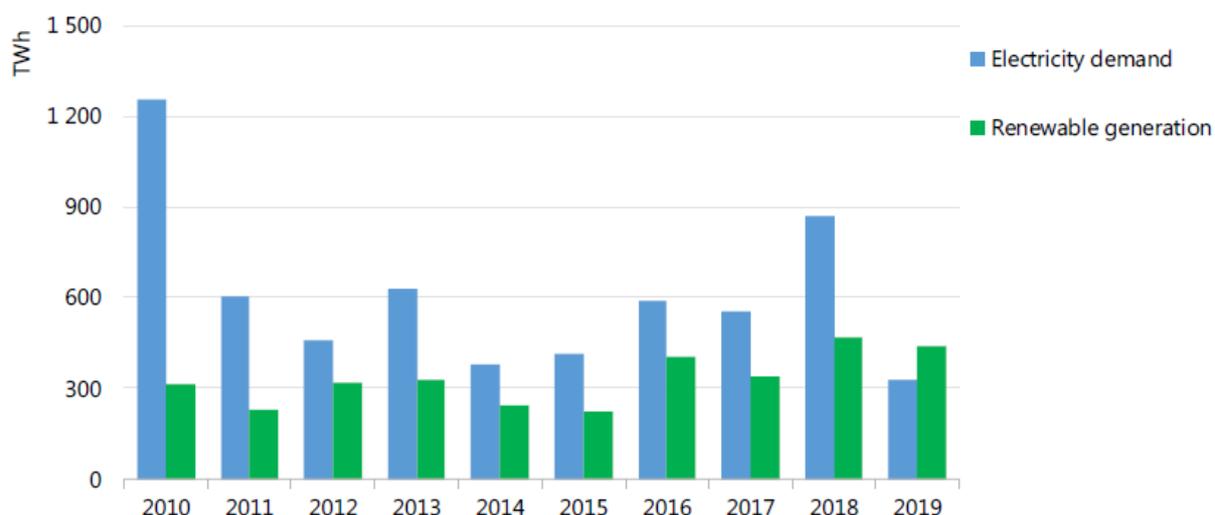


Figura 4. Tasa de crecimiento de la demanda de electricidad y generación de energías renovables, 2010-19.

[Fuente: IEA 2020]

El aumento de la generación de electricidad basada en energías renovables continuó siendo generalizado en 2019, con un crecimiento en todos los rincones del mundo. China una vez más abrió el camino con un aumento de 190 TWh en la generación de electricidad basada en energías renovables en 2019 (más del 40% del total mundial). La Unión Europea y la India registraron aumentos interanuales de 40 TWh y 30 TWh respectivamente. Brasil registró el cuarto aumento más grande en producción renovable, con una mayor generación de energía hidroeléctrica.

La energía eólica aumentó en aproximadamente 150 TWh en términos interanuales, el mayor crecimiento entre las tecnologías renovables, aumentando su participación en el suministro de electricidad del 4,7% al 5,2% en 2019. La Unión Europea, China y los Estados Unidos lideraron el crecimiento de la producción eólica con la combinación de la puesta en marcha de proyectos en alta mar y en tierra, y unas condiciones climáticas favorables.

La generación de electricidad solar fotovoltaica aumentó en aproximadamente 130 TWh a nivel mundial en 2019, solo superada por la eólica en términos absolutos, alcanzando el 2,7% del suministro de electricidad. El crecimiento interanual de la energía solar fotovoltaica del 22% superó con creces el de la energía eólica, aunque este crecimiento fue significativamente menor en comparación con 2018. La energía solar fotovoltaica representa casi el 3% del mix eléctrico mundial.

La energía hidroeléctrica contribuyó con más de 100 TWh al aumento global de 2019 en la generación de energías renovables, elevando su participación en el suministro de electricidad al 16% y sigue siendo la mayor fuente de electricidad renovable. En comparación con el año anterior, 2019 fue un año húmedo, lo que impulsó la producción de energía hidroeléctrica en varios mercados clave. En China, Brasil e India, la energía hidroeléctrica aumentó más en 2019 en términos absolutos que el promedio de diez años debido a la disponibilidad de agua y los nuevos proyectos hidroeléctricos. En contraste, Estados Unidos y la Unión Europea vieron disminuir la producción de energía hidroeléctrica en aproximadamente un 7% cada uno.

La generación de electricidad a partir de bioenergía aumentó un 8%, manteniendo su participación mundial en el suministro de electricidad en aproximadamente un 2,5%. El crecimiento fue impulsado principalmente por nuevos proyectos en China, gracias al objetivo de política del país de 23 GW para 2020. Otro crecimiento se produjo en la Unión Europea, con proyectos de biomasa a gran escala recientemente completados en el Reino Unido, los Países Bajos y Dinamarca.

Además de la actividad en el sector eléctrico, el consumo de energías renovables aumentó en casi un 8% en el transporte en 2019. El crecimiento fue en gran parte el resultado de un aumento del 13% en la producción de etanol en Brasil, un mercado líder de biocombustibles. Las políticas de apoyo a los biocombustibles de producción nacional en China también contribuyeron al crecimiento del consumo de biocombustibles en 2019.

El calor es el mayor uso final de energía antes del transporte y la electricidad, y representa la mitad del consumo de energía final mundial. El uso de energía renovable para generar calor aumentó ligeramente en 2019, y la bioenergía siguió siendo la fuente más grande, seguida de la energía solar térmica y geotérmica. Los usos tradicionales de la biomasa sólida, que tienen una baja eficiencia y tienen como resultado impactos negativos para la salud humana, socioeconómicos y ambientales, todavía constituyen la mayor parte del uso de bioenergía en calefacción. La energía solar térmica se utiliza principalmente en energía solar doméstica pequeña. Los calentadores de agua en el sector residencial continuaron aumentando el año pasado, pero el crecimiento se ha desacelerado debido a la reducción de las actividades de construcción, la saturación del mercado, la competencia con otras tecnologías y la eliminación gradual de incentivos.

El siguiente gráfico recoge, a modo de resumen, los datos expuestos anteriormente sobre el crecimiento anual de generación de electricidad a través de fuentes de energía renovable según las diferentes regiones mundiales y tecnologías en 2019.

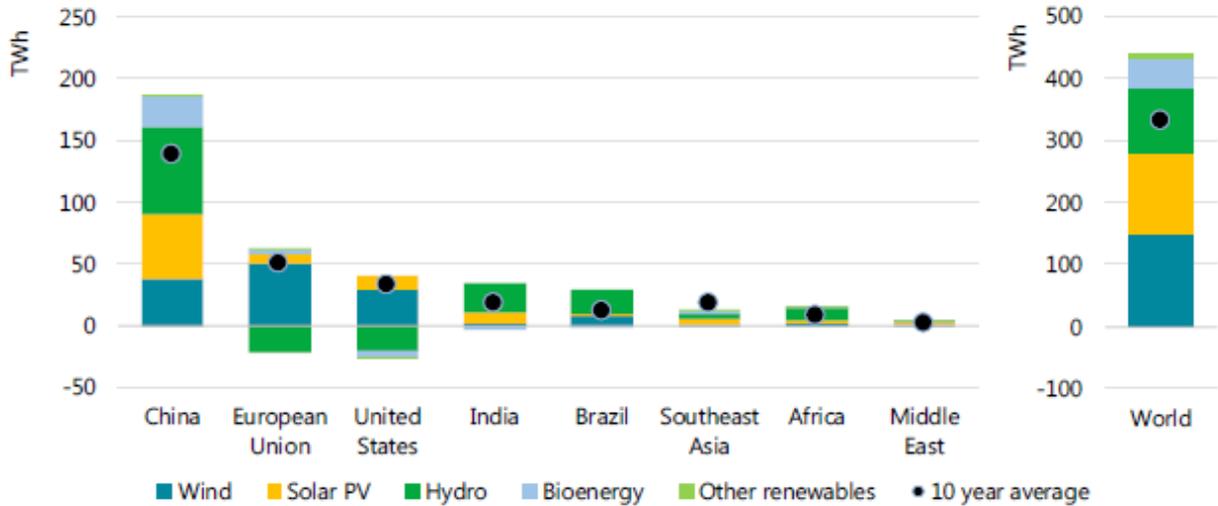
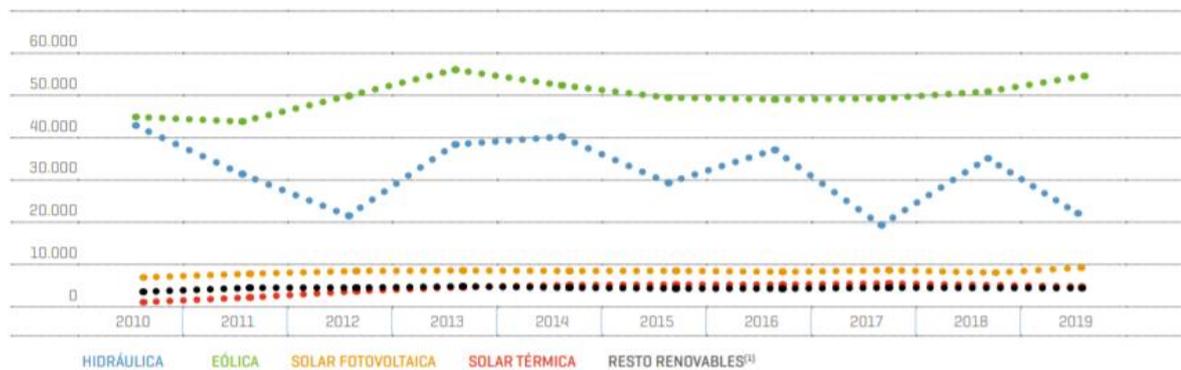


Figura 5. Crecimiento anual de la generación de electricidad renovable por región y tecnología, 2019.

[Fuente: IEA 2020]

A nivel nacional, en 2019, se produjo un ligero descenso en la contribución de las energías renovables a la generación eléctrica nacional, respecto a la participación del año anterior, con un 37,5 % de cuota. El descenso de la generación renovable se debió a la menor producción hidráulica, un 27,6 % inferior a la del año anterior, como consecuencia de un año con menos precipitaciones. Sin embargo, sin tener en cuenta la producción hidráulica, el resto de las tecnologías renovables en el sistema eléctrico ha aumentado en el 2019 un 10,5 %, ya que todas ellas han registrado incrementos respecto al año anterior. En la Figura 6 se muestra la evolución de la generación de energía renovable en el sistema eléctrico nacional (GWh).



[1] Incluye biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeólica y residuos renovables.

Figura 6. Evolución de la generación de energía renovable en el sistema eléctrico nacional (GWh).

[Fuente: REE]

En España la energía eólica supone el 20,8 % de la producción total de generación de energía eléctrica, convirtiéndose en la tecnología renovable más relevante a nivel nacional, ya que, en el 2019, supuso el 55,4 % del conjunto de las renovables. Durante el 2019 las instalaciones solares fotovoltaicas casi han duplicado la potencia instalada y han incrementado su producción un 19 %, alcanzando los 9,24 TWh.

2 INTRODUCCIÓN Y DESARROLLO HISTÓRICO DE LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA HÍBRIDA

En el escenario mundial actual, la energía es uno de los mayores problemas. La energía tiene varias aplicaciones en casi todos los sectores, como industrial, agrícola, médico, transporte, hogar, etc. y puede causar que para 2035, el consumo mundial de energía aumente en más del 30%. La disponibilidad y accesibilidad de la energía son muy importantes para el crecimiento de las personas y el desarrollo de los países. Dado que el mundo entero se enfrentará a la escasez de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural y el petróleo en un futuro próximo, es muy importante trabajar en el desarrollo y las aplicaciones de los recursos energéticos renovables. La energía solar del sol es una de las opciones más eficientes de recursos energéticos renovables; ya que es limpio, está disponible gratuitamente y en abundante cantidad. Las radiaciones solares se pueden convertir en energía térmica, energía eléctrica o en ambas.

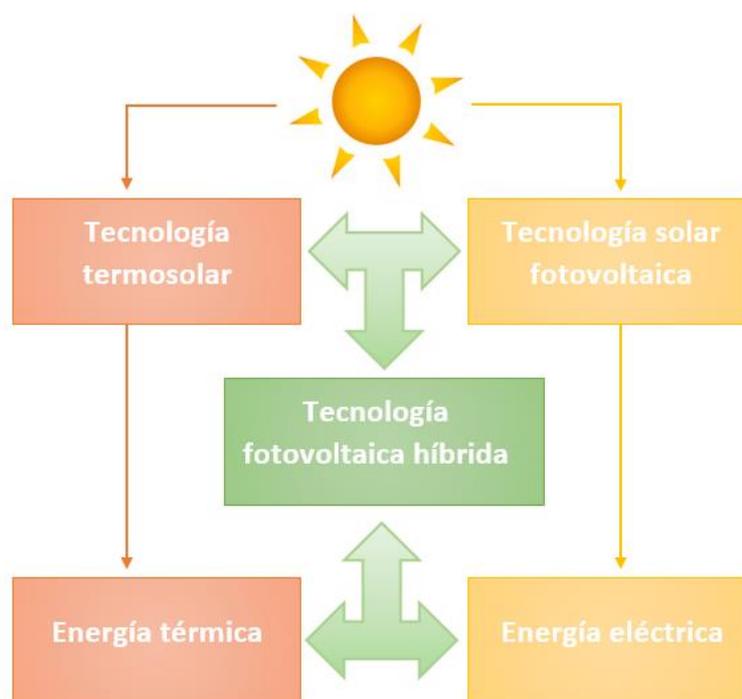


Figura 7. Crecimiento anual de la generación de electricidad renovable por región y tecnología, 2019.

[Fuente: Elaboración propia]

Tradicionalmente, los dispositivos destinados a utilizar la energía solar se dividen en dos clases según el método de conversión: calor o electricidad.

La energía termosolar es la que se produce a partir del aprovechamiento de la energía térmica que produce el calor de los rayos del sol. La luz solar incide en los colectores que convierten la radiación solar en energía térmica a través de fluido (generalmente aire, agua o aceite) que separa su utilización. Los sistemas solares de calentamiento de agua utilizan colectores solares para capturar la luz solar para calentar agua (o un líquido anticongelante) que luego se mueve del colector a un tanque de almacenamiento. Hay dos tipos de sistemas, activos y pasivos. Los sistemas activos utilizan electricidad para bombear el fluido y tienen un depósito o tanque para el almacenamiento de calor y su uso posterior. Los sistemas pasivos dependen de la convección natural y la presión del agua durante la extracción para mover los fluidos y no requieren ningún hardware de circulación.

La fotovoltaica (PV) es la forma de utilizar la energía solar convirtiéndola directamente en electricidad a través de paneles solares fotovoltaicos. Los paneles fotovoltaicos están formados por grupos de células o celdas solares que transforman la luz (fotones) en energía eléctrica (electrones). Las células solares transforman la luz del sol directamente en electricidad por el llamado efecto fotoeléctrico, por el cual determinados materiales son capaces

de absorber fotones (partículas lumínicas) y liberar electrones, generando una corriente eléctrica.

Sin embargo, en la década de 1970 la investigación comenzó a centrarse en combinar el diseño térmico solar y los sistemas fotovoltaicos en un sistema de diseño único, y así surgió una nueva área que incorpora ambos métodos de conversión de energía, que se denomina tecnología fotovoltaica híbrida. La conversión de energía solar en electricidad y calor con un solo dispositivo llamado panel solar híbrido (PVT, siglas en inglés photovoltaic/thermal). De esta forma, con un único dispositivo se produce simultáneamente calor y energía, se cumple con ambas demandas.

La combinación de estos dos sistemas ofrece dos grandes beneficios: un aumento de la eficacia de las células fotovoltaicas, se sabe que las células fotovoltaicas experimentan una caída de eficiencia en respuesta a cualquier aumento de temperatura y, por lo tanto, pueden minimizarse con un sistema solar térmico, y una reducción en la utilización del espacio. Aunque la tecnología híbrida no es tan común como las tecnologías fotovoltaicas y termosolares. Esto se debe, principalmente, a que ambas tecnologías tenían dimensiones y propósitos muy diferentes. Por un lado, la tecnología fotovoltaica tenía elevados costes indirectos de las pequeñas potencias, lo que la hacía poco rentable a pequeña escala y se enfocaba más a grandes instalaciones. En los últimos años ha habido una reducción de los precios, lo que ha provocado que económicamente sea más interesante para el usuario final. Por otro lado, la energía termosolar se utiliza, principalmente, para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria en los edificios, lo que conlleva que las instalaciones sean relativamente más pequeñas.

Los sistemas híbridos para la utilización de energía solar han atraído una atención considerable por parte de científicos e ingenieros durante la últimas dos décadas debido a su mayor eficiencia y estabilidad de rendimiento en comparación con los dispositivos solares individuales. Fruto de la investigaciones y evoluciones realizadas, esta tecnología solar híbrida tiene numerosas tipologías. A continuación, en este documento se describe un análisis de cómo se ha ido sucediendo la investigación de esta tecnología y como se encuentra hoy en día la investigación sobre los sistemas fotovoltaicos-térmicos.

2.1. Antecedentes

El concepto de PVT se documentó a mediados de la década de 1970, cuando Martin Wolf publicó un análisis de rendimiento de sistemas combinados de calefacción y energía fotovoltaica para residencias (1975). Donde se analizaba un colector térmico de placa plana con transferencia de calor a través de un circuito de líquido. El colector contenía una matriz solar de silicio. En esa misma década se reportan otros trabajos teóricos y experimentales sobre estos sistemas, como Florschuetz [1] que proporcionó un análisis teórico de un colector solar PVT mediante el uso de un modelo Hottel-Whillier modificado.

En los años ochenta se continúa investigando sobre este tema, especialmente en la tecnología de placa plana como Hendrie [2] (1980) que desarrolló un modelo teórico para los colectores solares PVT de placa plana. Concluyó que las unidades a base de aire y líquido poseían eficiencias térmicas de 40,4% y 32,9% de eficiencia eléctrica. En 1985, Cox y Raghuraman [3] exploraron numerosas características de diseño de colectores PVT de placa plana. Descubrieron que los tipos de PVT de aire suelen ser menos eficientes que los líquidos debido al bajo factor de empaquetamiento de las células fotovoltaicas, la baja absorción solar, la alta emisión de infrarrojos y el bajo coeficiente de transferencia de calor del amortiguador al aire. Aunque también empieza a investigarse sobre los paneles híbridos de concentración (CPVT), así lo hicieron los autores Mbewe, Card et al. [4] o Hamdy, Luttmann et al. [5].

En los años noventa, se sigue desarrollando la tecnología híbrida gracias al trabajo de investigadores como Huang et al. [6] que estudiaron la configuración de un sistema integrado fotovoltaico-térmico (IPVTS). Los resultados de la prueba mostraron que el colector solar PVT hecho de un panel de policarbonato corrugado puede obtener un ahorro de energía primaria de aproximadamente 61,3%, mientras que la diferencia de temperatura entre el agua del tanque y el módulo fotovoltaico fue de alrededor de 4°C. Poco después, en 1995, Bergene y Lovvik [7] desarrollaron un modelo basado en el análisis de las transferencias de energía (conducción, convección y radiación), iniciado por Duffie y Beckman, y el resultado del modelo reveló que la eficiencia general de los colectores PVT está en el rango del 60 al 80%. Sugirieron que tales sistemas podrían ser útiles como precalentadores para servicios de agua caliente sanitaria. Ese mismo año, Grag y Agarwal [8] desarrollaron un modelo de simulación para examinar el resultado del diseño y los parámetros

operativos de un sistema híbrido de calentamiento de aire PVT. Se descubrió que el sistema de calentamiento de aire PVT dependía en gran medida de las temperaturas de diseño, ya que la cubierta de vidrio adicional podría provocar un aumento de las pérdidas de transmisión y, más allá de algún punto crítico, la cubierta de vidrio simple puede acumular más calor que el vidrio doble. En 1996, Sopian et al. [9] desarrollaron los modelos de estado estacionario para analizar el rendimiento de los colectores de aire PVT de paso simple y de doble paso, concluyeron que el colector solar térmico fotovoltaico de paso doble produce un mejor rendimiento que el módulo de paso único en un rango de caudal másico operativo normal. Y en 1998, D. Vries [10] publicó un estudio en el que comparaba varias tipologías de paneles híbridos, incluyendo una combinación de un panel que utiliza agua y aire.

2.2. Avances más recientes

Pero la tecnología ha crecido en las últimas dos décadas. Huang et al. (2001) [11] han estudiado experimentalmente el sistema solar térmico y fotovoltaico integrado no vidriado (IPVTS) para el calentamiento de agua. Observaron que la eficiencia de ahorro de energía primaria de IPVTS es superior a 0,60, es superior a la de un calentador de agua solar convencional o un sistema fotovoltaico puro.

En ese mismo año, Kalogirou [12] estudió el rendimiento mensual del sistema PVT híbrido no vidriado en modo de funcionamiento forzado para las condiciones climáticas del sur de Chipre y los resultados mostraron un aumento de la eficiencia anual media del sistema solar fotovoltaico del 2,8 al 7,7% con una eficiencia térmica del 49%.

Un año más tarde, en 2002, Tripanagnostopoulos et al. [13] realizaron pruebas en sistemas PVT híbridos utilizando células fotovoltaicas de silicio policristalino (pc-Si) y amorfo (a-Si). Descubrieron que el enfriamiento proporcionado por la integración térmica ayuda a mejorar la eficiencia de las células fotovoltaicas en aproximadamente un 10%. Además, encontraron que el enfriamiento por agua proporcionaba un mejor enfriamiento que la circulación de aire. Finalmente, ellos sugirieron que el rendimiento de estos sistemas podría mejorarse aún más mediante el uso de reflectores o mediante acristalamiento. Sin embargo, acristalar los colectores mejoraría el rendimiento térmico para el detrimento de la eficiencia eléctrica. Sandnes y Rekestad [14] (2002) estudiaron como se comportaba un colector térmico fotovoltaico híbrido (PVT) compuesto por células de silicio monocristalino pegadas a un colector de plástico negro (sistema PVT sin esmaltar). Recomendaron que el concepto PVT se debe utilizar para aplicaciones térmicas de baja temperatura para aumentar la eficiencia eléctrica del sistema fotovoltaico, por ejemplo, calefacción de un edificio. Además, ese mismo año, construyeron una unidad PVT utilizando un colector de calor solar de polímero combinado con una placa solar de silicio monocristalino. Descubrieron que pegar células solares en la superficie absorbente reduciría la energía solar absorbida por el panel, además de un incremento de la resistencia a la transferencia de calor en la superficie del colector.

En 2003, Chow [15] llevó a cabo un análisis de un sistema fotovoltaico híbrido con acristalamiento simple en régimen transitorio. Observó que la temperatura del módulo se redujo y la eficiencia fotovoltaica aumentado en un 2% (relativo) a un caudal másico de 0,01 kg / s para un coeficiente de transferencia de calor de placa a unión de 10 kW/m²K . También se observó una eficiencia térmica adicional del 60%.

Más recientemente se han comparado diferentes tipologías, Tiwari y Sodha [16] (2007) desarrollaron un modelo térmico para un sistema fotovoltaico híbrido integrado (IPVTS) y lo compararon con el modelo de un calentador de agua solar convencional de Huang et al. Las simulaciones mostraron una eficiencia diaria de ahorro de energía primaria de alrededor del 58%, lo que concuerda bien con el valor experimental (61,3%) obtenido por Huang et al. En 2007, Tripanagnostopoulos [37] realizó algunas mejoras más en el sistema existente al introducir un sistema PVT / dual sin esmaltar con enfriamiento por agua y aire. Descubrió que al colocar tubos de agua en la superficie posterior de la placa solar se obtiene una mejor eficiencia térmica.

Un año más tarde, Tonui et al. [17] construyó un sistema fotovoltaico híbrido basado en aire, al cual le aplicó dos enfoques de bajo costo para mejorar la transferencia de calor entre el flujo de aire y la superficie de la placa solar. Se halló que el caudal másico inducido y la eficiencia térmica disminuyen al aumentar la temperatura ambiente y aumentan al aumentar el ángulo de inclinación para un nivel de aislamiento dado.

En 2009, Solanki et al. [18] diseñó y construyó un sistema fotovoltaico híbrido, y estudió su rendimiento sobre diferentes parámetros operativos en condiciones interiores estables. Descubrieron que la eficiencia térmica, eléctrica y general del calentador solar obtenida, bajo condiciones ambientales de interior, era del 42%, 8,4% y 50%, respectivamente. Por su parte, Ji et al. [107] (2009) desarrolló un novedoso sistema de bomba de calor solar PVT (PVT-SAHP) que combinaba un ciclo de refrigeración Rankine con un sistema fotovoltaico híbrido. Los resultados indicaron que la eficiencia eléctrica fotovoltaica y la eficiencia térmica del evaporador son de alrededor del 12% y 50% respectivamente durante el período de prueba en Hefei, China.

En la última década han continuado los avances, Shahsavari y Ameri [108] (2010) diseñaron y probaron un colector de aire PVT de acoplamiento directo con y sin cubierta de vidrio en Kerman, Irán. Concluyeron que colocar una cubierta de vidrio en paneles fotovoltaicos conduce a un aumento en la eficiencia térmica y una disminución en la eficiencia eléctrica del sistema.

En 2013, Touafek et al. [109] han diseñado, desarrollado y modelado los sistemas fotovoltaicos híbridos con el fin de calentar el aire y generar energía. Proporciona un buen efecto térmico y eléctrico en comparación con los colectores clásicos.

Bakar et al. [110] (2014) mejoraron el diseño del sistema fotovoltaico híbrido mediante la integración de un tubo de cobre debajo del tedler del panel fotovoltaico. Proporciona aire caliente y agua, y aumenta la producción eléctrica por unidad en comparación con el panel fotovoltaico normal.

Además, los estudios de algunos autores se centraron en integrar los paneles híbridos en otras instalaciones más complejas, como Fu, Pei et al. [111] (2012) que lo integraron en una bomba de calor o Fong, Chow et al. [112] (2011) con máquinas de refrigeración. También Putrayudha [113] (2015) combina los paneles híbridos con bombas de calor geotérmicas

En los últimos años, varios estudios se han centrado en analizar la utilización de nanofluidos para mejorar los sistemas fotovoltaicos híbridos. Como el análisis matemático llevado a cabo por Yazdanifard et al. [72] En 2017 En el cual se estudian los efectos de los parámetros de los nanofluidos, incluida la fracción de volumen (0-4%), el tamaño (21 nm y 100 nm) y el tipo de nanopartículas (TiO_2 y Al_2O_3), así como el tipo de fluido base (agua y mezcla de etilenglicol-agua). De los resultados se puede concluir que, para mejorar el rendimiento del sistema, la adición de nanopartículas es más eficiente en régimen laminar que en régimen turbulento. Los resultados también indicaron que el uso de nanopartículas de mayor diámetro conduce a una mayor eficiencia energética total y exergía en el régimen turbulento, mientras que se observa un comportamiento contrario en el flujo laminar. Además, se observó que el empleo de óxido de aluminio en nanofluidos mejora el rendimiento del sistema más que el óxido de titanio, donde los nanofluidos a base de agua muestran una mayor eficiencia energética y exergética en comparación con los nanofluidos a base de etilenglicol-agua.

Más recientemente, en 2019, Guarracino et al. [22] probaron un colector PVT comercial que demostró una eficiencia eléctrica de aproximadamente el 11% y una eficiencia térmica del 37% a una temperatura reducida cero. En 2020 se desarrolló una simulación numérica tridimensional de un colector CPC-PVT, lo que indica que se podrían lograr eficiencias energéticas totales de hasta 57,66% [43].

3 LA TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA HÍBRIDA

Un sistema fotovoltaico híbrido es un módulo en el que la celda no solo produce electricidad, sino que también recolecta calor térmico. De esta forma, tanto calor como energía se producen simultáneamente.

Dado que la demanda de calor solar y electricidad solar suele ser complementaria, parece lógico desarrollar un dispositivo que pueda cumplir con ambas demandas.

La Figura 8 muestra de forma simplificada el concepto de un sistema fotovoltaico híbrido.

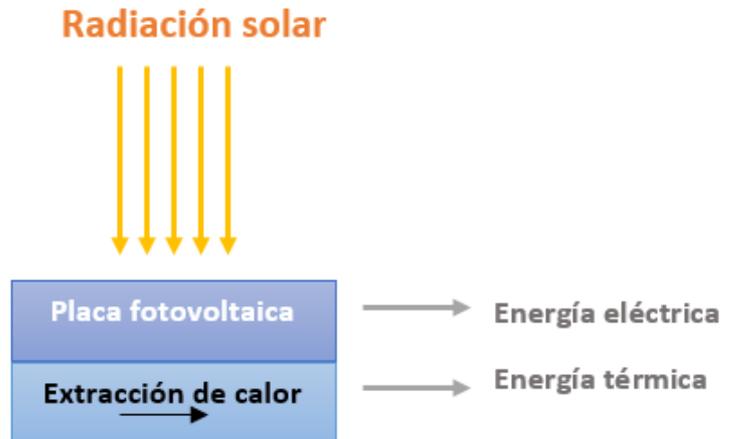


Figura 8. Concepto de un sistema PVT

[Fuente: Elaboración propia]

La instalación de módulos fotovoltaicos utiliza solo del 10% al 15% de la energía solar incidente y reduce la posibilidad de utilizar paneles termosolares en un espacio limitado. Además, los colectores individuales tienen una mayor eficiencia eléctrica y térmica en comparación con los colectores solares híbridos. En cambio, los sistemas fotovoltaicos híbridos son más eficientes que los sistemas convencionales solares térmicos o solares fotovoltaicos por unidad de área, ya que, analizando la energía producida por unidad de superficie, el panel híbrido supera a los dos sistemas por separado. Por lo tanto, permiten un uso más eficaz de la energía solar.

La temperatura de un panel fotovoltaico híbrido es menor en comparación con un módulo fotovoltaico individual colocado al aire libre en condiciones similares como muestra la Figura 9, debido al flujo de un fluido para eliminar el calor en el colector PVT.

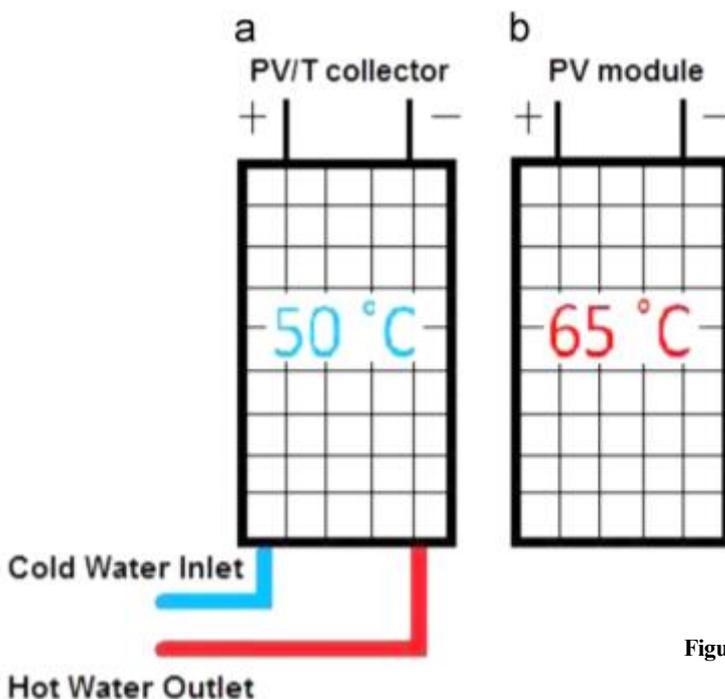


Figura 9. Representación que muestra la temperatura de (a) una placa PVT y (b) una placa PV

[Fuente: Jee Joe Michael et al.]

Un sistema fotovoltaico híbrido está compuesto por unas células fotovoltaicas situadas sobre un sistema para la absorción de calor, formando un único módulo. Posee el cableado habitual de los paneles solares, a lo que se suma una zona por la cual el calor es expulsado y permite calentar el agua. El diseño se complementa con un circuito hidráulico y un depósito termo aislado. La Figura 10 muestra un sistema PVT típico con un intercambiador de calor y un tanque de almacenamiento aislado.

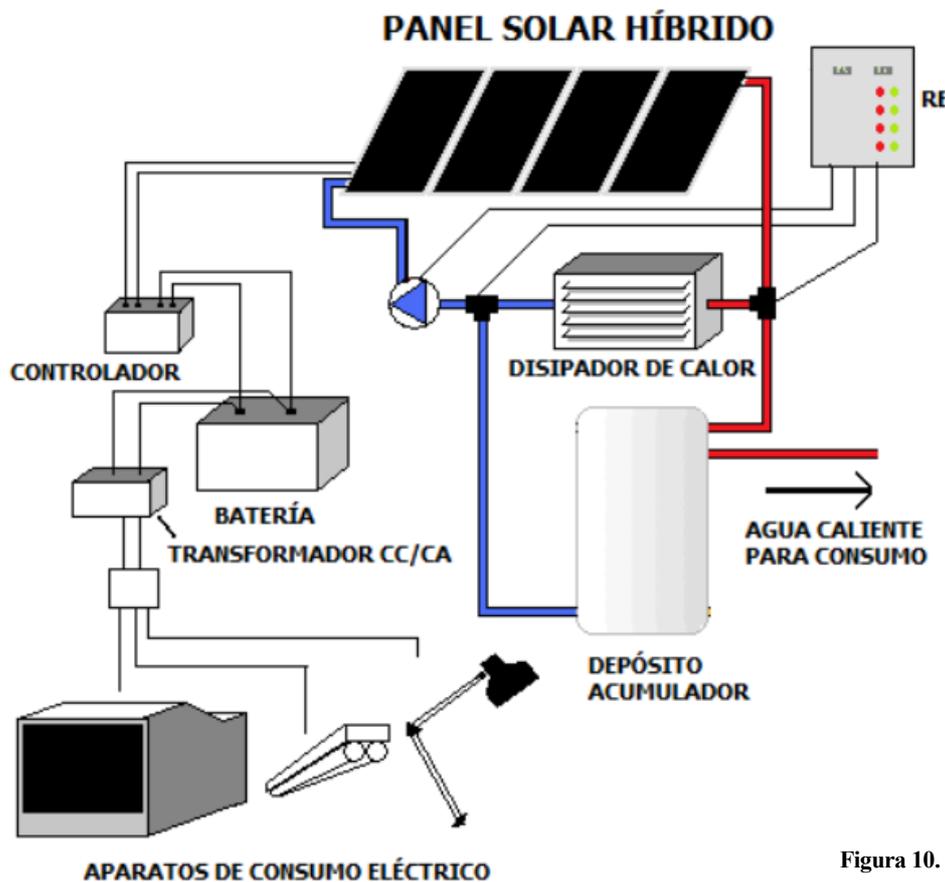


Figura 10. Esquema de un sistema PVT

[Fuente: Quetzal ingeniería]

Hay muchas formas de combinar las diferentes tecnologías termosolar y fotovoltaica en un colector PVT: silicio cristalino o amorfo o fotovoltaica de película fina, colectores de líquido o aire, placas planas o tecnologías de concentración con o sin cubierta transparente, algunas completamente integradas a edificios. Hasta ahora, la mayor parte del desarrollo se ha realizado en tecnologías de silicio con colectores de tipo placa plana de líquido y aire. Además, se ha trabajado en la concentración y colectores PVT combinados líquido / aire y en la construcción de sistemas integrados de precalentamiento. La siguiente sección de este documento se centra en mostrar una clasificación para los sistemas fotovoltaicos híbridos que se han desarrollado hasta la actualidad.

3.1. Clasificación de los sistemas fotovoltaicos híbridos

Los sistemas PVT se pueden clasificar según varios criterios o características. En términos generales, los podemos clasificar sobre la base de la disposición de extracción de calor, el medio de trabajo y las aplicaciones finales. Aunque, también se podrían clasificar basándose en disposiciones de no concentración y concentración de radiaciones.

En la Figura 11 se muestra una amplia clasificación de los sistemas PVT siguiendo la propuesta en los estudios realizados por Sandeep S. Joshi et al. en 2018.

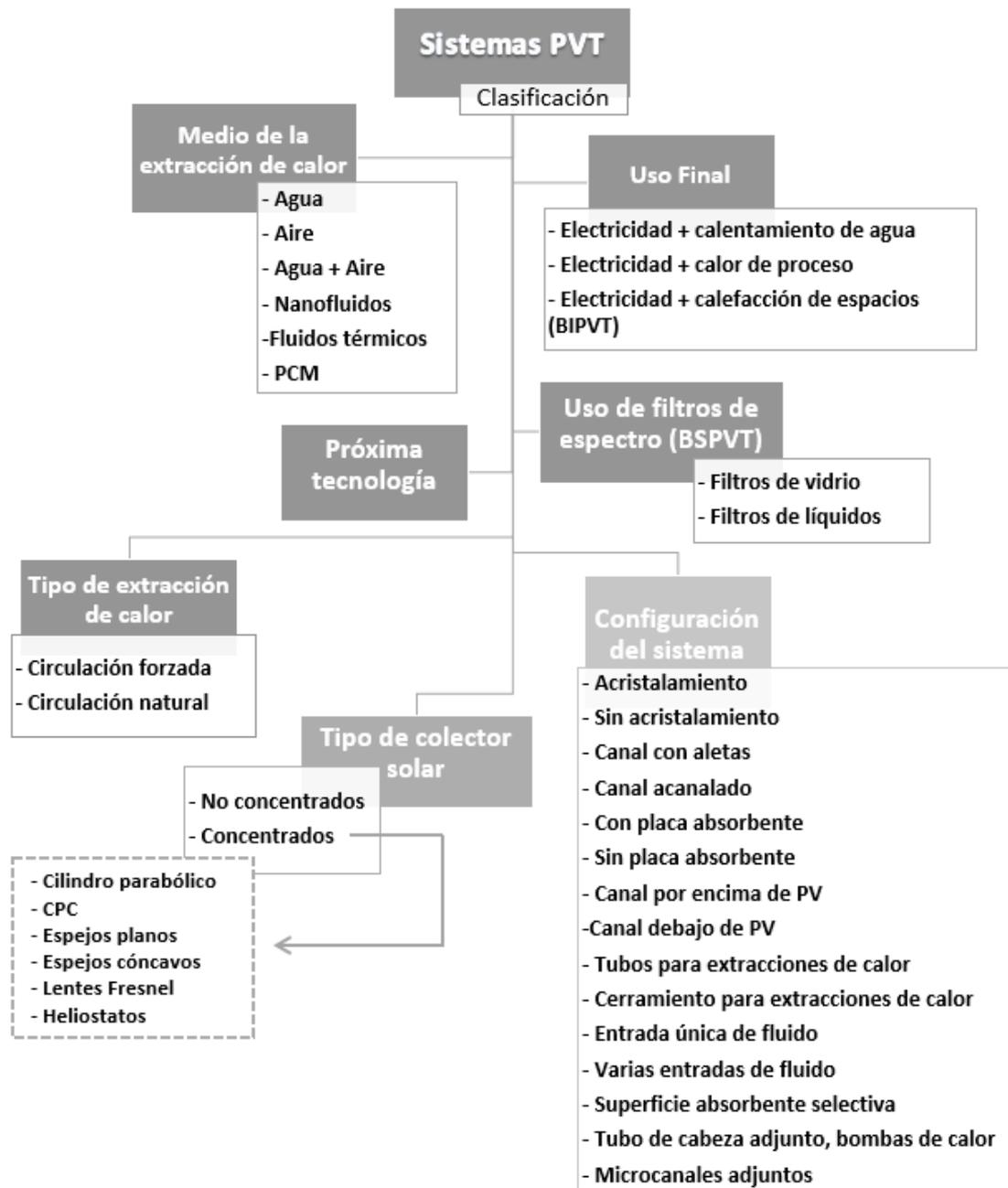


Figura 11. Clasificación de los sistemas PVT

[Fuente: Elaboración propia]

Otra clasificación de los sistemas fotovoltaico híbridos es la que se muestra en la Figura 12, que es la escogida por varios investigadores (Babu y Ponnambalam, 2017; Joshi y Dhoble, 2018) y clasifica los colectores PVT según el tipo de celda fotovoltaica, colector térmico, fluido de trabajo, acristalamiento y absorbente térmico.

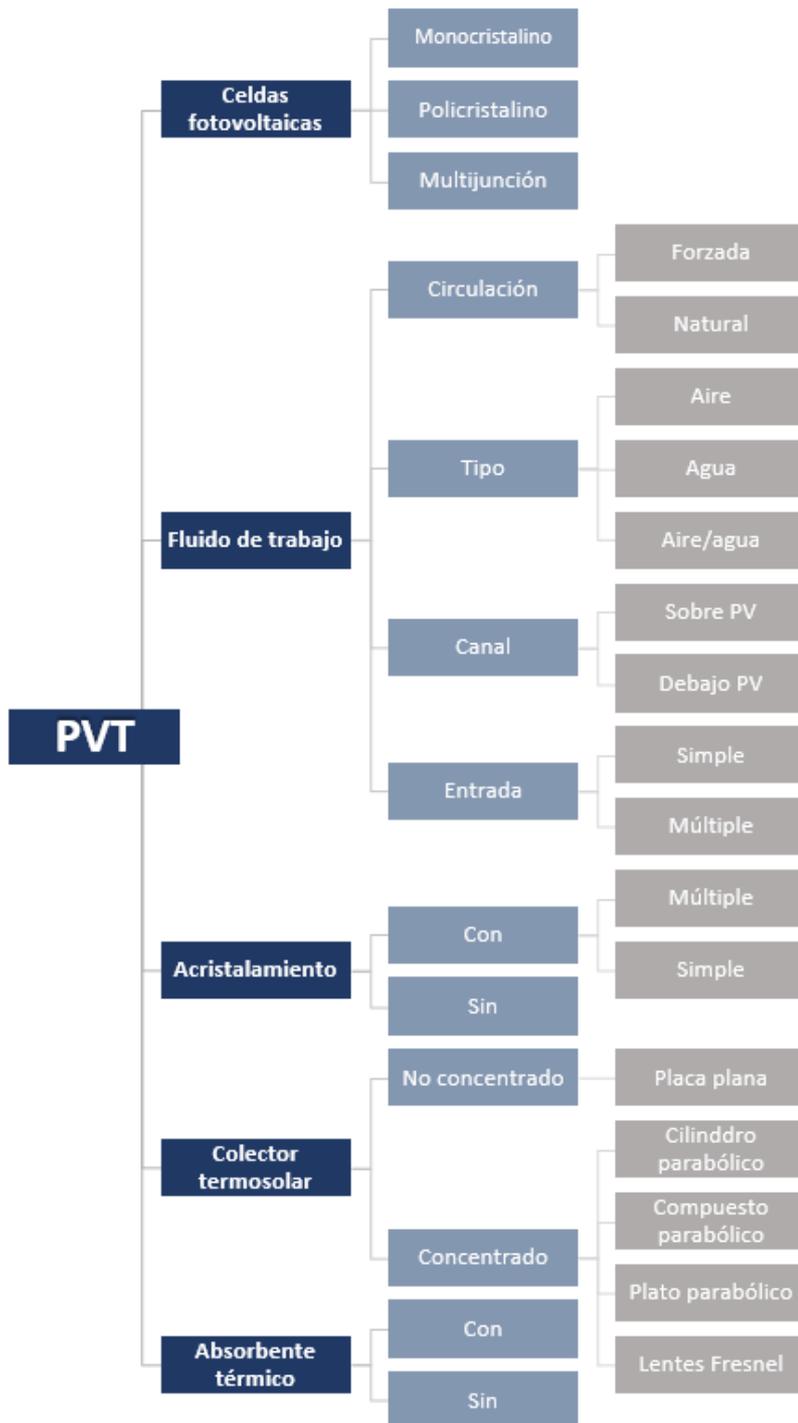


Figura 12. Clasificación de los sistemas PVT

[Fuente: Elaboración propia]

En ambas coincide clasificar estos sistemas según el tipo de colector termosolar, por tanto, en este documento se hará un análisis de los sistemas fotovoltaicos híbridos siguiendo la clasificación de colectores concentrados o no concentrados.

3.3. Sistemas PVT no concentrados

Los sistemas PVT no concentrados son los sistemas fotovoltaico híbridos más simples. Las radiaciones naturales sin ningún mecanismo de concentración se utilizan en estos sistemas PVT. Según el medio utilizado para la extracción de calor del módulo fotovoltaico, estos sistemas se clasifican tradicionalmente en sistemas de tipo agua y aire, que se analizan en el texto siguiente.

3.3.1. Sistemas PVT de tipo agua

En estos tipos de sistemas PVT, el agua se utiliza como medio para extraer calor de los módulos fotovoltaicos. La literatura disponible incluye sistemas PVT con acristalamiento, sin acristalamiento, con diferentes disposiciones de canales de agua, colectores totalmente cubiertos y parcialmente cubiertos por módulos fotovoltaicos, disposición de recubrimiento de la superficie del colector, módulos fotovoltaicos semitransparentes, uso de revestimiento selectivo, sistemas con multi-fluido.

Se utilizan para calentar el agua y, simultáneamente, producir de electricidad para diversas aplicaciones domésticas e industriales. El calentador de agua doméstico generalmente usa colectores de placa plana en conexión paralela y funciona automáticamente con la acción del termosifón, mientras que el sistema de calentamiento de agua industrial se utiliza una serie de colectores de placa plana en serie y, por lo tanto, utiliza una bomba de agua accionada por energía fotovoltaica para mantener un flujo de agua dentro del colector. En la Figura 13 se muestra un diagrama esquemático de un colector PVT de agua.



Figura 13. Esquema de una placa plana PVT de tipo agua

[Fuente: Ahmad Fudholi et al.]

Los sistemas fotovoltaicos híbridos que utilizan agua como fluido de transferencia de calor son más buscados debido a una mayor eficiencia general que los sistemas basados en aire y el agua garantiza un enfriamiento más uniforme de las células fotovoltaicas.

Los colectores PVT a base de agua pueden tener una cubierta de vidrio externa con espacio de aire entre la cubierta y el absorbedor o sin cubierta externa. El PVT cubierto compromete la eficiencia eléctrica debido al aumento de temperatura, mientras que el otro sin cubierta tiene una menor eficiencia térmica pero una mejor eficiencia eléctrica.

Los paneles fotovoltaicos híbridos a base de agua son populares ya que tienen el potencial de sustituir los sistemas de agua caliente domésticos convencionales. Los investigadores probaron varias modificaciones de PVT para mejorar la eficiencia general y eléctrica. Se ha puesto énfasis en descubrir la estrategia de enfriamiento más razonable. El enfriamiento por salpicaduras de agua es una estrategia que se tiene en cuenta para disminuir fundamentalmente la temperatura del módulo fotovoltaico. En la última década se han desarrollado diferentes configuraciones novedosas del panel para mejorar la eliminación de calor del módulo. La placa tubular es la técnica de fabricación de absorbentes térmicos más dominante, en la que una delgada hoja de metal se une a un tubo de metal. El patrón de flujo de fluido tiene un impacto significativo en el enfriamiento del panel fotovoltaico y la temperatura de salida del fluido.

3.3.2. Sistemas PVT de tipo aire

El aire con su baja viscosidad tiene la ventaja de una baja caída de presión en un flujo. En ambientes fríos donde hay una mayor probabilidad de que el agua se congele, el aire se puede usar fácilmente como fluido refrigerante para sistemas fotovoltaicos híbridos. El sistema híbrido con aire como fluido portador del calor está más estudiado debido a su simplicidad en la construcción, bajo costo operativo y puede integrarse eficazmente a los edificios.

En estos tipos de sistemas PVT, el aire se utiliza como medio para extraer calor de los módulos fotovoltaicos. Un colector de aire PV / T típico consiste en un conducto de aire directamente debajo de una matriz fotovoltaica, sin embargo, se han reportado varias configuraciones diferentes de los sistemas PVT de tipo aire: con acristalamiento, sin acristalamiento, disposición diferente de los canales de aire, flujo natural de aire, circulación forzada de aire por ventiladores, uso de inserciones en el canal de aire, optimización de la profundidad del canal de aire y caudal másico de aire.

La Figura 14 ilustra varios tipos de colectores de aire PVT.

- (a) Colector PV / T de aire sin vidriar.
- (b) Colector PV / T de aire de un solo vidrio.
- (c) Colector PV / T de aire de doble acristalamiento.
- (d) Colector PV / T de aire vidriado con doble paso.

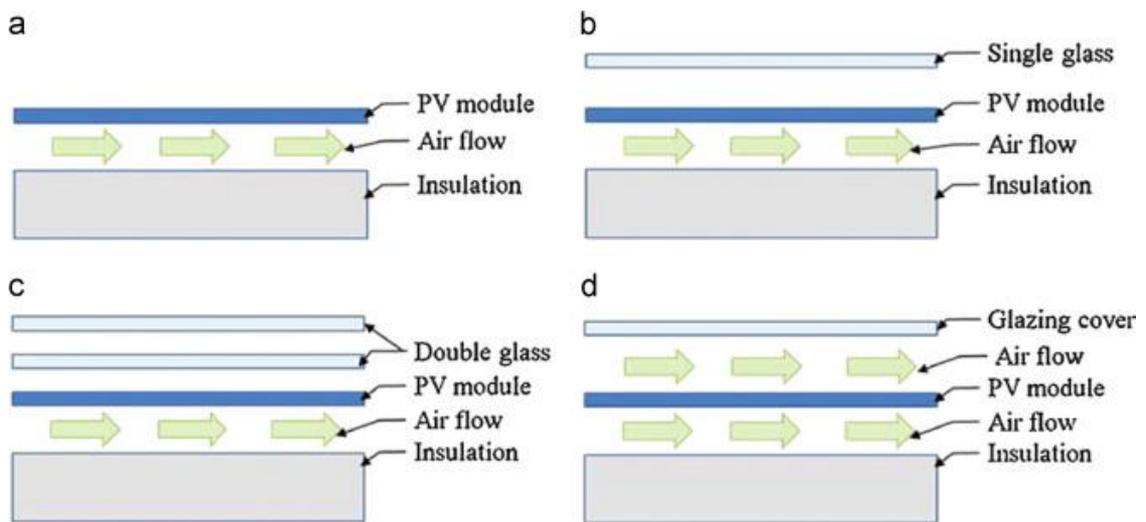


Figura 14. Esquema de diferentes tipos de sistemas de aire PVT

[Fuente: Anil Kumar et al.]

Los sistemas PVT basado en aire se utilizan en muchas aplicaciones prácticas debido al bajo coste de construcción (mínimo uso de material) y de operación entre otros. Aunque su principal uso es calefacción de espacios. Los sistemas PVT de aire están integrados con el edificio para aplicaciones de calefacción de espacios y se conocen como sistema PVT integrado en el edificio (BIPVT). Hay muchos artículos disponibles en la literatura que describen los sistemas BIPVT. Los sistemas BIPVT son sistemas montados en el techo o en la pared.

3.2. Sistemas PVT concentrados (CPVT)

Como su nombre indica, en este tipo de sistema fotovoltaico híbrido, los concentradores solares se utilizan para concentrar las radiaciones solares en el sistema PVT. Muchos investigadores desarrollaron los sistemas CPVT utilizando diferentes tipos de concentradores solares y diferentes materiales solares. Se han utilizado para la fabricación de estos sistemas PVT concentrados: espejos reflectantes planos, lentes de Fresnel, cilindros parabólicos, colectores parabólicos compuestos (CPC), placa paraboloide. Además de esto, en los sistemas CPVT, es necesario utilizar la celda solar adecuada para altas temperaturas de funcionamiento.

Este enfoque de colector PVT es prometedor debido al costo significativamente menor de los reflectores en relación con las células solares. En la Figura 15 se muestra un diagrama esquemático de CPVT.

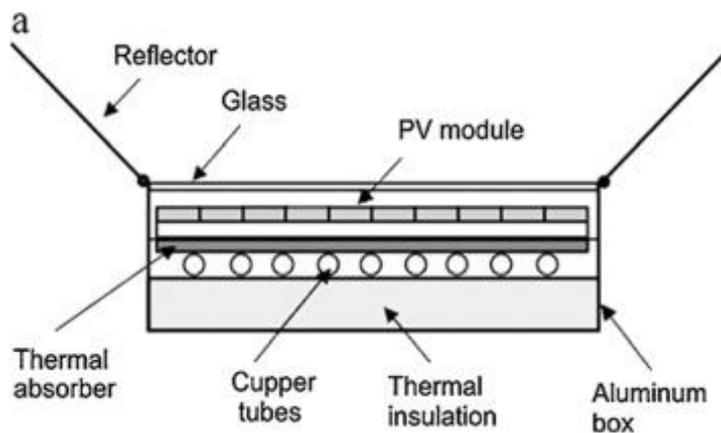


Figura 15. Esquema de una placa CPVT

[Fuente: Anil Kumar et al.]

La concentración es un elemento óptico utilizado para disminuir el coste de la instalación, ya que es, por ejemplo, más barato utilizar reflectores que células de silicio. Los dispositivos ópticos reflectantes y refractivos se caracterizan por su relación de concentración (CR). El problema es la dificultad para concentrar esa radiación sobre pequeñas áreas de superficie, para ello es necesario un seguimiento del sol. Por tanto, los sistemas de concentración con $CR > 2.5$, debe usar un sistema para rastrear el sol, mientras que para el sistema con $CR < 2.5$, se utilizan dispositivos de escritorio.

La salida eléctrica se ve afectada principalmente por dos problemas: la distribución de la radiación solar en la superficie del módulo y el aumento de temperatura del módulo fotovoltaico híbrido. La distribución uniforme de la concentración de radiación solar en la superficie fotovoltaica y la refrigeración adecuada contribuyen a un funcionamiento eficaz del sistema y logran una alta potencia eléctrica. Usar líquido como refrigerante es más efectivo que usar aire para obtener una mejor salida eléctrica.

Por estas razones, el sistema tipo CPVT es común para sistemas de agua caliente de temperatura media / alta aplicables para enfriamiento, desalinización u otros procesos industriales.

4 ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS HÍBRIDOS.

Desde el inicio del siglo XXI la tecnología fotovoltaica híbrida ha atraído el interés de investigadores de todo el mundo. En este apartado se expondrá de forma detallada las investigaciones y análisis llevados a cabo en los últimos años sobre los sistemas fotovoltaicos híbridos. Con el fin de conocer cuáles son los últimos avances respecto a materiales, rendimientos y aplicaciones. Para realizar esta amplia investigación de los PVT, se utilizará la clasificación descrita en el apartado anterior, haciendo distinción entre sistemas fotovoltaicos híbridos concentrados y no concentrados.

4.1. Sistemas PVT no concentrados

Los sistemas de placa plana se componen de placa absorbente plana, cubierta transparente, fluido de trabajo, tubos, aislamiento y funda protectora. Se utiliza para aplicaciones que requieren baja temperatura (30–80 ° C) (Herrando et al., 2014). Se utiliza ampliamente en sistemas de calefacción solar de espacios (SSH) y calefacción solar de agua (SWH).

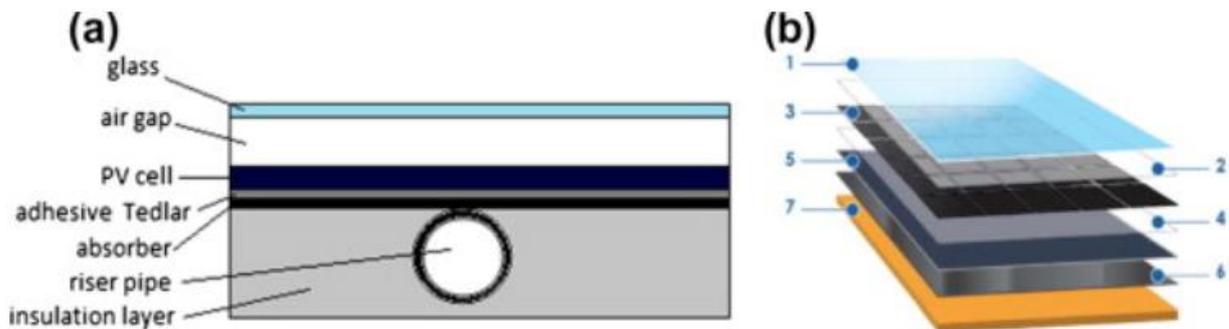


Figura 16. Capas de un módulo PVT de placa plana

[Fuente: Herrando et al]

La Figura 16 muestra una sección transversal (a) de un colector PVT de placa plana y (b) capas de un PVT cubierto:

1. Vidrio templado (alta transmitancia)
2. Película encapsulante de EVA.
3. Células fotovoltaicas de c-Si.
4. Película encapsulante de EVA.
5. Adhesivo Tedlar.
6. Placa absorbente de aluminio más colector solar.
7. Capa aislante.

Moreno et al. [19] estudiaron un sistema PVT de placa plana sin esmaltar analizando su rendimiento en distintas condiciones de funcionamiento. Se realizó un modelado de elementos finitos, se simuló y se comparó con un modelo matemático teórico existente. Los resultados revelaron que el rendimiento general del sistema PVT es mayor que el del sistema térmico y es significativo para lugares con áreas limitadas a pesar de que la temperatura de salida es relativamente moderada.

Lämmle y col. [20] desarrollado, validaron y simularon, utilizando TRNSYS, un modelo empírico para evaluar el desempeño de PVT-FPC vidriados, no vidriados e híbridos de recubrimientos de baja emisividad. Se detectó que el colector PVT vidriado alcanza los mayores rendimientos globales y el mejor aprovechamiento energético del área colectora. Además, se observó que, con la misma salida térmica, la

salida eléctrica de estos colectores es mayor que la de PVM y FPC operando por separado en aproximadamente 3 veces.

Das et al. [21] presentaron una revisión detallada de los sistemas PVT acoplados a un colector de placa plana. Su revisión incluye una evaluación ambiental y económica de los sistemas PVT que fueron establecidos por varios investigadores. Además, comprende una lista de formas termodinámicas para evaluar la eficiencia del sistema, como el análisis de energía y exergía.

Guarracino et al. [22] estudiaron las características de rendimiento de un colector PVT de placa plana no concentrada. Llevaron a cabo pruebas experimentales en cuatro colectores PVT: módulo PVT comercial (Figura 17), módulo PVT sin vidriar con factor de cobertura fotovoltaica del 65% (Figura 18) y módulos PVT vidriados con factor de cobertura PV del 65% y 100% (Figura 19). Se obtuvo que la eficiencia térmica del colector PVT se alivia en un 10% cuando la conversión de electricidad se maximiza relativamente en comparación con el modo de circuito abierto. Además, el rendimiento térmico del colector se deteriora cuando hay un contacto térmico débil del absorbente térmico con la capa fotovoltaica. Además, se demostró que el acristalamiento mejora la eficiencia térmica y mitiga la eficiencia eléctrica.



Figura 17. Módulo PVT comercial
[Fuente: Guarracino et al]

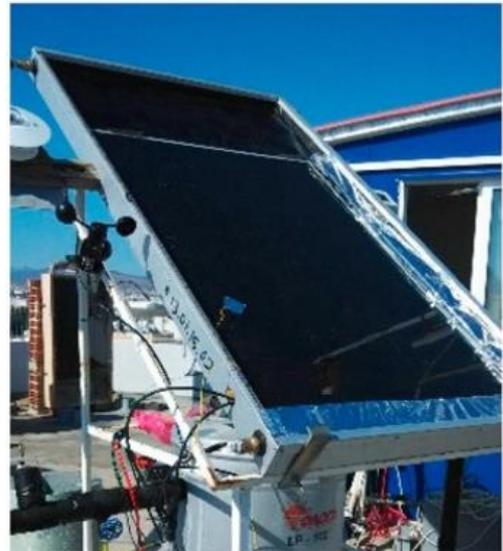


Figura 18. Módulo PVT sin vidriar con factor de cobertura del 65%
[Fuente: Guarracino et al.]

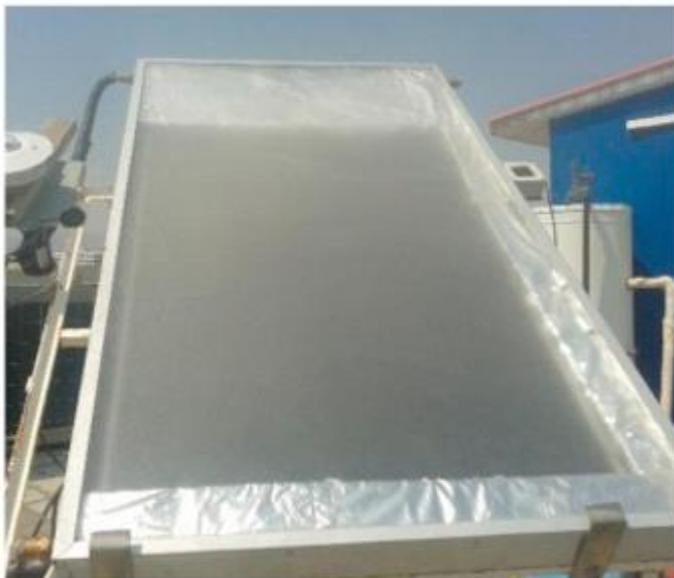


Figura 19. Módulo PVT vidriado con factor de cobertura del 100%
[Fuente: Guarracino et al]

A partir de 2010, los investigadores se han centrado más en el uso de material de cambio de fase (PCM), nanofluidos y mejora de la eficiencia. Se han aplicado varias tecnologías novedosas, como el absorbedor de roll-bond, los canales con aletas, las mechas unidas a la parte posterior de la fotovoltaica, la refrigeración por chorro de agua, el uso de materiales de cambio de fase, las tuberías de calor, el nanofluido, etc.

Por tanto, con estas nuevas investigaciones se propone una nueva clasificación de los sistemas PVT no concentrados: PVT a base de agua, PVT a base de aire, PVT con material de cambio de fase, PVT con nanofluido como medio de transferencia de calor y PVT con tubos de calor.

4.1.1 Sistemas PVT con base de agua

En los últimos años muchos investigadores contribuyeron en el campo de la investigación para el aumento de la eficiencia de los colectores de agua fotovoltaicos híbridos utilizando técnicas de enfriamiento novedosas de las que se mencionan unas pocas en esta sección.

Aste et al. [23] desarrollaron un colector de PVT que se muestra en la Figura 20 que combina una capa superior que tiene células solares de silicio amorfo y de silicio microcristalino, donde las celdas superiores absorben espectro solar visible y la convierten en electricidad la energía, mientras que la capa inferior es sensible a la región del infrarrojo cercano del espectro de radiación solar y la convierte en energía térmica.

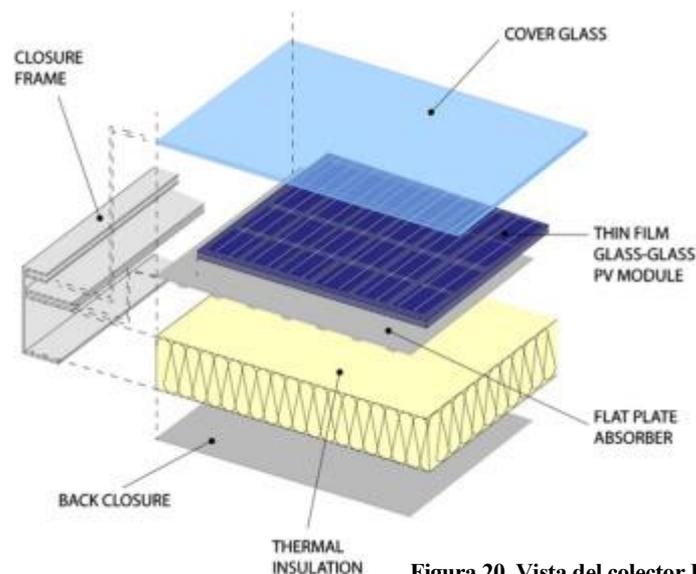


Figura 20. Vista del colector PVT desarrollado por Aste et al.

[Fuente: Aste et al]

He et al. [24] informó una eficiencia térmica diaria del 40% del PVT que tiene un canal de aleación de aluminio con agua como fluido de transferencia de calor, la prueba se llevó a cabo en la City University of Hong Kong.

Xu et al. [25] desarrolló un nuevo sistema fotovoltaico solar de baja concentración asistido por un sistema de bomba de calor para calentar agua e informó que el coeficiente de rendimiento (COP) del sistema promedio para calentar agua de 30 ° C a 70 ° C en un día claro y soleado en verano era 4.8, con una eficiencia eléctrica reportada del 17.5%, que es 1.36 veces mayor que la del mismo sistema fotovoltaico sin ningún mecanismo de enfriamiento.

Aste et al [26] realizaron un trabajo experimental dirigido a investigar el desempeño de un sistema colector híbrido descubierto, con el objetivo de crear un modelo matemático que pudiera dar cuenta de todas las variables y parámetros relevantes para su desempeño energético y comportamiento dinámico. El módulo PVT consiste en un sándwich de PV de mc-Si no cubierto con ningún vidrio adicional, unido mecánicamente con un absorbente de aluminio de unión por laminación, con la disposición de canales que se muestra en la Figura 21.

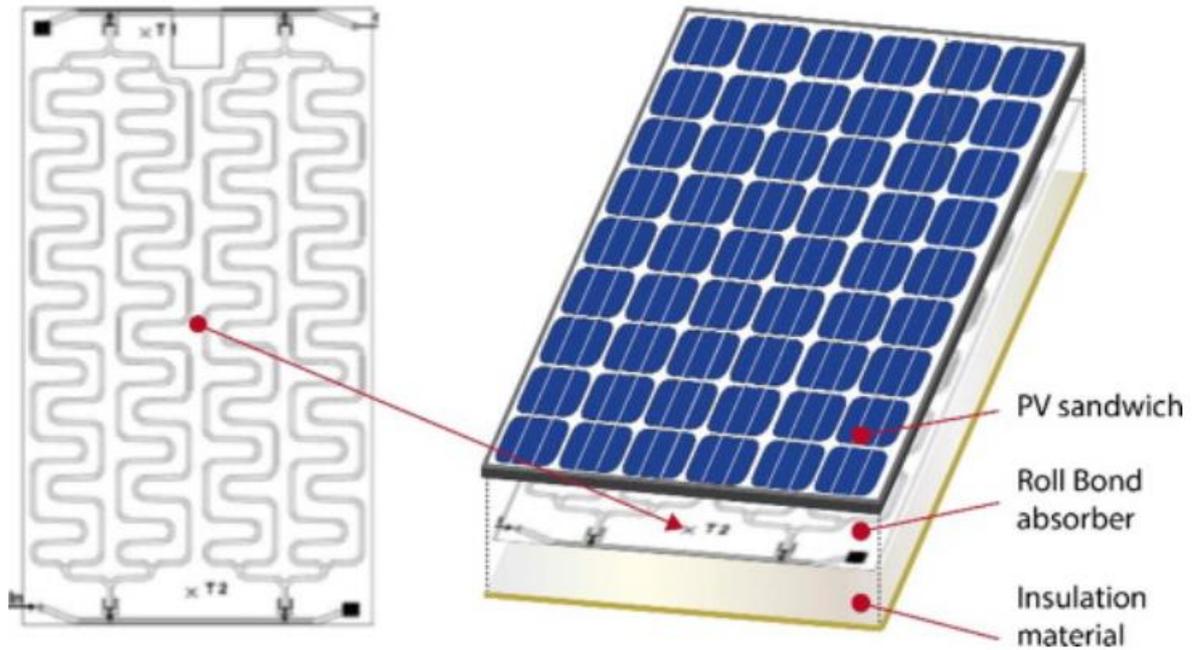


Figura 21. Configuración de placa absorbente y colector PVT

[Fuente: Aste et al]

Para evaluar las capacidades predictivas del modelo con respecto a diferentes condiciones climáticas, se eligieron tres ubicaciones en Europa, respectivamente París, Milán y Atenas. Las tres ubicaciones son representativas de diferentes zonas climáticas de Europa, a saber, continental (París), semicontinental (Milán) y mediterránea (Atenas). La Tabla 1 recoge los resultados en estas ubicaciones.

	% η_{totalo}	% $\eta_{\text{eléctrico}}$
<i>París</i>	32,7	13
<i>Milán</i>	36,1	13,6
<i>Atenas</i>	40,6	13,4

Tabla 1. Resultados de la eficiencia global y eléctrica del modelo PVT desarrollado por Aste et al.

Yazdanifard et al [27] realizaron un estudio sobre los efectos del rendimiento y parámetros geométricos en regímenes laminares y turbulentos. Los resultados mostraron que el aumento de la radiación solar y el factor de empaquetamiento aumenta la eficiencia energética total y la exergía tanto en régimen laminar como turbulento. Además, indicaron que la eficiencia energética en el sistema fotovoltaico híbrido vidriado es más alta que en uno no vidriado, mientras que su eficiencia exergética depende del factor de empaque, el número de Reynolds y la longitud del colector. El valor del caudal másico óptimo es mayor en el caso del sistema sin vidriar que en el vidriado. Además, en la mayoría de los casos, la eficiencia energética total en régimen turbulento es mayor, mientras que la eficiencia exergética total en régimen

laminar es superior.

Qu et al. [28] proponen un novedoso sistema de calentamiento de agua con bomba de calor de doble fuente (DSHP) integrado en un sistema fotovoltaico híbrido. Según los resultados experimentales del análisis de eficiencia energética, el sistema de calentamiento de agua DSHP integrado en un PVT funciona de manera eficiente en modo agua-agua, y cuando la energía solar es insuficiente en días nublados o lluviosos, el sistema de calentamiento de agua DSHP integrado PVT puede funcionar en modo aire-agua. Tomando las condiciones climáticas de Shanghái como ejemplo, la eficiencia de conversión eléctrica se puede aumentar en un 10,3% a medida que la temperatura superior del panel PVT disminuya sobre $\sim 45^\circ\text{C}$ cuando se proporciona refrigeración.

Bombarda et al. [29] compararon experimentalmente tres módulos PVT diferentes, tanto en términos de potencia como de tasa de transferencia de calor. Dos módulos son prototipos de PVT que implementan un absorbedor roll-bond, mientras que el tercero es un producto comercial basado en el concepto de hoja y tubo y se utiliza como base. La diferencia entre los dos prototipos roll-bond radica en el aislamiento: el primero adopta un revestimiento aislante innovador, mientras que el segundo se realiza con un material aislante más convencional. Se adoptó la configuración roll-bond porque se espera que sea una de las configuraciones con el costo de producción más bajo.

	REF PVT	RB1	RB2
CELDA FOTOVOLTAICA	Monocrystalino	Policristalino	Policristalino
POTENCIA DE SALIDA, W	245	245	245
TAMAÑO DEL MÓDULO ($H_P \times L_P \times D_P$), MM	1660 × 990 × 40	1650 × 992 × 40	1650 × 992 × 40
SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR	Hoja y tubo	Roll-Bond	Roll-Bond
MATERIAL	Cobre	Aluminio	Aluminio
SELLADOR	No es necesario	Terostat MS930	Loxeal 4826
MATERIAL AISLANTE	N / A	Pintura aislante k = 0,1 W/mK Espesor = 1 mm	Material aislante k = 0,04 W/mK Espesor = 3 mm
TUBOS / PASES	1/6	3/5	3/5

Tabla 2. Resumen de los tres módulos PVT considerados en el estudio de Bombarda et al.

Los resultados mostraron que los módulos de unión por roll-bond pueden alcanzar una mayor eficiencia térmica que la configuración de hoja y tubo, siempre que se agregue un aislamiento adecuado a la base del colector. La eficiencia térmica puede aumentar en aproximadamente un 10% con una producción de electricidad incluso ligeramente mayor. La eficiencia resultante de la primera y la segunda ley puede ser tan alta como 49% y 16.2% para la mejor unión roll-bond, mientras que el módulo base alcanza eficiencias térmicas y eléctricas del 40% y 15.6% respectivamente. Gracias a este extenso estudio experimental, se confirma la potencialidad del roll bond como tecnología de recuperación de calor aplicada a módulos fotovoltaicos.

Nižetić et al. [30] presentan una técnica de refrigeración por aspersión de agua. Una técnica de enfriamiento alternativa en el sentido de que ambos lados del panel fotovoltaico se enfriaron simultáneamente. El resultado experimental muestra que es posible lograr un aumento total máximo del 16,3% (7,7% efectivo) en la producción de energía eléctrica y un aumento total del 14,1% (efectivo 5. 9%) en la eficiencia eléctrica del panel fotovoltaico mediante el uso de la técnica de enfriamiento propuesta en circunstancias de máxima irradiación solar. Además, también fue posible disminuir la temperatura del panel de un promedio de 54 °C (panel fotovoltaico no refrigerado) a 24 °C en el caso de enfriamiento simultáneo del panel fotovoltaico frontal y posterior.



Figura 22. La parte delantera y trasera del panel fotovoltaico con el sistema de aspersión de agua específico

[Fuente: Nižetić et al]

Yazdanpanaet al. [31] investigan de forma experimental y numérica la eficiencia exergética de un colector de agua fotovoltaico híbrido. Los resultados concluyen que la eficiencia exergética tiene un valor máximo de 13,95% a un caudal másico de 0,002 kg / s.

Aste et al. [32] en su trabajo presentan el diseño de un colector PVT cubierto, realizado con tecnología PV de película fina y un absorbedor de placa plana roll-bond, y un modelo de simulación, desarrollado a través de la elaboración de varias ecuaciones matemáticas, para evaluar el desempeño de los colectores de agua PVT cubiertos. Los resultados obtenidos mostraron que el colector PVT es capaz de convertir la energía solar en energía primaria con una eficiencia global del 42%, que viene dada por un $\mu_{\text{eléctrico}} = 13,2\%$ y $\mu_{\text{térmico}} = 28,8\%$. Tales resultados son prometedores considerando que la eficiencia anual promedio de los colectores PVT vidriados se estima en alrededor del 40% (Zondag et al., 2003, Chow et al., 2006, Chow et al., 2007)

Liang et al. [33] desarrollaron un nuevo tipo de colector fotovoltaico híbrido relleno de grafito. Los resultados del proyecto mostraron los siguientes datos: l valor medio de la eficiencia eléctrica del colector PVT relleno de grafito y el módulo fotovoltaico convencional fue del 6,46% y el 5,15% entre las 8:00 am y las 4:00 pm. La eficiencia eléctrica más alta del colector PVT lleno de grafito puede alcanzar el 7,2%. La mayor eficiencia de ahorro de energía primaria del colector PVT lleno de grafito fue del 48% a las 10:35.

Baloch et al. [34] realizaron una investigación experimental y numérica de una técnica de enfriamiento denominada enfriamiento por canal convergente (Figura 23) destinada a lograr una temperatura baja y

uniforme en la superficie del panel fotovoltaico. Las mediciones térmicas de una fotovoltaica sin enfriar mostraron una temperatura de la celda de hasta 71,2 °C en el mes de junio y 48,3 °C en diciembre. Al emplear enfriamiento convergente, la temperatura de la celda se redujo significativamente a 45.1°C para junio y a 36.4 °C para diciembre. La mejora porcentual máxima en la producción de energía fue del 35,5%, mientras que el aumento porcentual máximo en la eficiencia de conversión fue del 36,1% en comparación con el rendimiento de un sistema fotovoltaico no refrigerado.

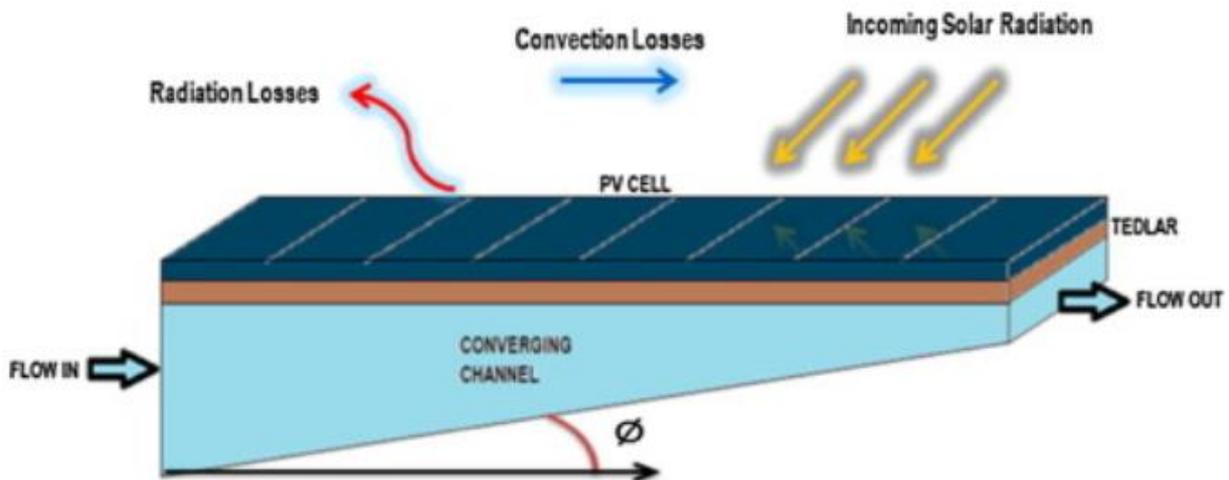


Figura 23. Esquema de intercambiador de calor de canal convergente.

[Fuente: Baloch et al.]

La disminución de la producción de los módulos solares fotovoltaicos a medida que aumenta su temperatura durante el funcionamiento es una preocupación importante para los desarrolladores y usuarios. Alami [35] investigó una técnica de enfriamiento evaporativo pasivo que consiste en incorporar una capa de arcilla sintética a la parte posterior del módulo y permitir que se evapore una fina película de agua, reduciendo así la temperatura del módulo. Los resultados han demostrado la viabilidad técnica del enfoque propuesto al exhibir un aumento máximo del 19,4% en la tensión de salida y del 19,1% en la potencia de salida. Durante las horas del mediodía, el módulo fotovoltaico sin arcilla alcanzaría temperaturas de alrededor de 85 °C, mientras que el módulo fotovoltaico equipado con arcilla estaría a 45 °C. La incorporación de arcilla es muy eficaz, barata, silenciosa y respetuosa con el medio ambiente.



Figura 24. Construcción del elemento de enfriamiento, lámina de cobre con arcilla.

[Fuente: Alami.]

Fudholi et al. [36] investigaron un colector de agua PVT que consta de un absorbedor de flujo en espiral. Se determinaron los rendimientos de tres colectores de agua PVT. Los resultados indican que con un nivel de radiación solar de 800 W / m² y un caudal másico de 0,041 kg / s, el absorbedor de flujo en espiral produjo una eficiencia PVT de aproximadamente 65%, una eficiencia fotovoltaica del 13% y una

eficiencia térmica de 52%. También exhibió una eficiencia de ahorro de energía primaria de 79 a 91% a tasas de flujo másico que variaban de 0.011 a 0.041 kg / s.

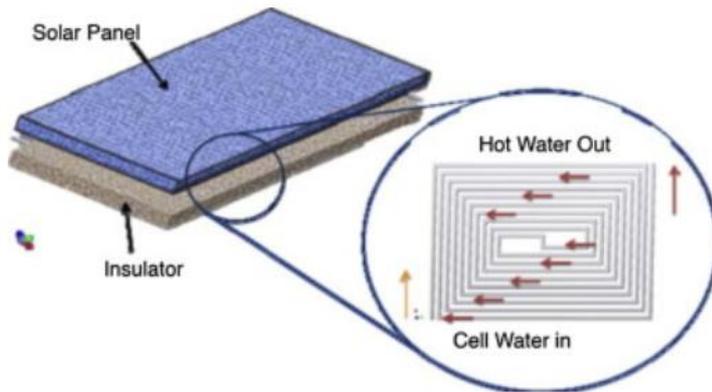


Figura 25. Diseño de colector de agua PVT con absorbedor de flujo en espiral.

[Fuente: Fudholi et al.]

Tras esta revisión comprobamos que los investigadores han experimentado con varias modificaciones de PVT para mejorar la eficiencia general y eléctrica. Se ha puesto énfasis en descubrir la estrategia de enfriamiento más razonable. El enfriamiento por salpicaduras de agua es una estrategia que se tiene en cuenta para disminuir fundamentalmente la temperatura del módulo fotovoltaico. La aplicación de una capa de arcilla sintética en la parte posterior del panel fotovoltaico con agua rociada sobre la capa de arcilla sintética también resultó útil desde el punto de vista de la ganancia de potencia. En la última década se desarrollaron diferentes configuraciones novedosas del panel posterior para mejorar la eliminación de calor del módulo. La hoja y el tubo es la técnica de fabricación de absorbentes térmicos más dominante, en el que una delgada hoja de metal unida a un tubo de metal. El patrón de flujo de fluido tiene un impacto significativo en el enfriamiento del panel fotovoltaico y la temperatura de salida del fluido. El patrón de flujo de la banda es adecuado para ser utilizado para una mejor refrigeración del panel fotovoltaico.

4.1.2 Sistemas PVT basados en aire

El aire se puede usar fácilmente como fluido refrigerante para sistemas PVT y el mismo se puede utilizar para calentar espacios. El calor recuperado por PVT basado en aire puede ser útil para calefacción de espacios y diferentes aplicaciones de secado. Los investigadores probaron con diferentes configuraciones de absorbedores para aumentar la temperatura del aire de salida mejorando así la calidad del aire y lo mismo se puede poner en algunas aplicaciones específicas como el secado de frutas y especias. El sistema fotovoltaico híbrido integrado en edificios es la única aplicación sostenible del sistema PVT basado en aire y necesita la atención de los investigadores para obtener una configuración óptima para una fácil integración con los edificios existentes.

Un colector de aire típico PVT consiste en un conducto de aire directamente debajo de una fotovoltaica matriz, sin embargo, se han reportado varias configuraciones diferentes para colectores de aire PVT a través de cálculos y experimentación. Se han realizado intentos para mejorar la transferencia de calor en colectores solares basados en aire. Los investigadores utilizaron aletas para mejorar el área de transferencia de calor y otros tipos de obstáculos en la trayectoria del flujo de fluido de un colector solar para aumentar la turbulencia. Algunos de los diseños implementados de los sistemas de aire PVT son de un solo paso, doble paso, canal con aletas, chorros de impacto, pared nervada, etc.

Tonui y Tripanagnostopoulos [37] investigaron modificaciones de bajo costo de un sistema de aire

PVT para lograr una mayor eficiencia general y sugirieron la suspensión de una placa metálica delgada en el medio del canal de. Las aletas unidas a la parte posterior de la placa del panel fotovoltaico mejoran la transferencia de calor desde el panel fotovoltaico en la parte superior al aire que fluye en el canal al aumentar el área de transferencia de calor efectiva.

Slimani et al. [38] presenta un estudio comparativo entre cuatro configuraciones de dispositivos solares: módulo fotovoltaico (PV-I), colector de aire fotovoltaico híbrido convencional (PV/T-II), colector de aire fotovoltaico híbrido vidriado (PV/T-III) y colector de aire fotovoltaico híbrido de doble paso (PV/T-IV).

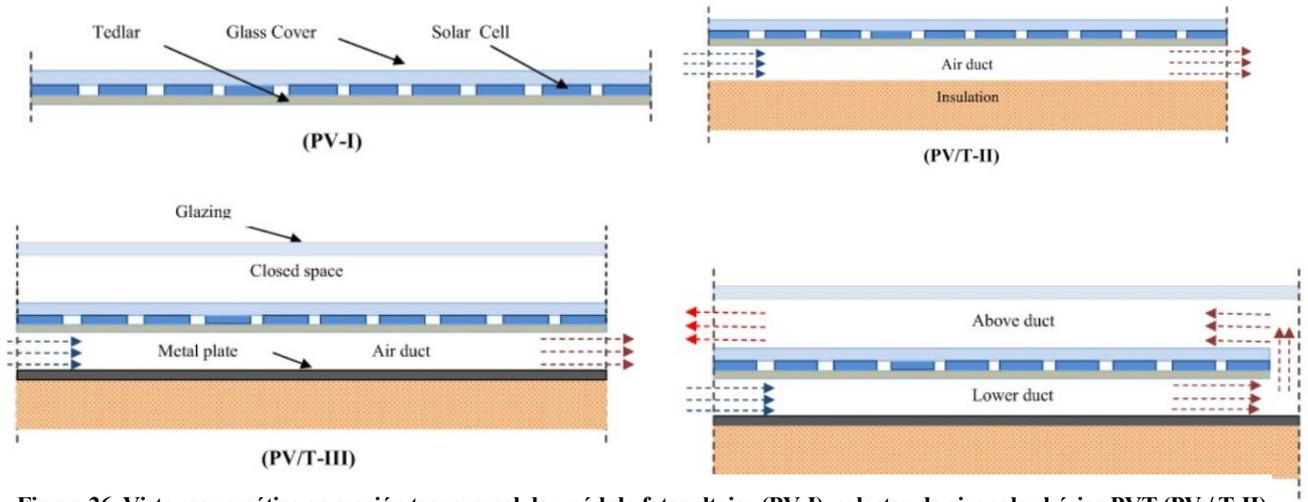


Figura 26. Vista esquemática en sección transversal de: módulo fotovoltaico (PV-I), colector de aire solar básico PVT (PV / T-II), colector de aire solar PVT vidriado (PV / T-III) y solar de doble paso vidriado colector de aire PVT (PV / T-IV)

[Fuente: Slimani et al].

Los resultados numéricos muestran que la media diaria de eficiencia energética global alcanza: 29,63%, 51,02%, 69,47% y 74% para las configuraciones primera (PV-I), segunda (PV/T-II), tercera (PV/T-III) y cuarta (PV/T-IV) respectivamente. Estos valores se obtienen con un caudal de aire de 0,023 kg/s.

	μ_{GLOBAL}	$\mu_{\text{ELÉCTRICA}}$	$\mu_{\text{TÉRMICA}}$
PV-I	29,63%	10,66%	0%
PV/T-II	51,02%	10,73%	21,19%
PV/T-III	69,47%	10,33%	40,77%
PV/T-IV	74%	10,65%	44,41%

Tabla 3. Resultados de los promedios diarios de los rendimientos eléctricos, térmicos y globales.

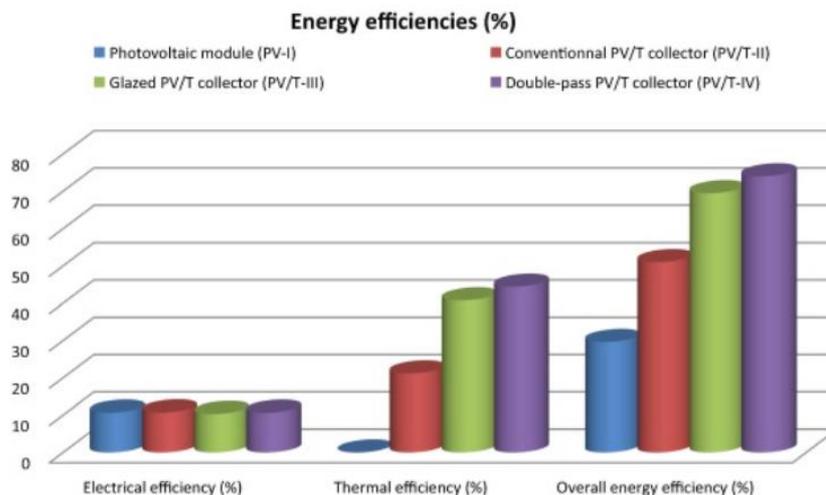


Figura 27. Histograma comparativo de la media diaria de eficiencias energéticas eléctricas, térmicas y generales para cuartas configuraciones

[Fuente: Slimani et al].

Assoa et al. [39] optimizaron un prototipo de sistema de secado de forrajes basado en PVT, que integraron en un edificio en Savoy, Francia. Se trata de un panel fotovoltaico integrado con un colector de aluminio. Hay un espacio de aire aislado debajo del colector. Considerando el espacio de aire existente y los resultados de las pruebas en interiores, la eficiencia térmica diaria del sistema alcanzo el 27,7%, la eficiencia eléctrica del campo fotovoltaico el 13% y el precalentamiento del aire máximo de 7,8°C indicaron que el sistema PVT es adecuado para el secado de forrajes.

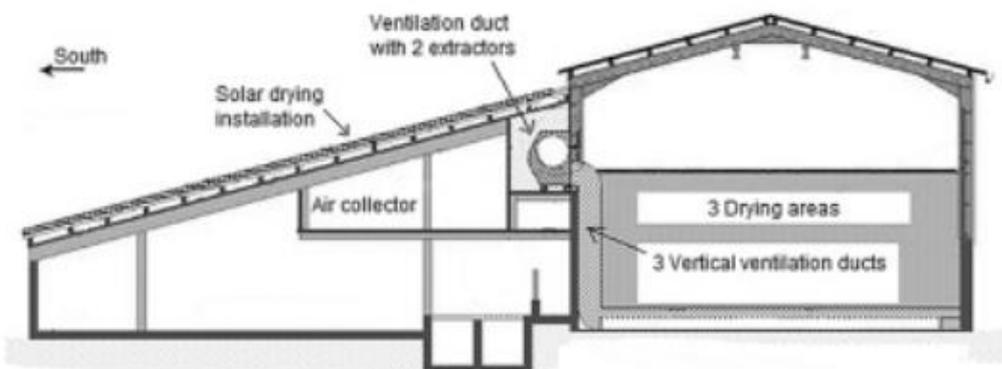


Figura 28. Sección vertical de la instalación de secado de forrajes en Savoy.

[Fuente: Assoa et al.]

Dr. Ahmed y Mohammed [40] analizaron la influencia de los medios porosos en el rendimiento de un colector de aire fotovoltaico híbrido de doble paso. Construyeron una configuración experimental para este propósito insertando el medio poroso en el conducto inferior del colector fotovoltaico híbrido. El estudio mostró que el uso de medios porosos expandió el área de transferencia de calor y, por lo tanto, aumentó la eficiencia térmica y la temperatura del aire de salida del colector fotovoltaico híbrido. La eficiencia térmica máxima reportada fue 80.23% con el uso de medios porosos y cubierta de vidrio, se reportó una eficiencia térmica de 51.25% sin medios porosos y cubierta de vidrio. El valor más alto para la eficiencia eléctrica diaria fue de 8,7% en el colector que utilizó medios porosos y el valor más alto para la eficiencia eléctrica diaria fue 10,91% sin medios porosos y sin cubierta de vidrio.

Mojumder et al. [41] proponen un sistema fotovoltaico híbrido de paso único de tipo aire en el que se introdujeron varias aletas rectangulares delgadas para disipar el calor. Las aletas son rectangulares, y están fijadas longitudinalmente e integradas en el sistema con una chapa metálica plana. Los resultados mostraron los que con caudal másico de 0,14 kg/s y a una insolación solar de 700 W/m² la eficiencia térmica sin aleta y con cuatro aletas es de 37,82% y 56,19% respectivamente.

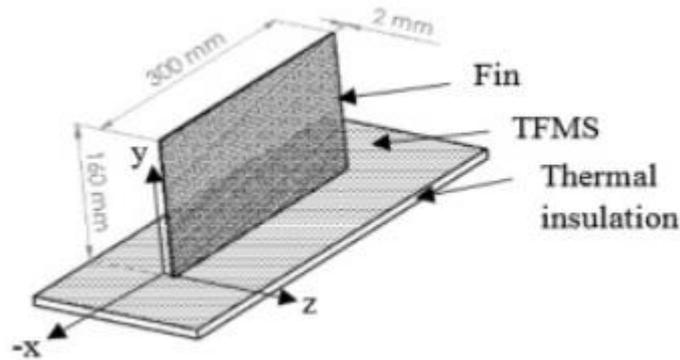


Figura 29. Diagrama esquemático de las dimensiones de las aletas.

[Fuente: Mojumder et al.]

Hussain et al. [42] realizaron un estudio experimental de un sistema fotovoltaico híbrido mejorado combinándolo con un intercambiador de calor hexagonal de panal. El panal se instaló horizontalmente en el canal ubicado debajo del módulo fotovoltaico. Aire, como material eliminador de calor, se hace fluir a través del panal. El sistema se probó con y sin el panal a una irradiación de 828 W/m² y un caudal másico comprendido entre 0,02 kg/s a 0,13 kg/s. Se observó que el panal de aluminio es capaz de mejorar la eficiencia térmica del sistema de manera eficiente. A un caudal másico de 0,11 kg/s, la eficiencia térmica del sistema sin nido de abeja es del 27% y con es del 87%. La eficiencia eléctrica del módulo fotovoltaico mejoró en un 0,1% en todo el rango del caudal másico. El diseño mejorado es adecuado para seguir investigando como sistema de secado solar y calefacción de espacios.

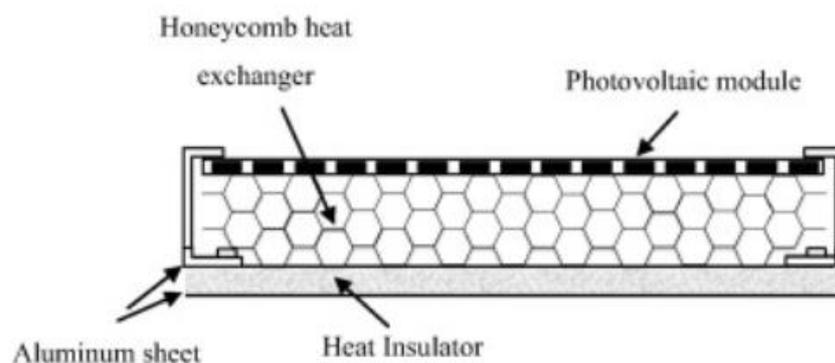


Figura 30. Módulo fotovoltaico con intercambiador de calor de panal.

[Fuente: Hussain et al.]

Brideau y Collins [43] desarrollaron un modelo predictivo de un PVT con surtidores. Construyeron un prototipo el cual pusieron a una instalación al aire libre para validar y probar las capacidades del modelo. Este prototipo utilizaba surtidores de aire incidentes en la placa en lugar del tradicional flujo paralelo. Tras probarlo durante ocho días, los resultados mostraron que el colector convirtió el 54,5% de la radiación solar incidente en calor o energía eléctrica.

Teo et al. [44] diseñaron, fabricaron e investigaron experimentalmente un sistema fotovoltaico híbrido. Para enfriar activamente las celdas fotovoltaicas, se unió a la parte posterior del panel fotovoltaico una matriz paralela de conductos de aire con aletas. Los experimentos se realizaron con y sin enfriamiento activo. Se encontró una tendencia lineal entre la eficiencia y la temperatura. Sin refrigeración activa, la temperatura del módulo era alta y las células solares solo pueden alcanzar una eficiencia del 8 al 9%. Sin embargo, cuando el módulo se hizo funcionar en condiciones de enfriamiento activo, la temperatura descendió significativamente, lo que provocó un aumento de la eficiencia de las células solares entre un 12% y un 14%.

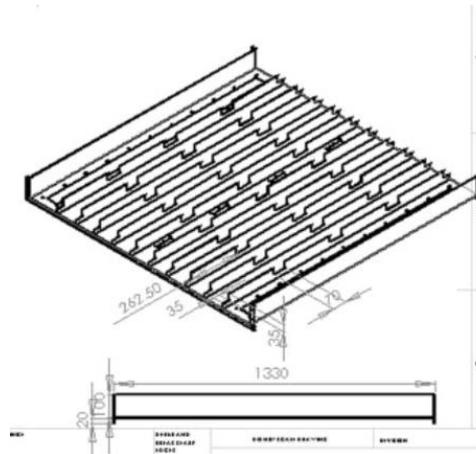


Figura 31. Boceto de la matriz

[Fuente: Teo et al.]

	SIN ENFRIAMIENTO	CON ENFRIAMIENTO
T_{PV}	68 ° C	38 ° C
$\mu_{ELÉCTRICA}$	8,6%.	12,5%

Tabla 4. Resultados experimentales del PVT diseñado por Teo et al.

Kumar y Rosen [45] investigaron un calentador de aire PVT de doble paso con aletas verticales. Las aletas están dispuestas perpendicularmente a la dirección del flujo de aire para mejorar la tasa de transferencia de calor y la eficiencia. El área extendida de la aleta reduce considerablemente la temperatura de la celda, de 82°C a 66 °C.

Shahsavari y Ameri [46] modelaron y diseñaron un colector de aire PVT de acoplamiento directo en Kerman, Irán. Con una delgada hoja de aluminio suspendida en el medio del canal de aire para aumentar la superficie de intercambio de calor y, en consecuencia, mejorar la extracción de calor de los paneles fotovoltaicos. La carcasa del canal de flujo de aire está construida con madera de tablero de fibra de densidad media. Los resultados demostraron que la instalación con cubierta de vidrio sobre los paneles fotovoltaicos conduce a un aumento de la eficiencia térmica de PVT y una disminución de la eficiencia eléctrica del módulo.



Figura 32. Fotografía de la instalación experimental del colector de aire PV T estudiado en la Universidad Shahid Bahonar de Kerman

[Fuente: Shahsavari y Ameri]

Joshi y Tiwari [47] evaluaron la eficiencia de exergía de un colector de aire de placas paralelas fotovoltaico híbrido para las condiciones climáticas frías de la India (Srinagar). Se observa que la energía instantánea y la eficiencia exergética del calentador de aire PVT varía entre 55-65 y 12-15%, respectivamente.

Tras esta revisión se puede afirmar que el absorbedor de aletas es la configuración más investigada para el absorbedor térmico. La geometría de las aletas, incluida la orientación, es un parámetro muy importante para mejorar la eliminación de calor del módulo fotovoltaico. Se están utilizando aletas perforadas para facilitar la circulación de aire a través de la superficie posterior del módulo fotovoltaico. Los calentadores de aire basados en PVT de doble paso son útiles para aumentar la temperatura del aire. En algunos de los sistemas PVT de doble paso, el canal de flujo de aire inferior está lleno de medio poroso y resulta útil para mejorar la eficiencia térmica y eléctrica del sistema. En los países europeos se trabaja mucho en sistemas fotovoltaicos híbridos basados en aire y se hace hincapié en la integración de los sistemas fotovoltaicos híbridos en los edificios.

4.1.3 Sistema PV / T con material de cambio de fase (PCM)

Los materiales de cambio de fase (PCM) se han utilizado ampliamente para el almacenamiento de calor. La Figura 33 muestra la clasificación de PCM.

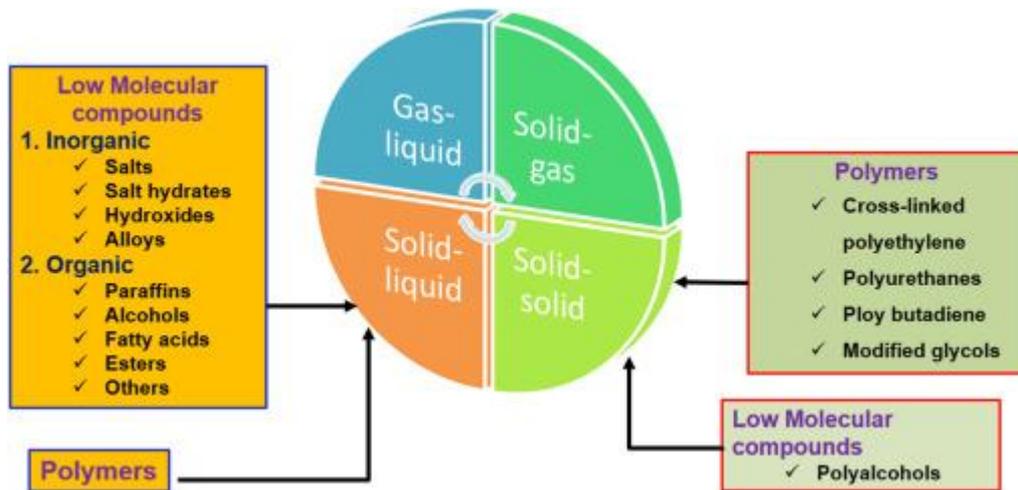


Figura 33. Clasificación de materiales de cambio de fase

[Fuente: Das et al.]

Los sistemas fotovoltaicos híbridos con materiales de cambio de fase funcionan de la siguiente manera: el material empleado se va calentando y cuando llega a la temperatura de cambio de fase, este sigue acumulando energía en forma de calor latente, a temperatura constante, hasta que se produce todo el cambio de estado y cuando la fuente de energía solar no está disponible, el material comienza a ceder el calor acumulado, retornando a su estado inicial. Logrando de esta manera extender el tiempo de trabajo de transformación de la energía. Los requisitos de tiempo y temperatura para la fusión dependen del calor latente de fusión y la conductividad térmica del PCM. La capacidad de almacenamiento de energía térmica del PCM viene dada por la siguiente ecuación:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_p dT + ma_m \Delta H_m + \int_{T_m}^{T_f} mc_p dT$$

dónde a_m es la fracción de PCM fundido, ΔH_m calor de fusión (J / kg)

El PCM adecuado para enfriar el módulo fotovoltaico debe tener un alto calor latente de fusión, alta conductividad térmica, ser químicamente estable, no corrosivo para los materiales de construcción, no tóxico, con un punto de fusión entre la temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico y el subenfriamiento mínimo. Los compuestos orgánicos son prometedores como PCM de baja temperatura que son adecuados para enfriar módulos fotovoltaicos, ya que cumplen todos los criterios mencionados anteriormente. Una de las tareas más desafiantes es garantizar una alta conductividad térmica del PCM para tener un alto coeficiente de transferencia de calor.

Multitud de investigadores han intentado mejorar la conductividad térmica del PCM mediante la aplicación de aletas y limaduras metálicas. Huang et al. [48] informó que el espaciado de las aletas y la altura son importantes ya que influyen en la temperatura de la superficie fotovoltaica.

La formación de cavidades en PCM durante el intercambio de calor causa un problema adicional ya que aumenta la resistencia térmica. Además, también se ha informado de la expansión debido a la cavidad y la fuga de PCM. Dado que el PCM se incendia fácilmente, es necesario adoptar medidas de prevención de incendios mientras se utilizan estos materiales, por lo que algunos de los investigadores utilizaron retardadores de fuego con PCM. A parte de estos problemas, la aplicación de PCM en PVT resultó prometedora. Algunas de las publicaciones en las que los autores utilizaron PCM con sistemas PVT se presentan en la Tabla 5 junto con las propiedades térmicas de PCM.

			Propiedades térmicas del PCM utilizado			
Autor	Técnica utilizada	Tipo de PCM	T _{mp} [°C]	h _f [Jkg ⁻¹]	K [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	C [kJkg ⁻¹ K ⁻¹]
Preet et al. [49]	Sistema PVT-PCM con tubos de cobre con aletas unidas a la placa absorbente de aluminio.	RT-30 (parafina)	28	222	0,2	2.4
Resultados reportados		Se ha informado que hay un aumento del 300% en la eficiencia eléctrica del sistema PV T-PCM en comparación con el módulo PV convencional a 0.031 kg /s de caudal de agua				
Browne et al. [50]	PVT con intercambiador de calor con PCM integrado y flujo de termosifón.	Cáprico: ácido palmítico	17,7-22,8	189-191	0,143	1,65
Resultados reportados		Con cáprico: PCM de ácido palmítico incrustado debajo del panel fotovoltaico, la temperatura del agua en la salida fue de 5,5 ° C más en comparación con el sistema PVT sin PCM. Aumenta en siete veces la producción de energía térmica del sistema PVT con PCM en comparación con el sistema sin.				
Stropnik y Strith [51]	Modificación del panel fotovoltaico con PCM	RT28HC (parafina)	28	245	0,2	2
Resultados reportados		El uso de RT28HC puede reducir la temperatura de las células fotovoltaicas de 75,5 ° C a 44 ° C.				
Park et al. [52]	PCM acoplado a la parte posterior del módulo fotovoltaico colocado entre placas de aluminio.	Parafina	25	184	0,2	2.1
Resultados reportados		Se ha informado que la eficiencia eléctrica aumentó en un 3% debido al uso de PCM en comparación con el panel fotovoltaico sin PCM.				
Atkin y Farid [53]	Grafito infundido con PCM con un disipador de calor externo con aletas	RT40 (parafina)	40	180	0,25	2.5
Resultados reportados		El uso de aletas y PCM con infusión de grafito reduce la temperatura de la superficie del panel fotovoltaico en 19 °C.El disipador de calor (aumenta la eficiencia general en un 12%)				
Hasan y col. [54]	Paneles fotovoltaicos con PCM y aletas internas en la parte trasera con dos PCM diferentes probados en Vehari (Pakistán) y Dublín	Eutéctico de ácido cáprico-palmítico (PCM1)	22,5	173	0,14	2

	(Irlanda)	Cloruro de calcio hexaidratoad $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (PCM2)	29,8	191	1,08	1,4
Resultados reportados		Se puede ahorrar más energía en el clima cálido de Vehari que en el clima más frío de Dublín				
Maiti et al. [55]	Aprovechamiento de la radiación en V-canal limitando la temperatura del módulo fotovoltaico.	Parafina	57	255	0,3	2,73
Resultados reportados		La temperatura del módulo fotovoltaico se puede mantener entre 60 y 65 ° C durante periodos prolongados y se logra una ganancia de potencia total del 55% gracias a la autorregulación de la temperatura de la superficie del panel fotovoltaico mediante parafina.				

Tabla 5. Publicaciones de estudios de PVT con PCM

El uso de materiales de cambio de fase para el manejo termodinámico es una de las áreas de investigación prometedoras. La aplicación de PCM tiene muchas ventajas, como el mantenimiento de una alta eficiencia de conversión fotovoltaica al proporcionar un efecto de enfriamiento y almacenamiento de energía térmica que se puede usar en horas no soleadas. Aunque PCM tiene baja conductividad térmica, existen métodos disponibles para mejorar su conductividad térmica. Se han realizado esfuerzos para mejorar la conductividad térmica del PCM. El grafito infundido junto con la configuración con aletas del conjunto del absorbedor térmico mejora significativamente la eficiencia eléctrica del panel fotovoltaico. La parafina es el material de almacenamiento de calor más adecuado para aplicaciones de baja temperatura debido a su bajo costo y disponibilidad. Una mezcla de diferentes parafinas con diferentes puntos de fusión para la regulación de la temperatura del panel fotovoltaico es adecuada para la regulación de la temperatura de su superficie. El uso de PCM en PVT resulta útil para zonas climáticas cálidas. Se han realizado muchos trabajos de investigación en Irlanda, Alemania, Corea del Sur, India y algunos países de Oriente Medio en esta área. PVT basado en PCM tiene un inmenso potencial para integrarse en las fachadas de edificios y para satisfacer la carga de calefacción de los edificios.

4.1.4 PV / T con nanofluido

Los nanofluidos también pueden servir como refrigerantes en los sistemas PVT, debido a la solidez de las propiedades ópticas y las propiedades térmicas más versátiles que los fluidos puros. La baja transferencia de calor observada con los fluidos usados tradicionalmente como el agua o el aire obligó a los investigadores a utilizar aditivos sólidos para los fluidos.

Pero el tamaño de la partícula siempre juega un papel crítico en la aplicación de nanofluidos para aplicaciones de energía solar. Se informa que los fluidos con partículas de tamaño micrónico causan erosión en los equipos de transferencia de calor y precipitan su inhabilitación. Michael e Iniyam [56] informaron que el efecto de desgaste por fricción de los nanofluidos depende del material de las superficies metálicas con las que impactan. Se ha reportado que la erosión en el aluminio es mayor en comparación con el cobre y casi insignificante en el acero inoxidable.

En los últimos años, se ha llevado a cabo una cantidad creciente de investigaciones para estudiar los efectos de diferentes nanofluidos como refrigerante en aplicaciones solares fotovoltaicas. Generalmente, los sistemas PVT aplican nanofluidos en dos formas, ya sea como refrigerante o como filtro espectral.

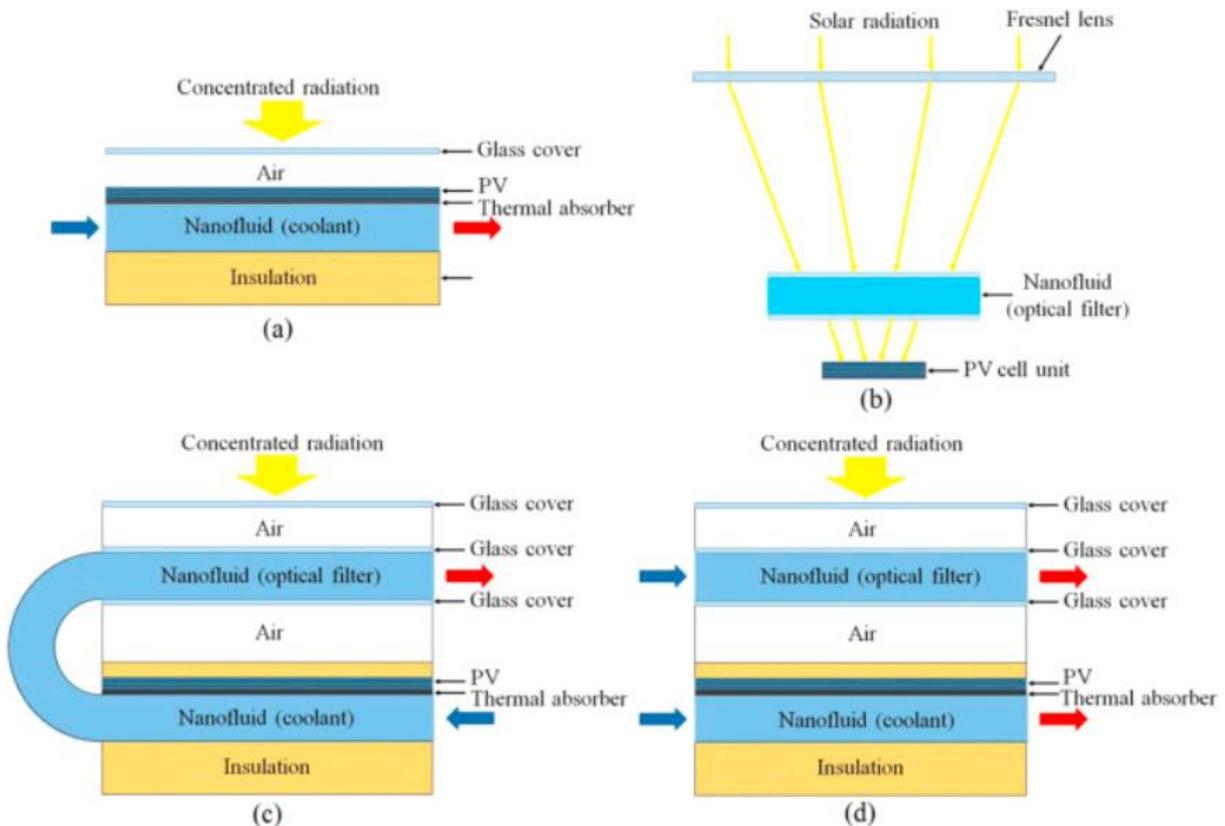


Figura 34. Esquema del sistema PVT con nanofluido como (a) refrigerante, (b) filtro espectral, (c) refrigerante y filtro espectral con canal de doble paso y (d) refrigerante y filtro espectral con canales separados

[Fuente: Yazdanifard et al.]

Varios investigadores han estudiado los diferentes tipos de geometrías, microcanal, configuración de lámina y tubo, canal rectangular simple y canal en forma de serpentina, para investigar el efecto de los nanofluidos en el enfriamiento de sistemas PVT.

Khanjari et al. [57] estudió $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{agua}$ y Ag/agua en un sistema PVT de lámina y tubo. Indicaron que en el caso del nanofluido Ag/agua , la energía del sistema y la eficiencia exergética mejoran más. También revelaron que la concentración de nanopartículas tiene un efecto positivo en la eficiencia energética y exergética general, mientras que la velocidad del fluido disminuye ambas.

Ghadiri et al. [58] estudió la aplicación del ferrofluido de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{agua}$ en un sistema PVT de lámina y tubo y probó el sistema en condiciones de campo magnético alterno constante y sin campo. Sus resultados expusieron que el uso del ferrofluido en un campo magnético alterno puede mejorar la eficiencia energética y exergética en comparación con otras condiciones.

Elmir et al. [59] informó que el uso de nanofluido de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{agua}$ que fluye dentro de un solo canal rectangular en el sistema PVT aumenta la tasa de transferencia de calor, en consecuencia, reduce la temperatura de PV, lo que a su vez conduce a un rendimiento adecuado.

Michael et al. [60] construyó los sistemas PVT vidriados y no vidriados, en los que el absorbedor era cobre laminado y el nanofluido Cu/agua como refrigerante fluía dentro de un solo canal rectangular. Se concluyó que el uso de Cu/agua en lugar de agua pura, junto con el acristalamiento del sistema,

reduce la eficiencia eléctrica, pero mejora la eficiencia térmica.

Xu y Kleinstreuer [61], [62] estudiaron el flujo de Al_2O_3 /agua a través de un único canal de flujo rectangular en un sistema CPVT. Indicaron que el nanofluido empleado mejora la eficiencia eléctrica y general, mientras que la eficiencia térmica no varía significativamente. Además, expresaron que el aumento de la concentración de nanopartículas mejora la eficiencia eléctrica, y la reducción de la temperatura de entrada da como resultado una mayor salida eléctrica.

Al-Shamani et al. [63] examinó TiO_2 /agua, SiO_2 / agua y SiC /agua como refrigerante en un sistema PVT que contiene un diseño de absorbedor en forma de serpentina con sección transversal rectangular. Llegaron a la conclusión de que el nanofluido de SiC / agua conduce a la mayor eficiencia general.

Tang y Zhu [64] indicaron que el uso de Al_2O_3 /agua en lugar de agua aumenta la eficiencia térmica y general, debido a una mejor característica de calor de los nanofluidos en comparación con el agua, mientras que la eficiencia eléctrica disminuye debido a una mayor absorción de luz visible por los nanofluidos.

Rejeb et al. [65] evaluaron el rendimiento de una lámina y un tubo PVT con cuatro tipos de nanofluidos que contienen nanopartículas de Al_2O_3 o Cu mezclados con agua o fluidos a base de etilenglicol en tres ciudades de Lyon (Francia), Mashhad (Irán) y Monastir (Túnez). Sus resultados especificaron que los nanofluidos a base de agua son más eficientes en comparación con los nanofluidos a base de etilenglicol, donde la caja de Cu / agua logró el mejor rendimiento térmico. Además, el sistema PVT produjo una mayor producción eléctrica en la ciudad de Monastir.

La Tabla 6 resume el porcentaje máximo de mejora de la eficiencia eléctrica, térmica y general de los sistemas PVT mediante el uso de nanofluidos como refrigerante en lugar de fluido base, obtenido de la literatura explicada anteriormente. La mayor mejora en la eficiencia eléctrica, térmica y general corresponde al SiC /agua, Cu / EG y Fe_3O_4 /agua, respectivamente.

Autor	Nanofluido y concentración	Aumento de la eficiencia eléctrica (%)	Aumento de la eficiencia térmica (%)	Aumento de la eficiencia global (%)
Khanjari et al. [57]	Ag / agua (10 % en volumen)	3.9	12.43	11.54
	Al_2O_3 / agua (10 % en volumen)	1,83	4.54	4.26
Ghadiri et al.[58]	Fe_3O_4 / agua (3 % en peso)	4,93	46,29	41,80
Al-Shamani et al. [63]	TiO_2 / agua (1 % en peso)	15,73	9.36	11,89
	SiO_2 / agua (1 % en peso)	10,37	3,98	6.43
	SiC / agua (1 % en peso)	42,97	13.16	18,97

Xu y Kleinstreuer [62]	Al ₂ O ₃ / agua (4 % en volumen)	1,45	-	-
Xu y Kleinstreuer [61]	Al ₂ O ₃ / agua (5 % en volumen)	9,72	-0,04	1,49
Tang y Zhu [64]	Al ₂ O ₃ / agua (0,02 % en peso)	-3,73	57,55	29,47
Rejeb et al. [65]	Al ₂ O ₃ / agua (0,4 % en peso)	0,15	8,88	-
	Cu / agua (0,4 % en peso)	0,77	79,97	-
	Al ₂ O ₃ / EG (0,4 % en peso)	0,16	12,99	-
	Cu / EG (0,4 % en peso)	0,77	216,23	-

Tabla 6. Incremento porcentual máximo de la eficiencia energética térmica, eléctrica y general de los sistemas PVT, utilizando nanofluidos como refrigerante.

Como se mencionó anteriormente, el otro papel propuesto de los nanofluidos en los sistemas PVT es su empleo como filtro espectral (u óptico). Otanicar et al. [66] propuso aplicar un filtro óptico de base líquida en el sistema CPVT. Demostraron que la eficiencia general se puede aumentar utilizando un filtro de líquido que absorbe directamente la energía por debajo de la energía de la banda prohibida junto con el enfriamiento de la superficie posterior de la PV. También sugirieron diseñar filtros de suspensión de nanopartículas para optimizar la eficiencia general.

Hjerrild et al. [67] llevó a cabo una investigación experimental y numérica sobre un sistema PV T utilizando un filtro de nanofluido de partículas múltiples, compuesto de nanodiscos núcleo-carcasa de sílice y plata y nanotubos de carbono mezclados con agua. Según sus resultados, las nanopartículas en forma de disco contenidas en nanofluidos dan como resultado una mayor eficiencia general.

Otanicar et al. [68] examinaron utilizando filtros ópticos basados en nanofluidos y películas delgadas en un sistema CPVT, con cinco materiales de células fotovoltaicas Si, Ge, CdTe, InGaAs e InGaP. Su análisis indicó que la aplicación de un filtro a base de película delgada conduce a una mayor eficiencia general en comparación con uno a base de nanofluidos, sin embargo, el menor costo y menor grosor del filtro a base de nanofluidos los hace aún favorables.

Del mismo modo, Taylor et al. [69] que intentó optimizar el diseño del filtro óptico basado en nanofluidos para un sistema CPVT, confirmó que los filtros de nanofluidos son filtros ópticos selectivos espectralmente eficientes, compactos y potencialmente de bajo costo.

Además, varios estudios investigaron el empleo de nanofluidos tanto para el enfriamiento como para el filtrado espectral. Zhao et al. [70] optimizaron un sistema PVT con dos canales de flujo, uno encima del sistema actuaba como un filtro óptico, separado del panel fotovoltaico por una capa de aire, mientras que el otro se colocaba debajo de las celdas fotovoltaicas para enfriarlas.

También es importante los parámetros en un sistema PVT de placa plana que utiliza nanofluidos como refrigerante. En particular, los nanofluidos poseen propiedades ópticas superiores y mejores propiedades térmicas que los fluidos tradicionales de transferencia de calor. Waeli et al. [71] han estudiado el efecto de aumentar las fracciones de peso de nanopartículas de SiC en agua a diferentes temperaturas (25-60 °C) y han informado que la densidad del nanofluido aumenta al aumentar la

fracción de nanopartículas en el agua y se reduce con el aumento de temperatura. La configuración experimental desarrollada por Waeli et al. como se muestra en la Figura 34 utiliza un intercambiador y un tanque de nanofluidos separado.

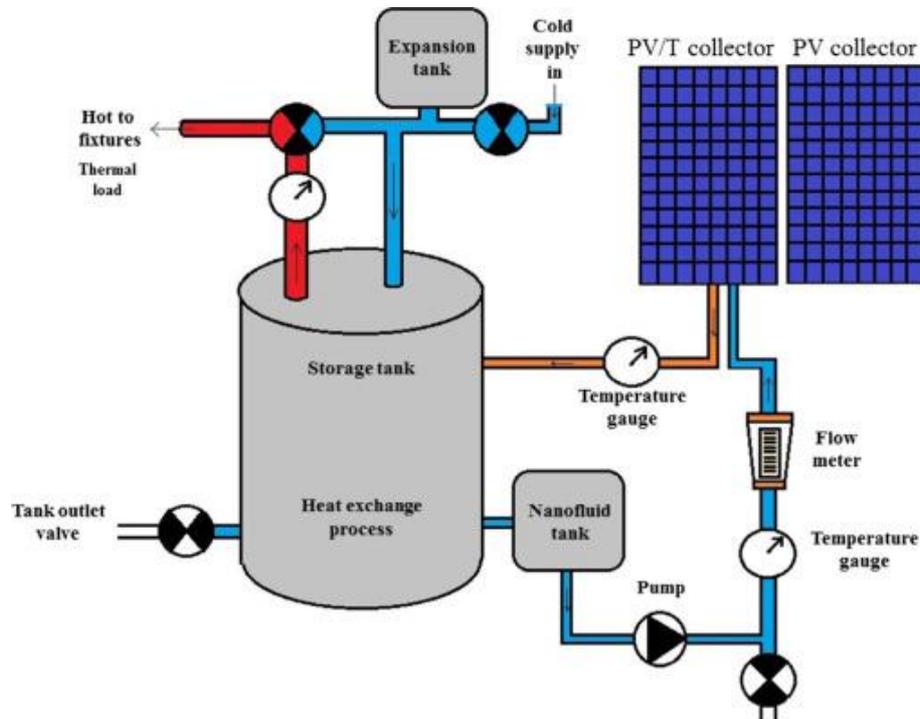


Figura 35. Diagrama esquemático de la configuración experimental desarrollado por Waeli et al. [Fuente: Waeli et al.]

Yazdanifard et al. [72] informó que, para mejorar el rendimiento del sistema, la adición de nanopartículas es más eficiente en régimen laminar que en régimen turbulento. Los resultados también indicaron que el uso de nanopartículas de mayor diámetro conduce a una mayor eficiencia energética total y exergía en el régimen turbulento, mientras que se observa un comportamiento contrario en el flujo laminar. Además, se observó que el empleo de óxido de aluminio en nanofluidos mejora el rendimiento del sistema más que el óxido de titanio. Los nanofluidos a base de agua muestran una mayor eficiencia energética y exergética en comparación con los nanofluidos a base de etilenglicol-agua.

Para que los nanofluidos se implementen con éxito para uso comercial en aplicaciones de transferencia de calor, es necesario resolver el problema de estabilidad asociado con la aplicación de nanofluidos. Cuando los nanofluidos se utilizan en aplicaciones solares, se mantienen estables durante la noche, lo que conduce a la separación tanto del nanofluido como del fluido base. Esto da como resultado la acumulación de nanopartículas en la parte inferior y reduce la conductividad térmica del nanofluido en su conjunto. Para evitar esta situación, se recomienda una unidad de agitación adicional siempre que se coloquen nanofluidos en tales aplicaciones. A partir de la bibliografía examinada se ha descubierto que los nanofluidos basados en SiC se pueden utilizar eficazmente como fluido de transferencia de calor en PVT.

4.1.5 Sistema PVT enfriado por caloducto

No se recomienda el uso de un sistema colector PVT de tipo agua tradicional en regiones frías porque a muy bajas temperaturas se produce la congelación del agua y hay un aumento considerable de volumen, lo que da lugar a daños en el sistema. Un caloducto o tubo termosifón bifásico es un sistema

con una conductividad térmica muy alta que permite un transporte rápido de calor sin ningún descenso significativo de temperatura. Se puede evitar la congelación seleccionando cuidadosamente el fluido de trabajo. Por lo tanto, un caloducto y un colector solar se pueden integrar juntos para formar un sistema PVT de tubo de calor.

Se han realizado varios estudios experimentales y numéricos sobre colectores solares térmicos basados en caloducto. Como el de Hammad [73] que estudió los colectores térmicos de tubería de calor de placa plana e informó que la eficiencia térmica de un colector de tubería de calor es comparable a la de un colector solar enfriado por agua.

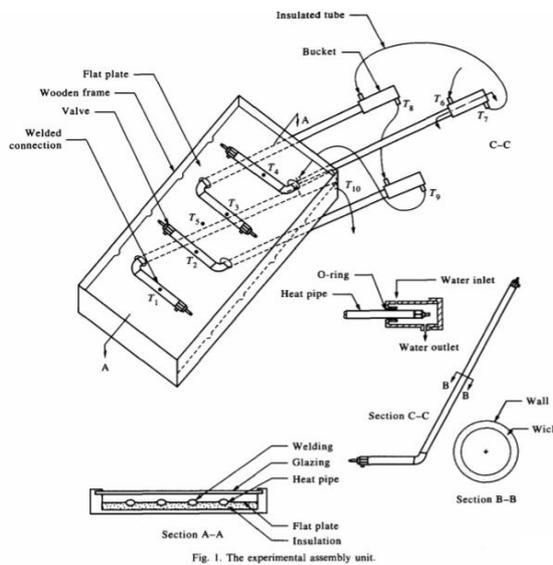


Figura 36. PVT enfriado por caloducto.

[Fuente: Hammad.]

Moradgholi et al. [74] desarrollaron y estudiaron un sistema de tubería de calor PVT utilizando metanol como fluido portador del calor en diferentes condiciones climáticas. Informaron que el disipador equipado con el caloducto puede reducir sustancialmente la temperatura del panel fotovoltaico (hasta 15 °C).

Wu et al. [75] estudiaron un sistema PVT con filas de tubos de calor que tienen el mismo diámetro para las secciones del evaporador y del condensador acopladas con el módulo PV. Se informa que las eficiencias eléctrica, exérgica y térmica global son del 8,45% y 10,26%, 63,65% respectivamente.

Hu et al. [76] informaron que el ángulo de inclinación afecta significativamente la eficiencia térmica del caloducto equipado con sistema PVT y observaron un rendimiento térmico deficiente cuando el ángulo de inclinación se mantiene por debajo de 20°, mientras que el rendimiento térmico del tubo de calor de malla de alambre no se ve mucho afectado por la variación en los ángulos de inclinación.

Wang et al. [77] analizaron un sistema PVT integrado de construcción basado en tubos de calor simulado y propuesto con los cables metálicos llenando el espacio entre los tubos de calor con aletas y la capa de aislamiento. Ellos informaron que la temperatura del agua en el tanque alcanza el máximo de 53,83 °C para el valor de radiación solar simulado de 900 W/m² y el caudal de agua de 200 l/h. para la radiación solar simulada de 900 W/m² y caudal de agua de 200 l/h. Una eficiencia térmica máxima del 44,04% corresponde a la radiación solar simulada de 300 W/m² y reportó un caudal de agua de 200 l/h.

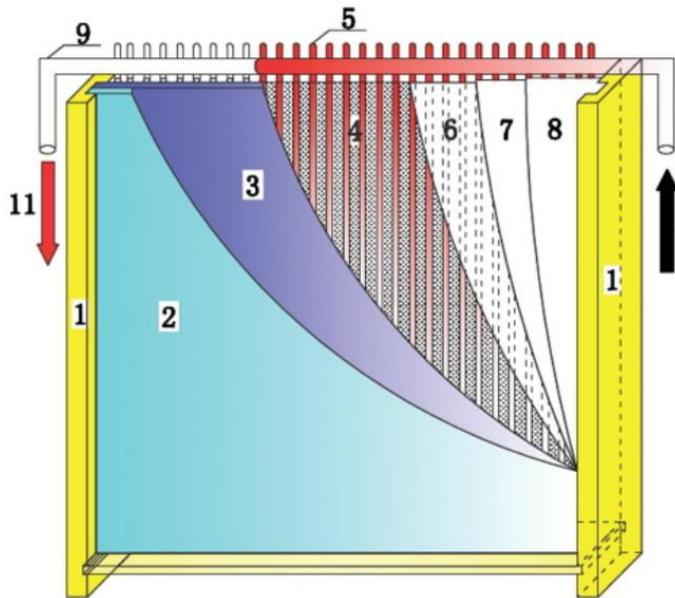


Figura 37. Esquemática PVT enfriado por caloducto.

1. Marco de madera
2. Cubierta de cristal de placa plana
3. Panel PV
4. Espacio con alambres de metal
5. Caloducto
6. Aletas de tipo U
7. Material aislante
8. Placa de cubierta trasera
9. Tubería de agua
10. Conducto agua fría
11. Conducto agua caliente

[Fuente: Wang et al.]

Jouhara et al. [78] desarrollaron energía solar con caloducto y reportaron un aumento del 15% en la eficiencia eléctrica del módulo fotovoltaico en comparación con el sin acoplamiento del tubo de calor al módulo fotovoltaico debido al enfriamiento homogéneo facilitado por los tubos de calor.

Gang et al. [79] desarrollaron un modelo dinámico del sistema PVT basado en tubos de calor y lo validaron experimentalmente. Informaron eficiencias energéticas y exergéticas de 51,5% y 7,1%, respectivamente.

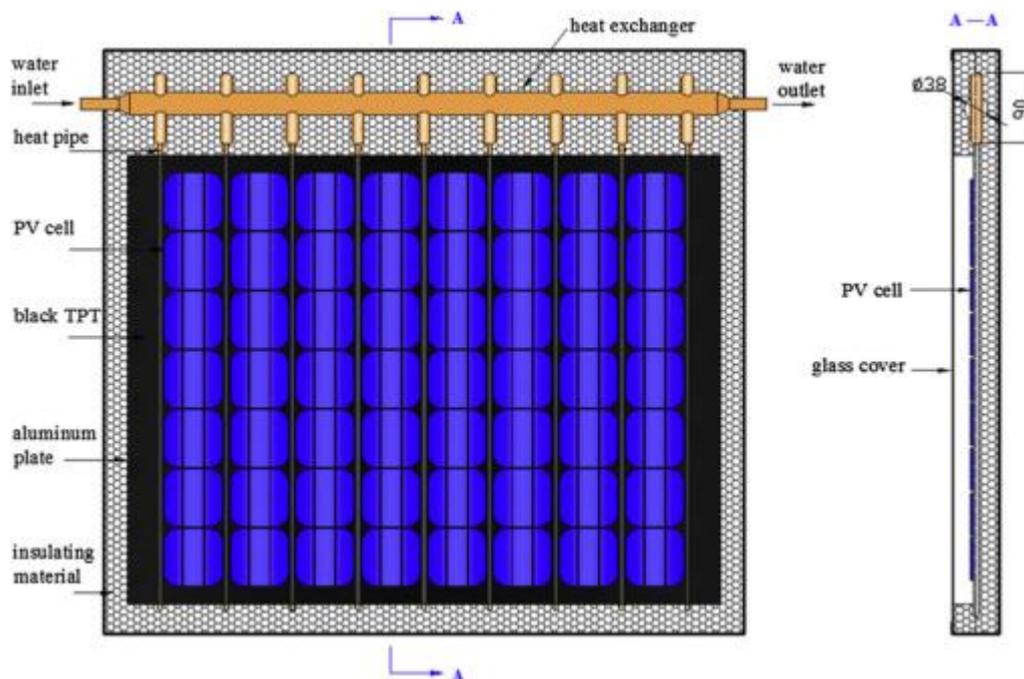


Figura 38. Caloducto acoplado a una placa PVT.

[Fuente: Gang et al.]

Chen et al. [80] informó que la combinación de un sistema PVT basado en caloducto y bomba de calor puede mejorar significativamente el rendimiento del sistema. La producción de energía térmica del sistema aumenta con el aumento de la irradiación solar, mientras que la eficiencia exergética y

la eficiencia energética general disminuyen. El mismo efecto se reporta con el aumento de la temperatura ambiente. Pero, al aumentar el factor de empaquetamiento del módulo fotovoltaico, se produce una disminución de la eficiencia térmica, pero aumenta la producción eléctrica. Una de las conclusiones importantes que los autores han extraído de su trabajo es que el paso del tubo de calor afecta la eficiencia del sistema.

Los trabajos sobre la integración de la tubería de calor a un colector PVT son muy pocos y la mayoría de las investigaciones se realizan en China. De la revisión, es evidente garantizar que el líquido de trabajo se transmita de manera equitativa sobre la superficie del evaporador. También es importante señalar que la selección del fluido de trabajo en el caloducto juega un papel crucial en el funcionamiento de la tubería de calor. Para regiones más frías, la selección del fluido de trabajo viene dictada por el valor del punto de congelación, se prefiere un fluido con un punto de congelación más bajo.

4.2. Sistemas PVT concentrados

Colector cilindro-parabólico (CPVT) está compuesto por un concentrador parabólico de material reflectante, estructura de soporte, sistema de seguimiento, tubo receptor de metal vidriado ajustado en el foco del concentrador y fluido de trabajo que lo atraviesa. Karathanassis et al. [81] realizaron un modelo dinámico teórico para demostrar el impacto de varios componentes del sistema geométrico, materiales y parámetros funcionales en el desempeño energético y exergético de un sistema PVT cilindro-parabólico. Se estableció que el rendimiento exergético del sistema está influenciado principalmente por la calidad óptica del cilindro parabólico y la eficiencia eléctrica del módulo fotovoltaico. El aumento de estos dos factores a valores alcanzables, por ejemplo, $\eta_{opt} = 0,75$ y $\eta_{el} = 0,25$, puede producir un aumento de la eficiencia exergética del sistema del 12% al 24%.



Figura 39. Fotografía del prototipo del sistema CPVT de Karathanassis et al.

[Fuente: Karathanassis et al.]

Calise y Vanoli [82] diseñaron y establecieron el modelado térmico de un novedoso sistema PVT de concentración. El sistema está compuesto por un colector cilindro-parabólico y un receptor triangular que contiene un canal de fluido, dos capas fotovoltaicas frente al concentrador y un absorbedor en la parte superior del receptor. Además, Valizadeh et al. [83] realizaron un modelado térmico para evaluar el rendimiento exergético del sistema estudiado por Calise y Vanoli [82]. El modelado térmico desarrollado se simula variando varios parámetros de diseño como el diámetro del canal, la velocidad del fluido, el ancho

del receptor, la longitud del colector y las condiciones de contorno como la temperatura de entrada del fluido, la temperatura ambiente y el haz de luz incidente.

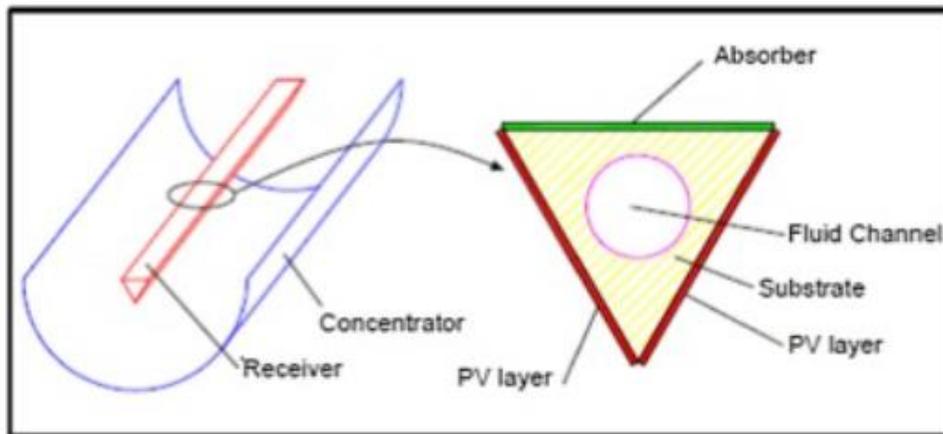


Figura 40. Sistema PVT de cilindro parabólico investigado por Calise y Vanoli

[Fuente: Calise y Vanoli]

Yazdanifard et al. [84] llevaron a cabo el modelado térmico en el sistema PVT de colector parabólico-cilíndrico para estudiar su rendimiento energético y exergético en flujos laminares y turbulentos. El modelado térmico se validó utilizando resultados experimentales existentes en la literatura y luego se utiliza para investigar el efecto de la relación de concentración, el diámetro de la tubería y la longitud en el rendimiento del sistema estudiado. Los resultados mostraron que aumentar la longitud de la tubería de 0,5 a 5 m disminuye la eficiencia energética total en aproximadamente un 9,33% en el régimen laminar y un 1,09% en el régimen turbulento, mientras que aumenta la eficiencia exergética total en aproximadamente un 33,65% y un 10,37% en el régimen laminar y turbulento, respectivamente.

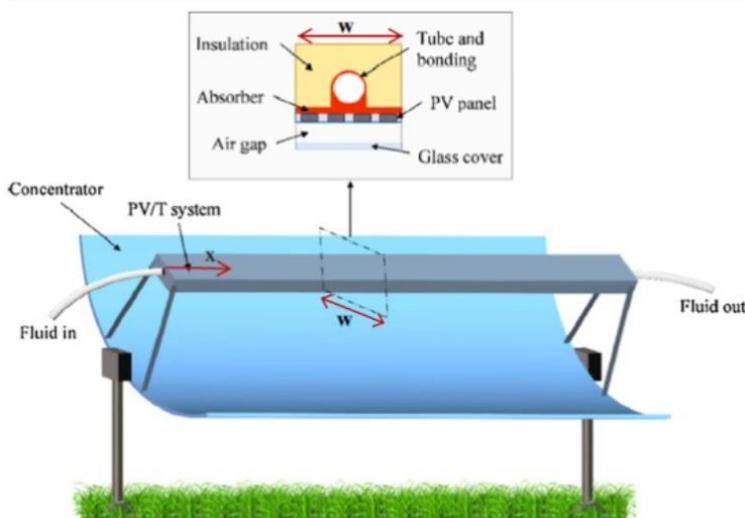


Figura 41. Sistema PVT de canal parabólico investigado por Yazdanifard et al

[Fuente Yazdanifard et al]

Los colectores compuestos parabólicos (CPC) se componen de dos concentradores parabólicos de encuentro, cubierta transparente desde la parte superior, absorbedor y aislamiento alrededor de los conductos de fluido. Hay dos tipos principales de concentradores parabólicos compuestos que son: simétricos y asimétricos. Además, se utilizan dos tipos de amortiguadores: tipo aleta con tubo y absorbentes tubulares. Lu et al. [85] diseñó y desarrolló un sistema de concentrador fotovoltaico parabólico compuesto asimétrico integrado de

fachada de edificio (BFI-ACPPV). Se realizó una prueba interior completa para evaluar el rendimiento eléctrico y térmico del sistema, así como los parámetros que influyen en la potencia de salida del sistema. Se observó, a partir de los resultados experimentales, que la producción de energía por unidad de área de celda solar se incrementa en un factor de dos al utilizar el sistema BFI-ACPPV en comparación con el sistema fotovoltaico convencional.

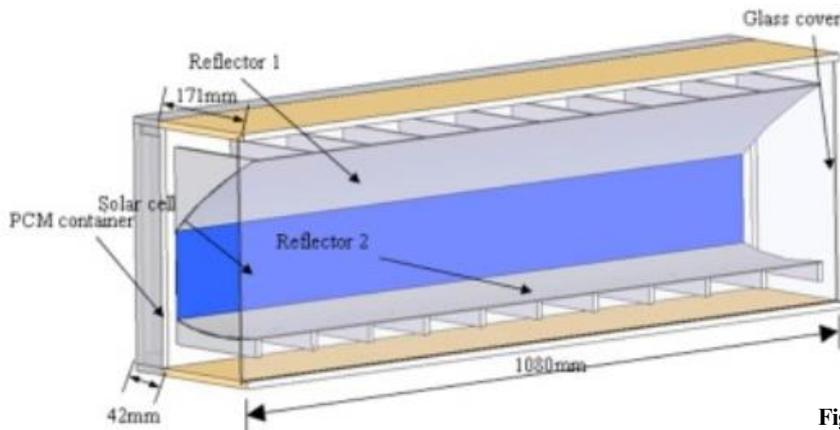


Figura 42. Sistema BFI-ACPPV

[Fuente: Lu et al]

Jaaz et al. [86] revisaron los diversos tipos de sistemas PVT de concentrador parabólico compuesto, incluidos los beneficios y las barreras del diseño. Los autores compararon los materiales utilizados, el rango de ángulo de aceptación, la tolerancia óptica y la eficiencia.

Tiwari et al. [87] investigaron y analizaron los parámetros operativos de un PVT-CPC totalmente cubierto basado en la aplicación del balance energético en cada parte del sistema. El sistema se compone principalmente de células solares, placa amortiguadora, concentrador y fluido en movimiento. El rendimiento del sistema se comparó con PVT-FPC, placa plana convencional-CPC y convencional FPC. Se concluyó que el concentrador parabólico compuesto PVT y el PVT-FPC son apropiados para su uso en un sistema de refrigeración por absorción. Además, en 2020 Tiwari et al. [88] llevaron a cabo una investigación con un sistema híbrido de absorbedor inverso parcialmente cubierto PVT-CPC. El objetivo de este estudio fue mejorar el rendimiento del sistema para compensar la creciente demanda de energía y aliviar los problemas ambientales. La temperatura de salida del colector, la eficiencia térmica y exergética combinada y la ganancia de calor en el evaporador se evaluaron para diferentes relaciones de concentración. Se observó que a las 13:00 horas y para una relación de concentración igual a seis, la temperatura de salida del colector, la ganancia de calor, la eficiencia térmica combinada y la eficiencia exergética más altas fueron 125,45 ° C, $3,21 \times 10^5$ W, 7,8% y 14,38% respectivamente.

El colector disco-parabólico consta principalmente de un plato parabólico, un amortiguador, un tubo flexible y un eje de seguimiento. El plato parabólico está formado por espejos reflectantes que dirigen la luz solar hacia el receptor que es un recipiente con agua. Sharaf y Orhan [89] diseñaron y analizaron el desempeño óptico y termodinámico de dos configuraciones de PDC-PVT: configuraciones térmicas en paralelo y en serie. Se concluyó que el diseño térmicamente paralelo proporciona importantes salidas eléctricas y térmicas y es favorable para aplicaciones que requieren simultáneamente alta electricidad y energía térmica de temperatura. Por otro lado, la configuración en serie térmica es menos flexible y es adecuada para aplicaciones de energía térmica a baja temperatura.

Buonomano et al. [90] diseñaron y analizaron el rendimiento termodinámico de un sistema PVT de plato parabólico que se compone principalmente de concentrador de plato parabólico, capa fotovoltaica y canal de fluido, sustrato metálico y aislamiento térmico. Los autores realizaron y simuló un modelo matemático que permite calcular la temperatura de los componentes principales del sistema y los principales flujos de energía como la energía térmica y eléctrica útil y las pérdidas por convección y por radiación.

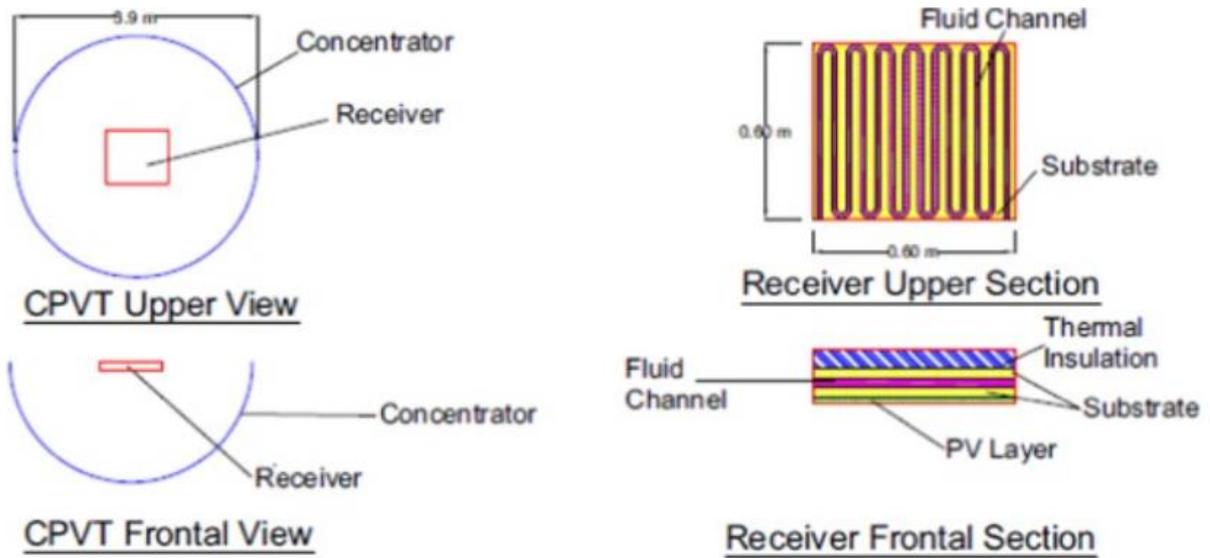


Figura 43. Colector PVT de plato parabólico investigado por Buonomano et al.

[Fuente: Buonomano et al]

Renno y Petito [91] implementaron un modelo teórico de un sistema PVT de plato parabólico que tiene como objetivo dimensionar el sistema y evaluar su funcionamiento térmico y eléctrico para proporcionar refrigeración, calefacción y electricidad a aplicaciones domésticas.

Un reflector lineal de Fresnel (LRF) está compuesto por una serie de espejos lineales que siguen el sol, un tubo receptor que se fija en la parte superior de una torre y un fluido caloportador. Renno y Petito [92] realizaron análisis experimentales y teóricos sobre el sistema lineal Fresnel PVT para evaluar los parámetros eléctricos, así como los parámetros térmicos como el factor de concentración, la temperatura del fluido y la temperatura de la celda en distintas condiciones de operación. El objetivo de este análisis es calcular la energía potencial generada por el sistema estudiado. La Figura 41 muestra un esquema del sistema estudiado.

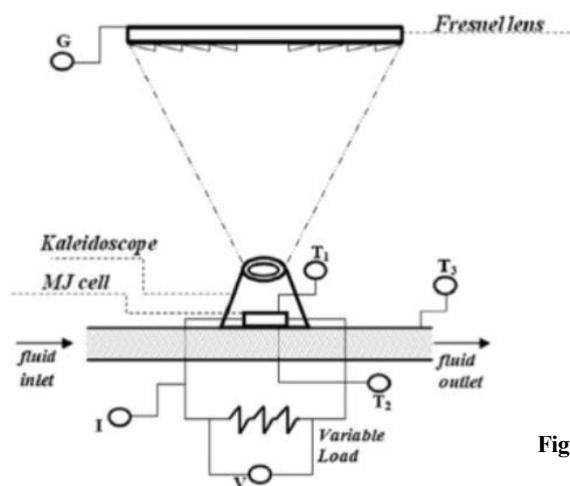


Figura 44. Sistema PVT de lente Fresnel

[Fuente Renno y Petito]

Karimi et al. [93] analizaron el rendimiento de un sistema termosolar y un sistema fotovoltaico híbrido utilizando una lente Fresnel lineal concentrada. Los resultados mostraron que la eficiencia total de los sistemas puro y PVT alcanzó el 46,6% y el 53% respectivamente.

Sonneveld et al. [94] desarrollaron y probaron un sistema PVT de lente Fresnel lineal con invernadero para agricultura. Los resultados revelaron que la electricidad generada era un 2% mayor que la energía consumida por el sistema de seguimiento. Se obtuvo que las eficiencias térmica y eléctrica del sistema son 56% y 11% respectivamente.

La Tabla 7 presenta un resumen de los resultados respecto a la eficiencia de los estudios planteados anteriormente.

Autor	PVT concentrado	Condiciones de operación	Rendimiento		
			Térmico	Eléctrico	Total
Sonneveld et al. [94]	Fresnel	Radiación solar de 630 W/m ² y 792 W/m ²	56%	11%	67%
Calise y Vanoli [82]	Cilindro parabólico	Temperatura del agua de entrada de 70 ° C Temperatura ambiente y del cielo de 25 ° C Velocidad del viento de 5 m/s Radiación total 1000W/m ² Radiación del haz 800 W/m ²	56% -63%	20% -23%	77% - 83%
Buonomano et al. [90]	Plato parabólico	Temperatura del fluido de entrada de 150 ° C Temperatura ambiente y del cielo de 25 ° C Velocidad del viento de 5 m / s Radiación total 1000W/m ² Radiación del haz 800 W/m ²	27% -58%	18% -24%	45% - 82%
Renno y Petito [87]	Plato parabólico		67% -70%	19% -21%	86% - 91%
Karimi et al. [93]	Fresnel	Radiación solar de 920 W/m ² Temperatura PV 20 ° C	43,6%	14,5%	53%
Yazdanifard et al. [84]	Cilindro parabólico	Temperatura de entrada de fluido y temperatura ambiente de 25 ° C Radiación solar de 700 W/m ²	52,58% - 56,37%	7,12% - 7,94%	61% - 63,5%
Lu et al [85]	Compuesto parabólico	Intensidad de radiación incidente de 280 W/m ² Temperatura ambiente de 23,9 ° C	-	14,8%	-
Jaaz et al [86]	Compuesto parabólico	Temperatura ambiente de 33 ° C Radiación solar de 800 W/m ²	81%	13,75%	91%
Valizadeh et al.[83]	Cilindro parabólico	Temperatura ambiente de 25 ° C Temperatura del cielo de 19 ° C Velocidad del viento de 5 m/s	59% -67%	15% -22%	-

		Radiación del haz de 800 W/m ²			
		Radiación total de 1000 W/m ²			
		Temperatura del fluido de entrada de 70 °C			

Tabla 7. Resumen de los resultados respecto a la eficiencia de los estudios de sistemas PVT concentrados.

4.3. Aplicaciones

Principalmente los sistemas fotovoltaicos híbridos se utilizan con el objetivo de producir electricidad y calor. La energía térmica se puede explotar en diversas aplicaciones, como calefacción de agua, calefacción de espacios y enfriamiento, secado y desalación. La siguiente figura ilustra las principales aplicaciones utilizadas en el sistema híbrido PVT.

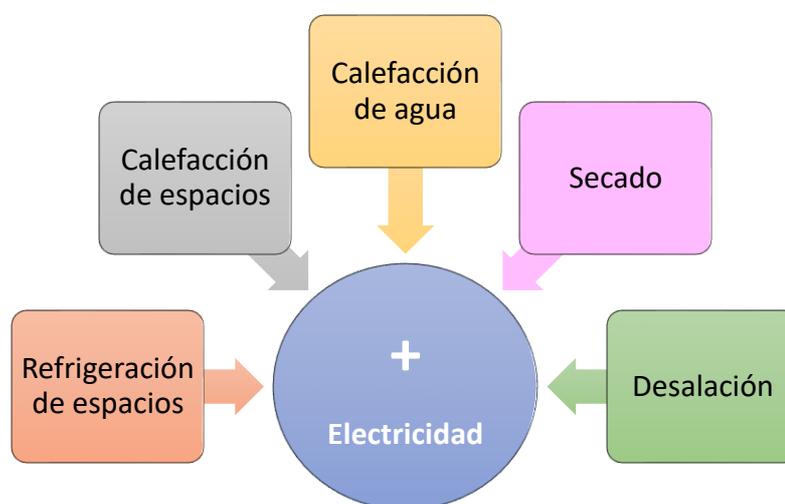


Figura 45. Principales aplicaciones utilizadas en un sistema PVT

[Fuente: Elaboración propia]

ACS es una aplicación de energía solar que aprovecha la energía térmica de la radiación solar para calentar agua con fines domésticos e industriales. Fu et al. [95] realizaron un estudio comparativo del desempeño de los sistemas PVT-ACS con la bomba fotovoltaica de acoplamiento directo, la bomba convencional y la circulación natural mediante el análisis de su desempeño mediante pruebas experimentales. Los resultados mostraron que el mejor rendimiento térmico entre los tres sistemas se logra mediante el sistema PVT con la bomba fotovoltaica. El sistema de circulación natural alcanzó una energía neta cercana a la obtenida por la bomba fotovoltaica, mientras que el sistema de bombeo convencional produjo energía mucho menos que los dos sistemas. Martin-Escudero et al. [96] establecieron un estudio para investigar el desempeño de un novedoso sistema que comprende bomba de calor acoplada a una fachada ventilada fotovoltaica. El sistema se utiliza para suministrar calefacción y agua caliente. Los autores establecieron un modelo matemático para evaluar los resultados del sistema. Kim et al. [97] implementaron un estudio que analiza el rendimiento experimental del sistema de calefacción PVT de un edificio. Se concluyó, a partir de los resultados experimentales, que las eficiencias térmica y eléctrica promedio son del 30% y 17% respectivamente. Herrando et al. [98] estableció un modelo para evaluar la sostenibilidad y el rendimiento de un sistema de calentamiento de agua PVT en una casa adosada en Londres. El modelo se simula variando varios parámetros de diseño del colector estudiado, principalmente el factor de cobertura y el caudal del colector PVT, lo que permite demostrar el rendimiento global del sistema. Se observó que para un caudal de 20 L/h y un colector completamente cubierto, el sistema PVT híbrido puede cubrir el 36% y el 51% de la demanda global anual de agua caliente y electricidad, respectivamente. Además, el sistema PVT híbrido sirve para mitigar la emisión de CO₂ durante 20 años de vida útil en 16 toneladas, que es un

36% mayor que el valor ahorrado por un sistema PV.

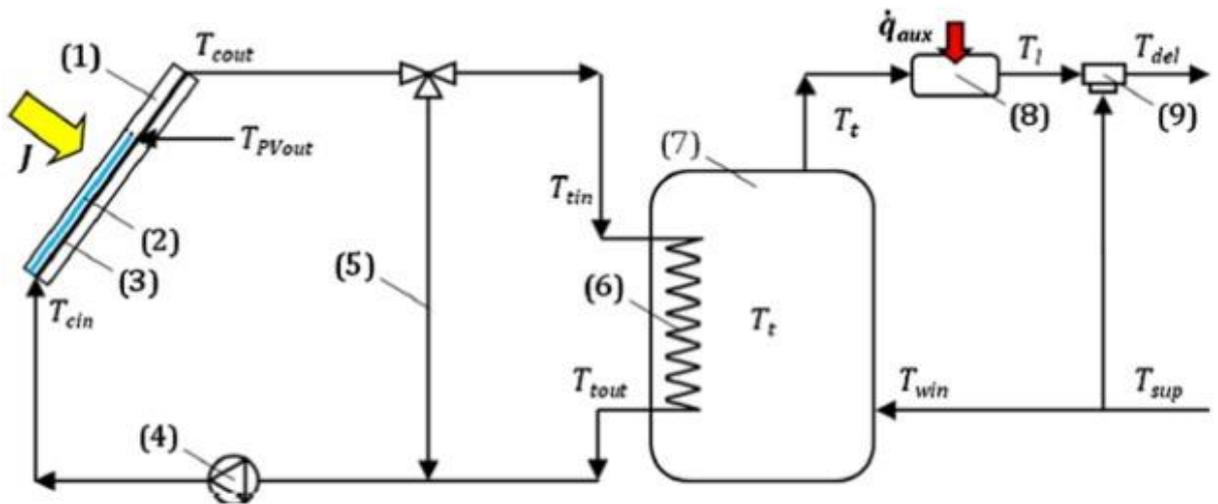
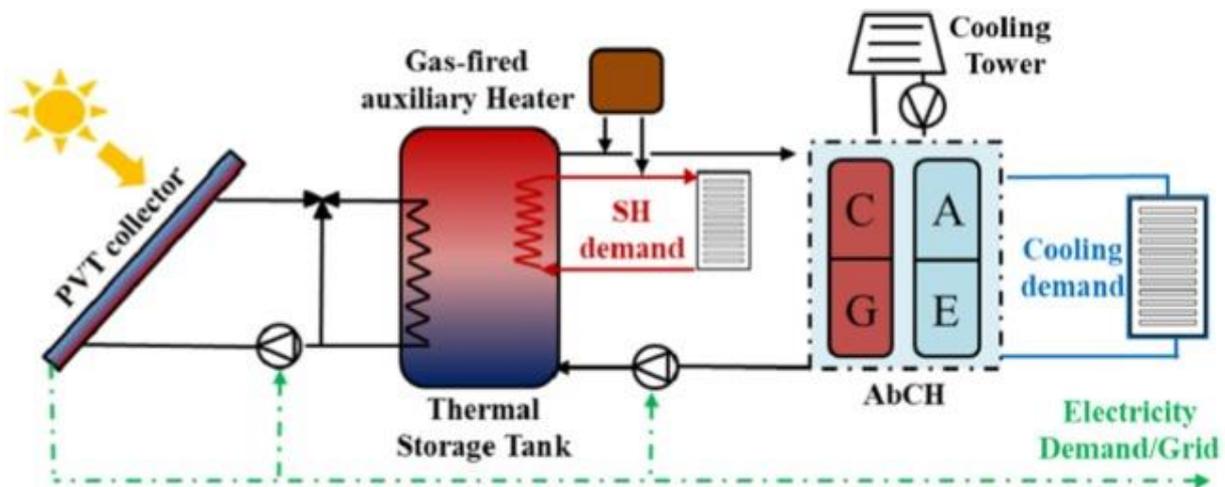


Figura 46. Sistema de agua caliente sanitaria PVT

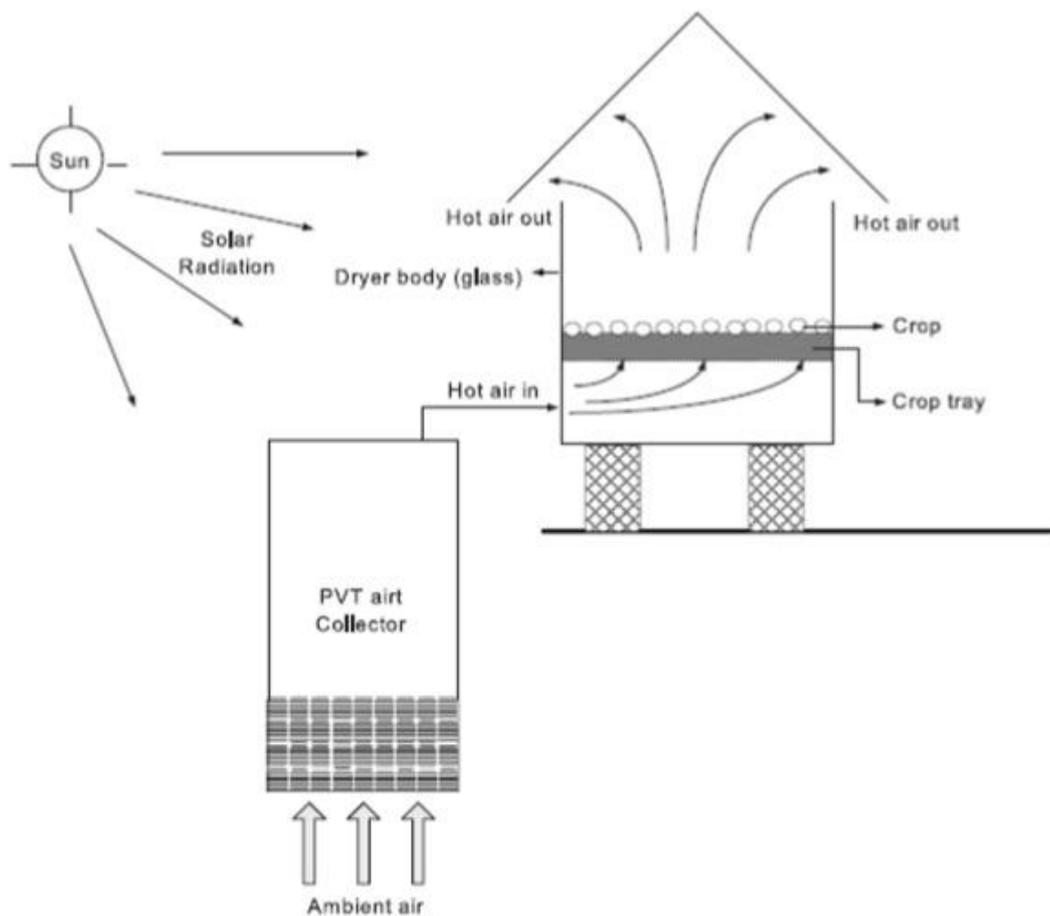
[Fuente: Herrando et al.]

La refrigeración y calefacción de espacios se refiere a la reducción o aumento de la temperatura de una habitación o espacio de trabajo al eliminar o suministrar calor. El sistema de refrigeración y/o calefacción solar incluye principalmente un colector solar, un circuito de rechazo de calor y almacenamiento de energía térmica. Alobaid et al. [99] presentaron una revisión sobre los sistemas de enfriamiento por sistemas fotovoltaicos híbridos para evaluar los últimos avances en los tipos de colectores solares utilizados en los sistemas de refrigeración. La revisión comprende trabajos previos experimentales y computacionales que estudiaron los tipos de colectores solares, sus eficiencias y rendimiento. Noro y Lazzarin [100] consideraron varios sistemas de enfriamiento distintos y realizaron un análisis para determinar el sistema más favorable. Los autores realizaron una simulación dinámica para dos climas diferentes durante el verano para evaluar los sistemas desde el punto de vista energético y económico. Herrando et al. [101] desarrollaron una metodología de modelado en el sistema fotovoltaico híbrido para la calefacción y la refrigeración y la generación de electricidad. El objetivo de esta metodología es evaluar el desempeño tecnoeconómico del sistema. Se observó que el 16,3%, 20,9% y 55,1% de las necesidades de electricidad, calefacción y refrigeración de espacios, respectivamente, del Campus Universitario de Bari, pueden ser provistas por un sistema de 1,68 MW. El período de recuperación del sistema es de 16,7 años, que es 2,7 veces mayor que el del sistema fotovoltaico tradicional, y puede reducir 911 toneladas de emisiones de CO₂ por año.



Chen et al. [102] estudiaron un novedoso sistema híbrido para refrigeración, calefacción y producción de energía utilizando colectores concentrados parabólico compuesto para optimizar y minimizar su coste termoeológico.

El secado es el proceso de transportar energía térmica desde una fuente de calor a un material y transmitir la humedad de su superficie al medio ambiente. Normalmente, el secador solar consta principalmente de un calentador de aire, una cámara de secado y un sistema de flujo de aire. Los secadores solares activos o pasivos, directos, indirectos o mixtos son las principales categorías de los secadores solares. Además, hay tres tipos principales de cámaras de secado: carpa, gabinete e invernadero. Tiwari et al. [103] llevaron a cabo un modelado térmico en el sistema de secado solar PVT de efecto invernadero. Se encontró que a un caudal másico de aire de 0,01 kg/s, la eficiencia eléctrica es de 11,26%, la térmica 26,68% y la global de 56,3%.



le espacio
ndo et al.]

Figura 48. Esquema de un secador de invernadero con un sistema PVT de aire

[Fuente: Tiwari et al.]

Fterich et al. [104] desarrollaron un secador solar PVT mixto activo. Se realizaron pruebas experimentales para examinar el rendimiento del sistema. Los resultados revelaron que la combinación de colector de aire PVT mejoró la velocidad de secado del secador solar.

La desalinización solar es una tecnología para desalinizar el agua de forma evaporativa proporcionando calor proveniente de la luz solar. Rafiei et al. [105] investigaron y analizaron el efecto de la forma del

receptor en el rendimiento del sistema de desalinización solar PVT. El sistema consta de un colector de plato parabólico, un panel fotovoltaico y una unidad de desalinización de humidificación-deshumidificación. Las tres formas examinadas del receptor son cilíndricas, cúbicas y hemisféricas. Se obtuvo que el receptor de cavidad hemisférica produce la mayor cantidad de agua dulce y la relación de salida de ganancia más baja.

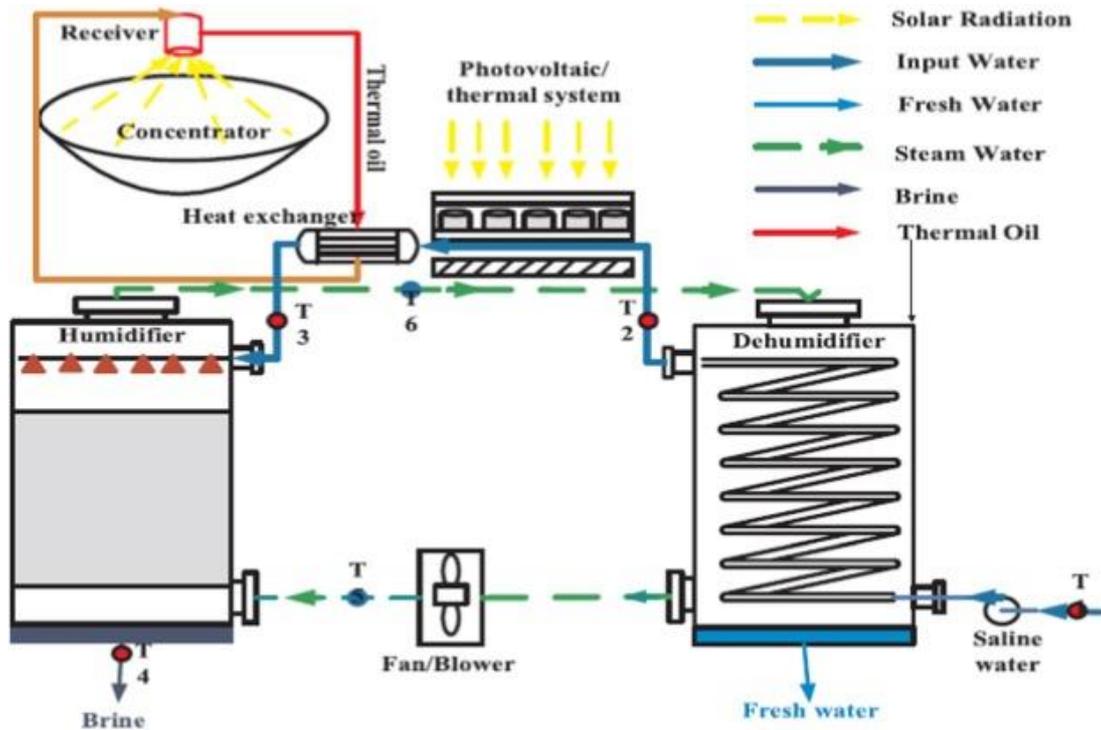


Figura 49. Esquema de un sistema de desalación PVT

[Fuente: Rafiei et al.]

Palomino-resendiz et al.[106] propusieron, construyeron y probaron un sistema de desalinización solar amalgamado con un colector PVT de lente Fresnel. Se concluyó que el uso del sistema de seguimiento solar aumenta la eficiencia del concentrador provocando un aumento de la energía térmica utilizada y acelerando así el proceso de desalación incluso en presencia de perturbaciones ambientales.

5 PVT COMERCIALIZADOS

La posición ventajosa de los módulos fotovoltaicos híbridos sobre los módulos fotovoltaicos abrió su camino a la comercialización. Tiene una amplia gama de aplicaciones, como techos residenciales, techos comerciales e industriales, estaciones de energía solar y otras aplicaciones conectadas a la red. La energía térmica producida por un módulo PVT se puede utilizar para satisfacer diferentes necesidades, por ejemplo, calefacción de piscinas, calefacción de espacios, generación de agua caliente, secado, calentamiento de procesos industriales, etc. La primera célula fotovoltaicos híbridos llegó al mercado en 1991, cuando la compañía israelí "Millennium Electric" (antes conocida como Chromagen) probó sus PVT en diferentes lugares de Israel para agua caliente y electricidad doméstica. El módulo fotovoltaico desarrollado por Millennium Electric puede entregar 340 W de energía eléctrica y 1,5 kW de energía térmica.

SolarWall, es un sistema PVT desarrollado por la empresa canadiense Conserval Engineering, ocupa el noveno lugar entre las mejores invenciones energéticas de los últimos 200 años por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME). SolarWall se integra principalmente en edificios para calentar el aire de ventilación y mejorar la calidad del aire interior. Visto desde el punto de vista de su ciclo de vida, es realmente beneficioso y su vida útil es de más de 30 años. SolarWall también recibió reconocimiento por reducir la emisión de GEI entre un 20% y un 50% como la de las opciones de carga de calefacción tradicionales. El colector SolarDuct PVT es una variante de SolarWall destinada al montaje en el techo.

SolarVenti, un sistema fotovoltaico híbrido de aire desarrollado en Dinamarca recibió comentarios satisfactorios de clientes de todo el mundo. El sistema tiene un filtro que se extiende a lo largo de la superficie interior del panel posterior, lo que hace que SolarVenti no requiera mantenimiento a largo plazo.

HYSOLAR, un producto PVT revolucionario desarrollado por el Consorcio Internacional de Energía Limpia redujo drásticamente el costo de la energía y permitió una mejor utilización del espacio del techo.

Volther Powervolt desarrollado por Solimpeks Solar Energy Corporation en Turquía informó un aumento en la producción de electricidad de al menos un 25% por año con el enfriamiento de las células fotovoltaicas. Volther Powervolt tiene un área de colector de 1.427 m² y una eficiencia eléctrica del 15,08%. Tiene una lámina posterior de aluminio gofrado con una salida de energía térmica de 630 W.

El sistema PVT de SunDrum es un sistema de placa plana, tiene una eficiencia general del 86% durante las horas pico en Massachusetts, EE.UU. Su análisis térmico muestra que los módulos híbridos son 22 ° C más fríos en comparación con el módulo fotovoltaicos convencional. El período de amortización del sistema híbrido fotovoltaico / solar de calentamiento de agua SunDrum es de 5 a 10 años, que es más largo que el sistema de calentamiento de agua solar doméstico convencional sin fotovoltaica, pero más rápido que el propio sistema fotovoltaico autónomo.

SUNSYSTEM PVT240 desarrollado en Bulgaria tiene un módulo de eficiencia eléctrica del 14,7% y una salida de energía térmica de 900 W, el sistema tiene un absorbedor térmico de cobre, utiliza propilenglicol como fluido caloportador.

La Tabla 8 presenta una descripción general de varios sistemas PVT comerciales disponibles en todo el mundo considerando parámetros como la eficiencia eléctrica del módulo, la eficiencia general, el tipo de material absorbente, el fluido de transferencia de calor utilizado, la vida útil, la cantidad de energía térmica y eléctrica generada por el sistemas.

Producto	Empresa y país	Tipo Fluido	η_{global} (%)	η_{el} (%)	Salida de energía térmica	Max. Salida de potencia	Tipo de celda solar	Material absorbente	Vida útil (años)
SolarWall	Conserval Engineering, Canadá	Aire	50	-	300–400 W/m ²	100 W/m ²	-	-	30+
Multi solar system	Millennium Electric TOU Ltd., Israel	Agua	85	15	96,85W	190 W	Monocristalino	-	25+
SolarVenti	Aidt Miljo A/S, Dinamarca	Aire	57–70	-	500 W/m ²	6–18 W	-	-	10-20
Volther Powervolt	Solimpeks Solar Energy Corporation, Turquía	Agua		15	630 W	200 W	Silicio monocristalino	Cobre	20+
SunDrum SDM100	SunDrum Solar, Estados Unidos	Agua	75	-	650 W	250 W	-	-	-
Sunsystem PVT240	New Energy System, Bulgaria	Propilen-glicol	-	14,7	900 W	240 W	Silicio policristalino	Cobre	-
DualSun Wave	DualSun	Agua		15,4	912 W	240 W	Silicio monocristalino	-	20+
TESZEUS 240P	TESZEUS, China,	Agua	-	14,6	651 W	240 W	Silicio monocristalino	Cobre / Aluminio	
FT220Cs	Fototherm, Italia	Agua	-	13,7	888 W	220 W	Silicio policristalino	-	25+
CoolPV	FAFCO, EE. UU.	Agua		16,4	996,44 W	275 W	Silicio monocristalino		30+
2Potencia	PA-ID Process GmbH, Alemania	Agua	-	16	719 W	260 W	Silicio monocristalino	-	25+

Tabla 8. Sistemas PVT comercializados.

Los sistemas fotovoltaicos híbridos no se explotan comercialmente a gran escala. Pero es comercializado con éxito por un puñado de empresas. La mayoría de las PVT disponibles comercialmente son para calefacción de espacios y suministro de agua caliente. Países como Canadá, Estados Unidos de América y Alemania, etc. han explotado la tecnología fotovoltaica híbrida de la manera más eficiente posible, empleándola en la arquitectura de edificios como paredes o techos. SolarWall y SolarVenti son dos de los productos de mayor éxito comercial, utilizados principalmente para calefacción de espacios.

6 CONCLUSIONES

Los sistemas fotovoltaicos híbridos han sido estudiados durante las últimas cinco décadas. Los estudios han sido de índole teórica, numérica y experimental en todo el mundo. En este documento se ha revisado los antecedentes y el concepto general de la tecnología fotovoltaica híbrida, y se ha profundizado sobre los últimos avances en torno a esta materia según el tipo de célula fotovoltaica y colector solar y sus aplicaciones.

La principal aplicación de estos sistemas es la producción de electricidad, además de otros fines como el secado, calentamiento de agua, calefacción y refrigeración de espacios y desalinización.

Los últimos estudios demuestran que, el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos híbridos es mejor que el de los sistemas térmicos y los sistemas fotovoltaicos individuales. Los sistemas PVT pueden cubrir la energía térmica y eléctrica requerida por la mayoría de aplicaciones.

Los sistemas fotovoltaicos híbridos han demostrado ser útiles en aquellas áreas del planeta donde durante todo el año hay una alta exposición solar y la temperatura ambiente permanece relativamente alta. Ya que algunos sistemas como los sistemas PVT basados en agua están limitadas sus condiciones de funcionamiento a baja temperatura debido a la posibilidad de congelación. Aunque se prefiere utilizar agua ya que tiene altas características térmicas en comparación con el aire. El sistema PVT a base de agua tiene mayores eficiencias eléctricas y térmicas en comparación con el sistema PVT a base de aire.

El tipo de absorbedor juega un papel importante en la explotación de la energía solar. La hoja y el tubo es la técnica de fabricación de absorbentes térmicos más dominante cuando el fluido de transferencia de calor utilizado es un líquido. El acristalamiento es adecuado para aumentar la eficiencia térmica, pero conduce a mitigar la eficiencia eléctrica del sistema. El sistema PVT sin vidriar es más favorable si se requiere una alta potencia eléctrica, mientras que se prefiere el uso de vidriado en sistemas PVT en caso de que se requiera una alta eficiencia térmica o general del sistema.

Los módulos fotovoltaicos híbridos de aire de doble paso con aletas perforadas tienen un canal inferior lleno de medios porosos son los más adecuados para mejorar tanto la eficiencia eléctrica del módulo fotovoltaico como la eficiencia térmica del módulo fotovoltaico híbrido.

Los sistemas fotovoltaicos híbridos basados en materiales con cambio de fase tiene un inmenso potencial para integrarse en las fachadas de los edificios y puede ser un área de investigación en el futuro para satisfacer la carga de calefacción de los edificios. Se ha descubierto que el PCM con infusión de grafito junto con la configuración con aletas mejoran significativamente la eficiencia eléctrica del panel fotovoltaico.

Los nanofluidos a base de SiC con una fracción de peso optimizada de nanopartículas se pueden utilizar eficazmente como fluido caloportador en PVT con una unidad de agitación adicional. El uso de nanofluidos como filtro óptico es un área de investigación que puede contribuir significativamente en la evolución de los módulos solares fotovoltaicos híbridos, ya que pueden funcionar de manera eficiente en regiones con mayor temperatura ambiente y reciben mayor irradiación solar.

En los sistemas fotovoltaicos híbridos con tuberías de calor la selección del fluido de trabajo viene dictada por el valor del punto de congelación, se prefieren los fluidos con un punto de congelación más bajo para evitar problemas de congelación cuando se instalan tubos de calor en regiones más frías.

Los sistemas PVT de tipo concentrado más utilizados son los de cilindro parabólico y Fresnel. La eficiencia eléctrica se ve afectada de manera insignificante por el tipo de colector solar.

Se prevé que los sistemas PVT serán capaces de satisfacer la necesidad de consumo de energía en un futuro próximo. Además, estos sistemas proporcionan la energía necesaria de forma limpia y respetuosa con el medio ambiente. Esto explica la importancia de tales sistemas y, por lo tanto, se deben realizar más investigaciones y estudios para mejorar y optimizar el sistema para una mayor eficiencia y menores costos.

En cuanto a las líneas futuras los investigadores han intentado aumentar el efecto de enfriamiento del módulo fotovoltaico mejorando la conductividad térmica del fluido de transferencia de calor mediante la adición de nanopartículas. Sin embargo, se observa que cuando se utilizan nanofluidos como refrigerante aparece un problema de sedimentación. Por tanto, es fundamental idear un mecanismo que reduzca este problema. También es necesario estudiar el ciclo de vida, la estabilidad y el impacto ambiental del nanomaterial utilizado debido a que las nanopartículas pierden gradualmente sus propiedades térmicas.

Como se desprende del trabajo revisado, la aplicación de materias de cambio de fase en la refrigeración de módulos fotovoltaicos es una opción popular, pero el uso de un solo PCM con un punto de fusión fijo no es suficiente para enfriar la fotovoltaica todo el tiempo porque la temperatura ambiente varía a lo largo del año. Por lo tanto, la mezcla de múltiples PCM con diferente valor de fusión es más apropiada en este tipo de aplicaciones.

Sería recomendable una revisión de los diseños de los sistemas fotovoltaicos integrados en la construcción para adaptarse a los edificios existentes. Si esto se consiguiese sería un buen punto para la futura expansión del mercado de PVT y convertirla en una tecnología de energía renovable competitiva con opciones contemporáneas de generación de energía renovable.

BIBLIOGRAFÍA

[1]	Florschuetz, L. W. (1979). Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. <i>Solar Energy</i> , 22(4), 361-366. https://doi.org/10.1016/0038-092x(79)90190-7
[2]	Hendrie, S.D., 1980. Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors. In: ISES International Congress and Silver Jubilee. Atlanta, GA (28 May–1 June 1980). https://www.osti.gov/biblio/6112623
[3]	Cox, C., & Raghuraman, P. (1985). Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors. <i>Solar Energy</i> , 35(3), 227–241. https://doi.org/10.1016/0038-092x(85)90102-1
[4]	Mbewe, D., Card, H., & Card, D. (1985). A model of silicon solar cells for concentrator photovoltaic and photovoltaic/thermal system design. <i>Solar Energy</i> , 35(3), 247–258. https://doi.org/10.1016/0038-092x(85)90104-5
[5]	Hamdy, M. A., Luttmann, F., Osborn, D. E., Jacobson, M. R., & MacLeod, H. A. (1985). Spectral Selectivity Applied To Hybrid Concentration Systems. <i>Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion IV</i> . Published. https://doi.org/10.1117/12.966299
[6]	Huang, H. T., Fiedler, H. E., & Wang, J. J. (1993). Limitation and improvement of PIV. <i>Experiments in Fluids</i> , 15(4–5), 263–273. https://doi.org/10.1007/bf00223404
[7]	Bergene, T., & Løvvik, O. M. (1995). Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. <i>Solar Energy</i> , 55(6), 453–462. https://doi.org/10.1016/0038-092x(95)00072-y
[8]	Grag, H.P., and Agarwal, R.K., 1995. “Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flatplate solar water heater with solar cells”. <i>Energy Conversion and Management</i> , 36, pp. 87–99
[9]	Sopian, K., Liu, H., Kakac, S., & Veziroglu, T. N. (1996). Performance of a hybrid photovoltaic thermal solar collector. In <i>American Society of Mechanical Engineers, Advanced Energy Systems Division (Publication) AES (Vol. 36, pp. 341-344)</i>
[10]	D Vries, D W. (1998). Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. Netherlands.
[11]	Huang, B., Lin, T., Hung, W., & Sun, F. (2001). Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. <i>Solar Energy</i> , 70(5), 443–448. https://doi.org/10.1016/s0038-092x(00)00153-5
[12]	Kalogirou, S. A. (2001). Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv–thermal solar system for Cyprus. <i>Renewable Energy</i> , 23(2), 247–260. https://doi.org/10.1016/s0960-1481(00)00176-2
[13]	Tripanagnostopoulos, Y., Souliotis, M., & Nousia, T. (2002). CPC type integrated collector storage systems. <i>Solar Energy</i> , 72(4), 327–350. https://doi.org/10.1016/s0038-092x(02)00005-1
[14]	Sandnes, B., & Rekstad, J. (2002). A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. <i>Solar Energy</i> , 72(1), 63–73. https://doi.org/10.1016/s0038-092x(01)00091-3
[15]	Chow, T. (2003). Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic

	model. <i>Solar Energy</i> , 75(2), 143–152. https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.001
[16]	Tiwari, A., & Sodha, M. (2007). Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model. <i>Solar Energy Materials and Solar Cells</i> , 91(1), 17–28. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.06.061
[17]	Tonui, J., & Tripanagnostopoulos, Y. (2008). Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation. <i>Solar Energy</i> , 82(1), 1–12. https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.004
[18]	K. Qian, P. S. Solanki, V. S. Mallela, M. Allan and C. Zhou, (2009) "A hybrid power system using wind and diesel generator: A case study at Masirah Island in Oman," CIRED 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1, 2009, pp. 1-4.
[19]	D. Moreno, M. Fernández, P.M. Esquivias (2017) A comparison of closed-form and finite-element solutions for heat transfer in a nearly horizontal, unglazed flat plate PVT water collector: Performance assessment. <i>Sol. Energy</i> , 141, pp. 11-24, 10.1016/j.solener.2016.11.015
[20]	M. Lämmle, A. Oliva, M. Hermann, K. Kramer, W. Kramer (2017) PVT collector technologies in solar thermal systems: A systematic assessment of electrical and thermal yields with the novel characteristic temperature approach. <i>Sol. Energy</i> , 155 (2017), pp. 867-879, 10.1016/j.solener.2017.07.015
[21]	D. Das, P. Kalita, O. Roy. (2018) Flat plate hybrid photovoltaic- thermal (PV/T) system: a review on design and development. <i>Renew. Sustain. Energy Rev.</i> , 84 (2018), pp. 111-130, 10.1016/j.rser.2018.01.002
[22]	I. Guarracino, J. Freeman, A. Ramos, S.A. Kalogirou, N.J. Ekins-Daukes, C.N. Markides (2019) Systematic testing of hybrid PV-thermal (PVT) solar collectors in steady-state and dynamic outdoor conditions. <i>Appl. Energy</i> , 240 (2019), pp. 1014-1030, 10.1016/j.apenergy.2018.12.049
[23]	N. Aste, F. Leonforte, C. Del Pero. Design, modeling and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) water collector. <i>Sol Energy</i> , 112 (2015), pp. 85-99, 10.1016/j.solener.2014.11.025
[24]	W. He, T.T. Chow, J. Ji, J. Lu, G. Pei, L.S. Chan. Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water. <i>Appl Energy</i> , 83 (2006), pp. 199-210, 10.1016/j.apenergy.2005.02.007
[25]	M. Xu, J. Chen, L. Nie, F. Li, Q. Yu, T. Wang. Experimental study on the operating characteristics of a novel photovoltaic/thermal integrated dual-source heat pump water heating system. <i>Appl Therm Eng</i> , 94 (2016), pp. 819-826, 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.126
[26]	N. Aste, C. Del Pero, F. Leonforte, M. Manfren. Performance monitoring and modeling of an uncovered photovoltaic-thermal (PVT) water collector. <i>Sol Energy</i> , 135 (2016), pp. 551-568, 10.1016/j.solener.2016.06.029
[27]	F. Yazdanifard, E. Ebrahimnia-Bajestan, M. Ameri. Investigating the performance of a water-based photovoltaic/thermal (PV/T) collector in laminar and turbulent flow regime. <i>Renew Energy</i> , 99 (2016), pp. 295-306, 10.1016/j.renene.2016.07.004
[28]	M. Qu, J. Chen, L. Nie, F. Li, Q. Yu, T. Wang. Experimental study on the operating characteristics of a novel photovoltaic/thermal integrated dual-source heat pump water heating system. <i>Appl Therm Eng</i> , 94 (2016), pp. 819-826, 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.126

[29]	P. Bombarda, G. Di Marcoberardino, A. Lucchini, S. Leva, G. Manzolini, L. Molinaroli, et al.. Thermal and electric performances of roll-bond flat plate applied to conventional PV modules for heat recovery. <i>Appl Therm Eng</i> , 105 (2016), pp. 304-313, 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.172
[30]	S. Nižetić, D. Čoko, A. Yadav, F. Grubišić-Čabo. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: the performance response. <i>Energy Convers Manag</i> , 108 (2016), pp. 287-296, 10.1016/j.enconman.2015.10.079
[31]	J. Yazdanpanahi, F. Sarhaddi, M. Mahdavi Adeli. Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses. <i>Sol Energy</i> , 118 (2015), pp. 197-208, 10.1016/j.solener.2015.04.038
[32]	N. Aste, F. Leonforte, C. Del Pero. Design, modeling and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) water collector. <i>Sol Energy</i> , 112 (2015), pp. 85-99, 10.1016/j.solener.2014.11.025
[33]	R. Liang, J. Zhang, L. Ma, Y. Li. Performance evaluation of new type hybrid photovoltaic/thermal solar collector by experimental study. <i>Appl Therm Eng</i> , 75 (2015), pp. 487-492, 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.075
[34]	A.A.B. Baloch, H.M.S. Bahaidarah, P. Gandhidasan, F.A. Al-Sulaiman. Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling. <i>Energy Convers Manag</i> , 103 (2015), pp. 14-27, 10.1016/j.enconman.2015.06.018
[35]	A.H. Alami. Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules. <i>Energy Convers Manag</i> , 77 (2014), pp. 668-679, 10.1016/j.enconman.2013.10.019
[36]	A. Fudholi, K. Sopian, M.H. Yazdi, M.H. Ruslan, A. Ibrahim, H.A. Kazem. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. <i>Energy Convers Manag</i> , 78 (2014), pp. 641-651, 10.1016/j.enconman.2013.11.017
[37]	J.K. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos. Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. <i>Sol Energy</i> , 81 (2007), pp. 498-511, 10.1016/j.solener.2006.08.002
[38]	M.E.A. Slimani, M. Amirat, I. Kurucz, S. Bahria, A. Hamidat, W.B. Chaouch. A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: comparative study under Algiers climatic conditions. <i>Energy Convers Manag</i> , 133 (2017), pp. 458-476, 10.1016/j.enconman.2016.10.066
[39]	Y.B. Assoa, F. Sauzedde, B. Boillot, S. Boddaert. Development of a building integrated solar photovoltaic/thermal hybrid drying system. <i>Energy</i> , 128 (2017), pp. 755-767, 10.1016/j.energy.2017.04.062
[40]	O.K. Ahmed, Z.A. Mohammed. Influence of porous media on the performance of hybrid PV/Thermal collector. <i>Renew Energy</i> , 112 (2017), pp. 378-387, 10.1016/j.renene.2017.05.061
[41]	J.C. Mojumder, W.T. Chong, H.C. Ong, K.Y. Leong, Abdullah-Al-Mamoon. An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design. <i>Energy Build</i> , 130 (2016), pp. 272-285, 10.1016/j.enbuild.2016.08.040
[42]	F. Hussain, M.Y.H. Othman, B. Yatim, H. Ruslan, K. Sopian, Z. Anuar, et al. An improved design of photovoltaic/thermal solar collector. <i>Sol Energy</i> , 122 (2015), pp. 885-891, 10.1016/j.solener.2015.10.008
[43]	S.A. Brideau, M.R. Collins. Experimental model validation of a hybrid PV/thermal air based

	collector with impinging jets. <i>Energy Proc</i> , 30 (2012), pp. 44-54, 10.1016/j.egypro.2012.11.007
[44]	H.G. Teo, P.S. Lee, M.N.A. Hawlader. An active cooling system for photovoltaic modules. <i>Appl Energy</i> , 90 (2012), pp. 309-315, 10.1016/j.apenergy.2011.01.017
[45]	R. Kumar, M.A. Rosen. Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins. <i>Appl Therm Eng</i> , 31 (2011), pp. 1402-1410, 10.1016/j.applthermaleng.2010.12.037
[46]	A. Shahsavari, M. Ameri. Experimental investigation and modeling of a direct-coupled PV/T air collector. <i>Sol Energy</i> , 84 (2010), pp. 1938-1958, 10.1016/j.solener.2010.07.010
[47]	A.S. Joshi, A. Tiwari. Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) air collector. <i>Renew Energy</i> , 32 (2007), pp. 2223-2241, 10.1016/j.renene.2006.11.013
[48]	M.J. Huang, P.C. Eames, B. Norton, N.J. Hewitt. Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics. <i>Sol Energy Mater Sol Cells</i> , 95 (2011), pp. 1598-1603, 10.1016/j.solmat.2011.01.008
[49]	S. Preet, B. Bhushan, T. Mahajan. Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). <i>Energy</i> , 155 (2017), pp. 1104-1120, 10.1016/j.solener.2017.07.040
[50]	M.C. Browne, B. Norton, S.J. McCormack. Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM. <i>Sol Energy</i> , 133 (2016), pp. 533-548, 10.1016/j.solener.2016.04.024
[51]	R. Stropnik, U. Stritih. Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. <i>Renew Energy</i> , 97 (2016), pp. 671-679, 10.1016/j.renene.2016.06.011
[52]	J. Park, T. Kim, S.B. Leigh. Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-building-added photovoltaics considering the annual weather conditions. <i>Sol Energy</i> , 105 (2014), pp. 561-574, 10.1016/j.solener.2014.04.020
[53]	P. Atkin, M.M. Farid. Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. <i>Sol Energy</i> , 114 (2015), pp. 217-228, 10.1016/j.solener.2015.01.037
[54]	A. Hasan, S.J. McCormack, M.J. Huang, J. Sarwar, B. Norton. Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: materials comparison in different climates. <i>Sol Energy</i> , 115 (2015), pp. 264-276, 10.1016/j.solener.2015.02.003
[55]	S. Maiti, S. Banerjee, K. Vyas, P. Patel, P.K. Ghosh. Self-regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal-wax composite phase change matrix. <i>Sol Energy</i> , 85 (2011), pp. 1805-1816, 10.1016/j.solener.2011.04.021
[56]	J.J. Michael, S. Iniyani. Performance analysis of a copper sheet laminated photovoltaic thermal collector using copper oxide - water nanofluid. <i>Sol Energy</i> , 119 (2015), pp. 439-451, 10.1016/j.solener.2015.06.028
[57]	Y. Khanjari, F. Pourfayaz, A. Kasaeian. Numerical investigation on using of nanofluid in a water-cooled photovoltaic thermal system. <i>Energy Convers Manag</i> , 122 (2016), pp. 263-278
[58]	M. Ghadiri, M. Sardarabadi, M. Pasandideh-fard, A.J. Moghadam. Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids. <i>Energy Convers Manag</i> , 103 (2015), pp. 468-476
[59]	M. Elmir, R. Mehdaoui, A. Mojtabi. Numerical simulation of cooling a solar cell by forced convection in the presence of a nanofluid. <i>Energy Procedia</i> , 18 (2012), pp. 594-603

[60]	J.J. Michael, S. Iniyan. Performance analysis of a copper sheet laminated photovoltaic thermal collector using copper oxide–water nanofluid. <i>Sol Energy</i> , 119 (2015), pp. 439-451
[61]	Z. Xu, C. Kleinstreuer. Concentration photovoltaic–thermal energy co-generation system using nanofluids for cooling and heating. <i>Energy Convers Manag</i> , 87 (2014), pp. 504-512
[62]	Z. Xu, C. Kleinstreuer. Computational analysis of nanofluid cooling of high concentration photovoltaic cells. <i>J Therm Sci Eng Appl</i> , 6 (2014), p. 031009
[63]	A.N. Al-Shamani, K. Sopian, S. Mat, H.A. Hasan, A.M. Abed, M.H. Ruslan. Experimental studies of rectangular tube absorber photovoltaic thermal collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions. <i>Energy Convers Manag</i> , 124 (2016), pp. 528-542
[64]	L.Q. Tang, Q.Z. Zhu. Performance study of flowing-over PV/T system with different working fluid. <i>Appl Mech Mater: Trans Tech Publ</i> (2014), pp. 1173-1176
[65]	O. Rejeb, M. Sardarabadi, C. Ménézo, M. Passandideh-Fard, M.H. Dhaou, A. Jemni. Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system. <i>Energy Convers Manag</i> , 110 (2016), pp. 367-377
[66]	T.P. Otanicar, I. Chowdhury, R. Prasher, P.E. Phelan. Band-gap tuned direct absorption for a hybrid concentrating solar photovoltaic/thermal system. <i>J Sol Energy Eng</i> , 133 (2011), p. 041014
[67]	N.E. Hjerrild, S. Mesgari, F. Crisostomo, J.A. Scott, R. Amal, R.A. Taylor. Hybrid PV/T enhancement using selectively absorbing Ag–SiO ₂ /carbon nanofluids. <i>Sol Energy Mater Sol Cells</i> , 147 (2016), pp. 281-287
[68]	T.P. Otanicar, R.A. Taylor, C. Telang. Photovoltaic/thermal system performance utilizing thin film and nanoparticle dispersion based optical filters. <i>J Renew Sustain Energy</i> , 5 (2013), p. 033124
[69]	R.A. Taylor, T. Otanicar, G. Rosengarten. Nanofluid-based optical filter optimization for PV/T systems. <i>Light: Sci Appl</i> , 1 (2012), p. e34
[70]	J. Zhao, Y. Song, W.H. Lam, W. Liu, Y. Liu, Y. Zhang, et al. Solar radiation transfer and performance analysis of an optimum photovoltaic/thermal system. <i>Energy Convers Manag</i> , 52 (2011), pp. 1343-1353
[71]	A.H.A. Al-Waeli, K. Sopian, M.T. Chaichan, H.A. Kazem, H.A. Hasan, A.N. Al-Shamani. An experimental investigation of SiC nanofluid as a base-fluid for a photovoltaic thermal PV/T system. <i>Energy Convers Manag</i> , 142 (2017), pp. 547-558, 10.1016/j.enconman.2017.03.076
[72]	F. Yazdanifard, M. Ameri, E. Ebrahimnia-Bajestan. Performance of nanofluid-based photovoltaic/thermal systems: a review. <i>Renew Sustain Energy Rev</i> , 76 (2017), pp. 323-352, 10.1016/j.rser.2017.03.025
[73]	Hammad, M. (1995). Experimental study of the performance of a solar collector cooled by heat pipes. <i>Energy Conversion and Management</i> Volume 36, Issue 3, 197-203. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019689049400050A
[74]	M. Moradgholi, S.M. Nowee, I. Abrishamchi. Application of heat pipe in an experimental investigation on a novel photovoltaic/thermal (PV/T) system. <i>Sol Energy</i> , 107 (2014), pp. 82-88, 10.1016/j.solener.2014.05.018
[75]	S.Y. Wu, Q.L. Zhang, L. Xiao, F.H. Guo. A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation. <i>Energy Build</i> , 43 (2011), pp. 3558-3567,

	10.1016/j.enbuild.2011.09.017
[76]	M. Hu, R. Zheng, G. Pei, Y. Wang, J. Li, J. Ji. Experimental study of the effect of inclination angle on the thermal performance of heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) systems with wickless heat pipe and wire-meshed heat pipe. <i>Appl Therm Eng</i> , 106 (2016), pp. 651-660, 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.003
[77]	Z. Wang, F. Qiu, W. Yang, X. Zhao, S. Mei. Experimental investigation of the thermal and electrical performance of the heat pipe BIPV/T system with metal wires. <i>Appl Energy</i> , 170 (2016), pp. 314-323, 10.1016/j.apenergy.2016.02.140
[78]	H. Jouhara, M. Szulgowska-Zgrzywa, M.A. Sayegh, J. Milko, J. Danielewicz, T.K. Nannou, et al.. The performance of a heat pipe based solar PV/T roof collector and its potential contribution in district heating applications. <i>Energy</i> , 136 (2015), pp. 117-125, 10.1016/j.energy.2016.04.070
[79]	P. Gang, F. Huide, Z. Huijuan, J. Jie. Performance study and parametric analysis of a novel heat pipe PV/T system. <i>Energy</i> , 37 (2012), pp. 384-395, 10.1016/j.energy.2011.11.017
[80]	H. Chen, L. Zhang, P. Jie, Y. Xiong, P. Xu, H. Zhai. Performance study of heat-pipe solar photovoltaic/thermal heat pump system. <i>Appl Energy</i> , 190 (2017), pp. 960-980, 10.1016/j.apenergy.2016.12.145
[81]	I.K. Karathanassis, E. Papanicolaou, V. Belessiotis, G.C. Bergeles. Dynamic simulation and exergetic optimization of a Concentrating Photovoltaic/ Thermal (CPVT) system. <i>Renew. Energy</i> , 135 (2019), pp. 1035-1047, 10.1016/j.renene.2018.12.085
[82]	F. Calise, L. Vanoli. Parabolic trough photovoltaic/thermal collectors: Design and simulation model. <i>Energies</i> , 5 (2012), pp. 4186-4208, 10.3390/en5104186
[83]	M. Valizadeh, F. Sarhaddi, Mahdavi Adeli. Exergy performance assessment of a linear parabolic trough photovoltaic thermal collector. <i>Renew. Energy</i> , 138 (2019), pp. 1028-1041, 10.1016/j.renene.2019.02.039
[84]	F. Yazdanifard, E. Ebrahimnia-Bajestan, M. Ameri. Performance of a parabolic trough concentrating photovoltaic/thermal system: Effects of flow regime, design parameters, and using nanofluids. <i>Energy Convers. Manag.</i> , 148 (2017), pp. 1265-1277, 10.1016/j.enconman.2017.06.075
[85]	W. Lu, Y. Wu, P. Eames. Design and development of a building façade integrated asymmetric compound parabolic photovoltaic concentrator (BFI-ACP-PV). <i>Appl. Energy</i> , 220 (2018), pp. 325-336, 10.1016/j.apenergy.2018.03.071
[86]	A.H. Jaz, H.A. Hasan, K. Sopian, M. Ha, B. Haji, S.H. Zaidi. Design and development of compound parabolic concentrating for photovoltaic solar collector : Review, 76 (2017), pp. 1108-1121, 10.1016/j.rser.2017.03.127
[87]	G.N. Tiwari, M.E. Khan, R.K. Mishra, V. Garg. Improved Hottel-Whillier-Bliss equation for N-photovoltaic thermal- compound parabolic concentrator (N-PVT-CPC) collector. <i>Sol. Energy</i> , 166 (2018), pp. 203-212, 10.1016/j.solener.2018.02.058
[88]	A. Tiwari, O.A. Alashqar, N. Dimri. Modeling and validation of photovoltaic thermoelectric flat plate collector. <i>Energy Convers. Manag.</i> , 205 (2020), Article 112378, 10.1016/j.enconman.2019.112378
[89]	O.Z. Sharaf, M.F. Orhan. Comparative thermodynamic analysis of densely-packed concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collectors in thermally in-series and in-parallel receiver

	configurations. <i>Renew. Energy</i> , 126 (2018), pp. 296-321, 10.1016/j.renene.2018.03.026
[90]	A. Buonomano, F. Calise, M. Dentice d'Accadia, L. Vanoli. A novel solar trigeneration system based on concentrating photovoltaic/thermal collectors. Part 1: Design and simulation model. <i>Energy</i> , 61 (2013), pp. 59-71, 10.1016/j.energy.2013.02.009
[91]	C. Renno, F. Petito. Design and modeling of a concentrating photovoltaic thermal (CPV / T) system for a domestic application. <i>Energy Build.</i> , 62 (2013), pp. 392-402, 10.1016/j.enbuild.2013.02.040
[92]	C. Renno, F. Petito. Experimental and theoretical model of a concentrating photovoltaic and thermal system. <i>Energy Convers. Manag.</i> , 126 (2016), pp. 516-525, 10.1016/j.enconman.2016.08.027
[93]	F. Karimi, H. Xu, Z. Wang, J. Chen, M. Yang. Experimental study of a concentrated PV/T system using linear Fresnel lens. <i>Energy</i> , 123 (2017), pp. 402-412, 10.1016/j.energy.2017.02.028
[94]	P.J. Sonneveld, G.L.A.M. Swinkels, B.A.J. Van Tuijl, H.J.J. Janssen, J. Campen, G.P.A. Bot. Performance of a concentrated photovoltaic energy system with static linear Fresnel lenses. <i>Sol. Energy</i> , 85 (2011), pp. 432-442, 10.1016/j.solener.2010.12.001
[95]	H. Fu, G. Li, F. Li. Performance comparison of photovoltaic / thermal solar water heating systems with direct-coupled photovoltaic pump, traditional pump and natural circulation. <i>Renew. Energy</i> , 136 (2019), pp. 463-472, 10.1016/j.renene.2019.01.028
[96]	K. Martin-Escudero, E. Salazar-Herran, A. Campos-Celador, G. Diarce-Belloso, I. Gomez-Arriaran. Solar energy system for heating and domestic hot water supply by means of a heat pump coupled to a photovoltaic ventilated façade. <i>Sol. Energy</i> , 183 (2019), pp. 453-462, 10.1016/j.solener.2019.03.058
[97]	J. Kim, S. Park, J. Kang, J. Kim. Experimental performance of heating system with building-integrated PVT (BIPVT) collector. <i>Energy Procedia</i> , 48 (2014), pp. 1374-1384, 10.1016/j.egypro.2014.02.155
[98]	M. Herrando, C.N. Markides, K. Hellgardt. A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance. <i>Appl. Energy</i> , 122 (2014), pp. 288-309, 10.1016/j.apenergy.2014.01.061
[99]	M. Alobaid, B. Hughes, J. Kaiser, D.O. Connor, A. Heyes. A review of solar driven absorption cooling with photovoltaic thermal systems. <i>Renew. Sustain. Energy Rev.</i> , 76 (2017), pp. 728-742, 10.1016/j.rser.2017.03.081
[100]	M. Noro, R.M. Lazzarin. Solar cooling between thermal and photovoltaic : An energy and economic comparative study in the Mediterranean conditions. <i>Energy</i> (2014), 10.1016/j.energy.2014.06.035
[101]	M. Herrando, A.M. Pantaleo, K. Wang, C.N. Markides. Solar combined cooling, heating and power systems based on hybrid PVT, PV or solar-thermal collectors for building applications. <i>Renew. Energy</i> , 143 (2019), pp. 637-647, 10.1016/j.renene.2019.05.004
[102]	Y. Chen, J. Wang, C. Ma, Y. Gao. Thermo-ecological cost assessment and optimization for a hybrid combined cooling, heating and power system coupled with compound parabolic concentrated-photovoltaic thermal solar collectors. <i>Energy</i> , 176 (2019), pp. 479-492, 10.1016/j.energy.2019.03.185
[103]	G.N. Tiwari, M. Meraj, M.E. Khan. Exergy analysis of N-photovoltaic thermal-compound parabolic concentrator (N-PVT-CPC) collector for constant collection temperature for vapor

	absorption refrigeration (VAR) system. <i>Sol. Energy</i> , 173 (2018), pp. 1032-1042, 10.1016/j.solener.2018.08.031
[104]	M. Fterich, H. Chouikhi, H. Bentaher, A. Maalej. Experimental parametric study of a mixed-mode forced convection solar dryer equipped with a PV / T air collector. <i>Sol. Energy</i> , 171 (2018), pp. 751-760, 10.1016/j.solener.2018.06.051
[105]	A. Rafiei, A. Sulaiman, S. Mahadzir, R. Loni, G. Naja, A. Kasaeian. Thermal analysis of a hybrid solar desalination system using various shapes of cavity receiver: cubical, cylindrical, and hemispherical. <i>Energy Convers. Manag.</i> , 198 (2019), Article 111861, 10.1016/j.enconman.2019.111861
[106]	S.I. Palomino-resendiz, D.A. Flores-hernández, N. Lozada-castillo, L. Guzmán-vargas. Design and implementation of a robotic active solar distiller based on a Fresnel concentrator and a photovoltaic system. <i>Energy Convers. Manag.</i> , 166 (2018), pp. 637-647, 10.1016/j.enconman.2018.04.069
[107]	Keliang, L., Jie, J., Tin-tai, C., Gang, P., Hanfeng, H., Aiguo, J., & Jichun, Y. (2009). Performance study of a photovoltaic solar assisted heat pump with variable-frequency compressor – A case study in Tibet. <i>Renewable Energy</i> , 34(12), 2680–2687. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.031
[108]	Shahsavari, A., & Ameri, M. (2010). Experimental investigation and modeling of a direct-coupled PV/T air collector. <i>Solar Energy</i> , 84(11), 1938–1958. https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.07.010
[109]	Touafek, K., Haddadi, M., & Malek, A. (2013). Design and modeling of a photovoltaic thermal collector for domestic air heating and electricity production. <i>Energy and Buildings</i> , 59, 21–28. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.037
[110]	Abu Bakar, M. N., Othman, M., Hj Din, M., Manaf, N. A., & Jarimi, H. (2014). Design concept and mathematical model of a bi-fluid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector. <i>Renewable Energy</i> , 67, 153–164. https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.052
[111]	Fu, H., Pei, G., Ji, J., Long, H., Zhang, T., & Chow, T. (2012). Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat-pump/heat-pipe system. <i>Applied Thermal Engineering</i> , 40, 343–350. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.036
[112]	Lin, Z., Lee, C., Fong, S., Chow, T., Yao, T., & Chan, A. (2011). Comparison of annual energy performances with different ventilation methods for cooling. <i>Energy and Buildings</i> , 43(1), 130–136. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.033
[113]	Andrew Putrayudha, S., Kang, E. C., Evgueniy, E., Libing, Y., & Lee, E. J. (2015). A study of photovoltaic/thermal (PVT)-ground source heat pump hybrid system by using fuzzy logic control. <i>Applied Thermal Engineering</i> , 89, 578–586. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.019
[114]	Millennium Electric T.O.U. Ltd. Above & Beyond Photovoltaics n.d. http://www.millenniumsolar.com/
[115]	SolarVenti D Solar air collectors with high reliable performance n.d. http://www.solarventi.com/index.php/manuals-and-instructions/why-chose-solarventi .
[116]	International Clean Energy Consortium. Hybrid Solar n.d. http://www.iccc.ch/en/hybride.htm .
[117]	Solimpeks Solar Corp. Powervolt n.d. http://www.solimpeks.com/product/volther-powervolt/
[118]	SUNSYSTEM. Hybrid photo-thermal collector SUNSYSTEM PVT 240 n.d.

	http://www.sunsystem.bg/en/fotovoltaika/PV-T/
[119]	Dualsun. Dualsun, the revolutionary hybrid solar panel n.d. https://dualsun.fr/en/product/2-in-1-solar/
[120]	SunDrum Solar. SDM100 Collector n.d. http://www.sundrumsolar.com/index.php/products
[121]	Solar E. PVT 240,NES - New Energy System - Sunsystem n.d. https://www.ensolar.com/pv/panel-datasheet/Polycrystalline/12159
[122]	FAFCO. CoolPV n.d. http://coolpvsolar.com/
[123]	Technology 2Power. One module for everything, Generate power from sunlight and collect heat n.d. http://www.2power-hybrid.com/en/2power-modul
[124]	Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., & Tyagi, S. K. (2012b). Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 16(3), 1383-1398. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.013
[125]	Joshi, S. S., & Dhoble, A. S. (2018). Photovoltaic -Thermal systems (PVT): Technology review and future trends. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 92, 848-882. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.067
[126]	Malerba, D. (2019). Poverty-energy-emissions pathways: Recent trends and future sustainable development goals. <i>Energy for Sustainable Development</i> , 49, 109-124. https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.001
[127]	Zou, C., Zhao, Q., Zhang, G., & Xiong, B. (2016). Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. <i>Natural Gas Industry B</i> , 3(1), 1-11. https://doi.org/10.1016/j.ngib.2016.02.001
[128]	Wolf, M. (1976). Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. <i>Energy Conversion</i> , 16(1-2), 79-90. https://doi.org/10.1016/0013-7480(76)90018-8
[128]	Chen, B., Xiong, R., Li, H., Sun, Q., & Yang, J. (2019). Pathways for sustainable energy transition. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 228, 1564-1571. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.372
[129]	Dockrill, P. (2019). It's Official: Atmospheric CO2 Just Exceeded 415 ppm For The First Time in Human History. <i>ScienceAlert</i> . https://www.sciencealert.com/it-s-official-atmospheric-co2-just-exceeded-415-ppm-for-first-time-in-human-history
[130]	Alhorr, Y., Eliskandarani, E., & Elsarrag, E. (2014). Approaches to reducing carbon dioxide emissions in the built environment: Low carbon cities. <i>International Journal of Sustainable Built Environment</i> , 3(2), 167-178. https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.11.003
[131]	Alan Buis, NASA's Jet Propulsion Laboratory. (2019). The Atmosphere: Getting a Handle on Carbon Dioxide -. <i>Climate Change: Vital Signs of the Planet</i> . https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/
[132]	2 Degrees Institute. (2020). Current & Historical Carbon Dioxide (CO2) Levels. https://www.co2levels.org/

[133]	IEA. (2020) World Energy Outlook 2020 – Analysis. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020
[134]	IEA. (2020). Global Energy Review 2019 – Analysis. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019
[135]	Ritchie, H. (2014). Energy. Our World in Data. https://ourworldindata.org/energy#energy-consumption-by-source
[136]	BP. (2020). Statistical Review of World Energy 2020 – 69th edition. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf
[137]	Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., & Tyagi, S. K. (2012). Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 16(3), 1383-1398. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.013
[138]	Ree.es. 2021. [online] https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/Renovables-2019.pdf
[139]	Anderson, T. N., Duke, M., Morrison, G. L., & Carson, J. K. (2009). Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) solar collector. <i>Solar Energy</i> , 83(4), 445-455. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.08.013
[140]	Kumar, A., Baredar, P., & Qureshi, U. (2015). Historical and recent development of photovoltaic thermal (PVT) technologies. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 42, 1428-1436. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.044
[141]	Malerba, D. (2019). Poverty-energy-emissions pathways: Recent trends and future sustainable development goals. <i>Energy for Sustainable Development</i> , 49, 109-124. https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.001
[142]	Zou, C., Zhao, Q., Zhang, G., & Xiong, B. (2016). Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. <i>Natural Gas Industry B</i> , 3(1), 1-11. https://doi.org/10.1016/j.ngib.2016.02.001