



**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

**Estudio de viabilidad de colectores solares
híbridos fotovoltaicos térmicos (PVT) en
Chile.**

AUTOR: ÁLVARO BATUECAS LACASA

TUTOR: RODRIGO ESCOBAR MORAGAS

RESUMEN

En este trabajo de investigación se ha realizado una revisión bibliográfica de los colectores híbridos también llamados PVT, en él se intenta realizar un completo análisis sobre esta tecnología que se puede considerar relativamente nueva en el mercado, o al menos sin ser muy común, esta tecnología se basa en la unión de dos más populares y reconocibles, que son el panel fotovoltaico convencional y un colector térmico que se aprovechará del calor residual del panel fotovoltaico, mejorando tanto la eficiencia de este como aprovechando esta energía térmica que en otro caso sería entregada al ambiente sin ser aprovechada.

El análisis tendrá como objetivo principal entender el estado actual de la tecnología y sus principales problemas y áreas de desarrollo. En esta revisión bibliográfica se organizará el análisis en 6 grandes capítulos claramente diferenciados entre sí, que serán:

- Familias tecnológicas.
- Conceptos de diseño.
- Estado actual en el mundo: instalaciones, aplicaciones, costos...
- Conclusiones y tendencias al futuro

Por último, cabe señalar que la información a partir de la cuál he creado una opinión y he obtenido un conocimiento sobre el tema de los colectores híbridos o PVT, ha sido obtenida a través de artículos científicos y catálogos obtenidos a través y gracias de la biblioteca de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

ÍNDICE

FAMILIAS TECNOLÓGICAS	4
CONCEPTOS DE DISEÑO.	11
ESTADO ACTUAL EN EL MUNDO	19
METODOLOGÍAS DE MODELADO Y SIMULACIÓN.	28
CONCLUSIONES Y TENDENCIA AL FUTURO.	31

FAMILIAS TECNOLÓGICAS

Los colectores híbridos es una tecnología nueva que está introduciéndose poco a poco en el mercado, esta obtiene la energía a través de la energía solar y por eso diremos que la energía obtenida es una energía renovable lo que le puede otorgar un papel relevante en nuestras vidas en un futuro a medio-largo plazo. Esta tecnología se puede considerar un híbrido, como su propio nombre indica, de dos tecnologías mas antiguas, aunque relativamente modernas también, que son las placas fotovoltaicas (PV) y los colectores térmicos, especialmente los colectores térmicos que trabajan con agua para sistemas ACS (temperaturas no mayores a 60°C), ya que aunque se podría tener en cuenta como familia tecnológica otros tipos de energía termosolar con fin de calentar sales fundidas u otro fluido caloportador alrededor de unos 400/500°C y obtener un generación de electricidad gracias a una turbina y un generador, no tendría sentido a día de hoy ni en un futuro cercano ya que esas temperaturas en el circuito termosolar están muy lejos de poder alcanzarse.

El concepto en el que se basa la existencia de los colectores híbridos se basa simplemente en intentar reducir la temperatura de la placa fotovoltaica para así mejorar su eficiencia eléctrica de esta y ya de paso con ese gradiente de temperatura que se obtiene en el fluido caloportador intentar aprovecharlo de la manera más eficiente posible y convertirlo en energía térmica. Pero como se verá en los siguientes apartados esta tarea no es tan simple ya que se necesita un gasto superior tanto de dinero como de energía, pues será necesario tener en funcionamiento al menos un circuito por el que circule el fluido de transferencia de calor en cuestión.

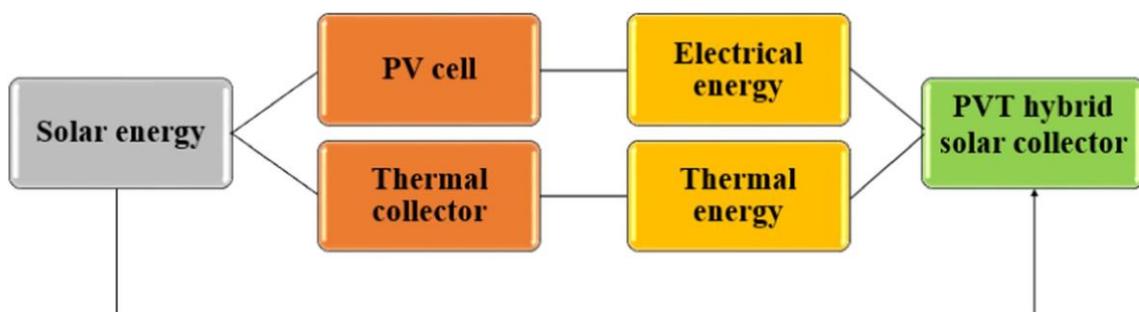


Figura 1: Concepto de un colector solar PVT.

Con el motivo de intentar entender las familias tecnológicas que forman la tecnología PVT se verán por separado primero la tecnología PV y a continuación la termosolar.

Una placa fotovoltaica (PV) transforma directa e instantáneamente la energía solar en energía eléctrica sin utilizar combustibles. De hecho, la tecnología fotovoltaica (PV) se aprovecha del efecto fotoeléctrico, a través del cual algunos semiconductores "dopados" generan electricidad al ser expuestos a la radiación solar.

Las principales ventajas de las placas fotovoltaicas (PV) son, en resumen:

- generación distribuida donde sea necesario;
- no se emiten materiales contaminantes;
- ahorro de combustibles fósiles;
- fiabilidad de las plantas, ya que carecen de partes móviles (la vida útil suele superar los 20 años);
- costes de mantenimiento y funcionamiento reducidos;
- modularidad del sistema (para aumentar la potencia de la planta basta con aumentar el número de paneles) conforme a la demanda real de los usuarios.

Sin embargo, el coste inicial de desarrollo de una planta FV es bastante elevado, debido a un mercado que todavía no ha alcanzado su madurez plena desde un punto de vista técnico y económico. Además, la generación de energía es errática a causa de la variabilidad de la fuente de energía solar.

La electricidad anual generada por una planta FV depende de distintos factores. Entre ellos:

- radiación solar incidente en el lugar de instalación;
- inclinación y orientación de los paneles;
- presencia o no de sombras;
- rendimientos técnicos de los componentes de la planta (principalmente módulos e inversores).

Las aplicaciones principales de las plantas FV son:

- instalaciones (con sistemas de almacenamiento) para usuarios aislados de la red;
- instalaciones para usuarios conectados a la red de BT;
- plantas de energía solar fotovoltaica, normalmente conectadas a la red de MT.

Una planta FV está compuesta esencialmente por un generador (paneles FV), un bastidor de soporte para montar los paneles sobre el terreno, un edificio o la estructura de un edificio; por un sistema de control y acondicionamiento energético, por un posible sistema de almacenamiento de la energía, por cuadros y aparataje eléctricos que alojan los equipos de protección y maniobra, así como por los cables de conexión.

Actualmente se puede diferenciar entre distintos tipos de placas fotovoltaicas según el material por el cual son construidos, cabe decir que los distintos tipos de paneles fotovoltaicos que se verán a continuación son totalmente extrapolables a la tecnología de colectores híbridos, podemos diferenciar entre los siguientes tipos:

- Silicio monocristalino: Estos paneles están hechos de cristal de silicio cristalino de alta pureza, la principal ventaja de estas células es la eficiencia que obtienen, que se encuentra entre el 14 y el 17%. El coste de estos módulos es de alrededor de 3,2 a 3,5 €/W y los paneles realizados por esta tecnología normalmente se caracterizan por un color azul homogéneo.

- Silicio policristalino: En estos paneles los cristales de silicio que los componen son agregados adoptando formas y direcciones diferentes. Su eficiencia es menor que la del silicio monocristalino (12 a 14%) pero su coste también es menor, ya que se encuentra entre 2,8 y 3,3 €/W. Su duración como la del silicio monocristalino es larga y buena parte del rendimiento se mantiene a lo largo del tiempo. Los paneles realizados a partir de esta tecnología pueden reconocerse por los granos cristalinos claramente visibles. Cabe destacar que los paneles de silicio cristalino, tanto los policristalinos como los monocristalinos, son los más utilizados hoy en día en la tecnología PV y en la PVT.
- Capa fina: Las células de capa fina están compuestas por material semiconductor depositado, normalmente como mezclas gaseosas, en soportes tales como vidrio, polímeros o aluminio, que le dan una consistencia física a la mezcla. La película semiconductor tiene un grosor de unas pocas micras, mientras que las células de silicio cristalino poseen un grosor de varios cientos de micras. En consecuencia, el ahorro de material es notable y la posibilidad de disponer de un soporte flexible aumenta el campo de aplicación de este tipo de células. Los materiales usados son: silicio amorfo, CdTeS (teluro de cadmio-sulfuro de cadmio) con un precio de 1,5 a 2,2€/W, GaAs (arseniuro de galio) con un y CIS (aleaciones de diseleniuro de indiocobre) con un precio unitario de 2,2-2,5 €/W. Al existir una variación entre las ventajas y desventajas y eficiencias entre los distintos tipos de paneles de capa fina existentes, se adjuntan en la siguiente tabla resumen.

Tabla 1. Resumen distintos tipos de células fotovoltaicas.

	TIPOS DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS						
	SILICIO CRISTALINO		CAPA DELGADA			ORGÁNICAS	GaAs
	MONOCRISTALINO	POLICRISTALINO	SILICIO AMORFO	CdTe	CIS		
Rendimiento	14% - 17%	12% - 14%	7% - 10%	10%	12%	3%-5%	32,50%
Ventajas	Alto rendimiento. Tecnología fiable. Estable.	Menor costo. Fabricación más sencilla. Mejor ocupación del espacio	Flexible. Buen rendimiento con baja radiación. Menor costo	Bajo costo	Muy estable	Baja contaminación en la producción de energía	Alta resistencia a altas temperaturas
Desventajas	Muy costoso. Complejo. Gran cantidad de material necesario.	Complejidad. Sensibilidad a las impurezas.	Bajo rendimiento. Deterioro inicial	Toxicidad. Disponibilidad del material	Toxicidad	En desarrollo	Toxicidad. Disponibilidad del material.

Toda la información y datos de precios han sido obtenidos a través Cuaderno de aplicaciones técnicas n.º 10 Plantas fotovoltaicas de la compañía Asea Brown Boveri S.A.

Si nos centramos a continuación en la tecnología perteneciente a los captadores solares, podríamos decir que el captador solar térmico es el dispositivo que transforma la radiación solar en la energía térmica que se transfiere a un fluido caloportador aumentando su temperatura, hay que concretar que las temperaturas entre las que se trabajan en la temperatura PVT están contenidas en el rango de entre 40 y 60°C. Es el principal componente del sistema de captación, el generador de calor de las instalaciones solares térmicas. Además de producir el calor de manera eficiente, el captador debe estar diseñado para soportar la continua exposición a condiciones exteriores (lluvia, nieve, granizo, polvo, etc.) y para resistir las temperaturas extremas, tanto altas como bajas, a las que puede estar sometido. Los distintos tipos de captadores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2: Distintos tipos de captadores.

	Planos		Tubos de vacío
	No selectivo	Selectivo	Heat-pipe y en U
Rendimiento: Factor de ganancia	≈ 0.9	≈ 0.8	≈ 0.6
Rendimiento: Factor de pérdidas (W/m².K)	6,0 - 8,0	3,0 - 5,0	2,0 - 3,1
Temperatura de estancamiento (°C)	120-160	180-220	200-239
Relación de superficie apertura/bruta	> 0,9		< 0,6
Espesor de la cubierta de vidrio	2 a 4		1,6 a 2,1
Resistencia de la cubierta de vidrio	Mayor		Menor
Durabilidad: principal problema	Entrada de agua al interior		Pérdida del vacío
Resistencia al viento	Elevada		Menor

Figura 2: Sección constructiva de un captador solar plano indicando sus componentes.

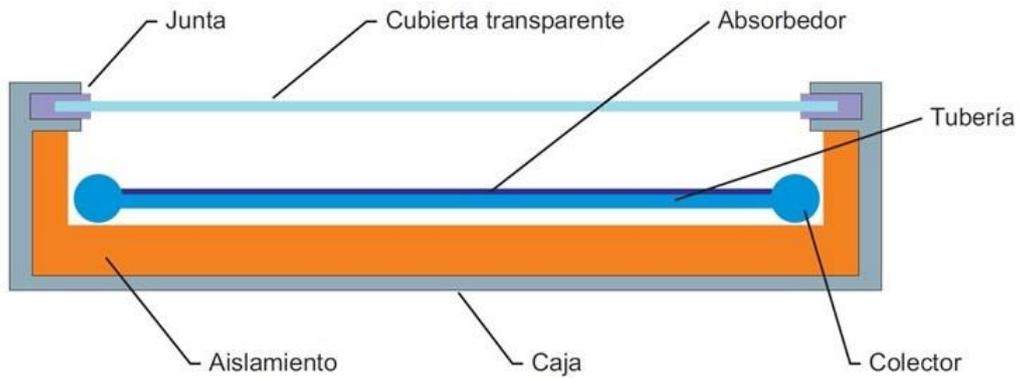
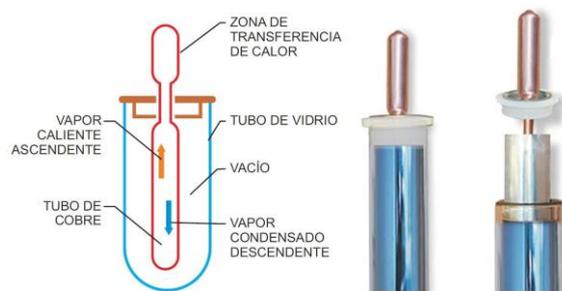


Figura 3: Captador de tubos de vacío con “tubo de calor” (heat-pipe)



Toda la información, tablas e imágenes han sido obtenidas de la Guía Técnica de Energía Solar Térmica redactada por la Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT) para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

CONCEPTOS DE DISEÑO.

Si nos centramos en los conceptos de diseño existentes en la tecnología PVT, debemos tener muy presente cual es el objetivo que se busca y cuales son las condiciones de las que se disponen.

El continuo desarrollo de las tecnologías de paneles híbridos (en cualquiera de sus tipologías) que muestran todas las publicaciones revisadas, su adecuada integración en instalaciones donde se demanda electricidad y calor a baja y media temperatura y el constante crecimiento del precio de la energía, hacen que esta tecnología esté en continua evolución y desarrollo y que cada vez se implanten más en instalaciones reales. En la mayoría de los casos, el hándicap que se encuentra esta tecnología pasa no tanto por su eficiencia, si no por su integración en las diferentes tipologías de instalaciones y en consecuencia los requerimientos de acumulación que se necesitan. Es decir, los diferentes factores que contextualizan la integración de paneles híbridos como normativas, desfase entre generación y consumo, etc. condicionan el dimensionamiento e incluso la existencia o no de acumulación (tanto térmica como eléctrica) y su adecuada combinación puede ser uno de los factores claves para su desarrollo en el mercado.

Actualmente, la reducción de costes en la fotovoltaica, la posibilidad de conseguir mayores contribuciones solares con sistemas, por ejemplo, de trigeneración y los recientes avances en los paneles híbridos, permiten que esta tecnología tenga un importante nicho de mercado, que comparte con la fotovoltaica, pero principalmente con la térmica. Los paneles híbridos, que generan más energía que los térmicos o los fotovoltaicos por separado, son muy adecuados en los casos donde escasea la superficie disponible.

Por estas razones, se considera que los paneles solares híbridos tienen un gran potencial de aplicación e integración en edificios de cualquier uso, y no en grandes plantas de generación, como la fotovoltaica u otras fuentes renovables.

Se puede clasificar a los colectores PVT de diferentes formas y con diferentes criterios, tanto si nos centramos en la parte fotovoltaica como en la parte térmica, en esta última podríamos decir que hay más variedad de criterio. Los criterios que he seguido para clasificar diferenciar los distintos tipos de colectores PVT son los establecidos en el artículo *“Review on photovoltaic/thermal hybrid solar collectors: Classifications, applications and new systems”* escrito por Amal Hereza, Hicham El Hagea , Thierry Lemenand y Mohamad Ramadan, Mahmoud Khaled publicado en la revista Solar Energy en el año 2020.

Empezamos a diferenciar los colectores híbridos según la parte de la que se obtiene una energía eléctrica, la parte de las células fotovoltaicas, al centrarnos en esta característica cabe destacar que su clasificación es exactamente igual al hecho en el apartado anterior de familias tecnológicas, diferenciándolas por cuál es su material de fabricación. Podremos diferenciar entre placas de silicio monocristalinas, de silicio policristalinas y de capa fina, teniendo en cuenta todos los subgrupos existentes de esta última. Al igual que en la tecnología fotovoltaica tradicional en las placas PVT también las placas de silicio tanto mono como policristalino son las más comunes y extendidas hoy en día.

A continuación, se adjunta una tabla extraída del artículo mencionado anteriormente, en la que a partir de diferentes autores y en diferentes años se establecen las condiciones de operación y la eficiencia, tanto térmica, eléctrica y total, de distintos tipos de placas híbridas dependiendo su parte fotovoltaica.

St. Nb	Reference (Author/s, year)	PV cell	Operating conditions	Efficiency			Type of study
				Thermal	Electrical	Total	
	Ibrahim et al. (2009a)	Poly-crystalline silicon	<ul style="list-style-type: none"> Solar radiation of 800 W/ m² Ambient temperature of 25 °C 	45%	10%	55%	<ul style="list-style-type: none"> Experimental
	Bernardo et al. (2011)	Mono-crystalline silicon	<ul style="list-style-type: none"> Incident beam radiation of 997 W/ m² Water inlet temperature of 28 °C 	45%	6.4%	–	<ul style="list-style-type: none"> Experimental
	Chemisana et al. (2011)	Crystalline silicon	–	65%	–	–	<ul style="list-style-type: none"> Experimental Theoretical
	Sonnerveld et al. (2011)	Mono-crystalline silicon	<ul style="list-style-type: none"> Solar radiation of 630 W/ m² and 792 W/ m² 	56%	11%	67%	<ul style="list-style-type: none"> Experimental
	Dupeyrat et al. (2011)	Mono-crystalline silicon	<ul style="list-style-type: none"> Total radiation of 960 W/ m² Ambient temperature varied between 30 and 33 °C Wind velocity of 3 m/s 	79%	8.8%	86.8%	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical Experimental
	Calise and Vanoli (2012)	InGaP/InGaAs/Ge	<ul style="list-style-type: none"> Inlet water temperature of 70 °C Ambient and sky temperature of 25 °C Wind velocity of 5 m/s Total and beam radiation of 1000 W/ m² and 800 W/ m² respectively 	56%-63%	20%-23%	77%-83%	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical
	Buonomano et al. (2013)	InGaP/InGaAs/Ge triple junction	<ul style="list-style-type: none"> Inlet fluid temperature of 150 °C Ambient and sky temperature of 25 °C Wind velocity of 5 m/s Total and beam radiation of 1000 W/ m² and 800 W/ m² respectively 	27%-58%	18%-24%	45%-82%	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical
	Renno and Petito (2013)	InGaP/InGaAs/Ge triple junction	–	67%-70%	19%-21%	86%-91%	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical
	Del Col et al. (2014)	InGaP/InGaAs/Ge triple junction	<ul style="list-style-type: none"> Inlet water temperature ranges between 20 and 80 °C Beam radiation of 1000 W/ m² 	41.6%	23.1%	64.7%	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical Experimental
	Hussain and Lee (2015)	GaAs and Ge	<ul style="list-style-type: none"> Solar radiation of 900 W/ m² Fluid inlet temperature of 25 °C 	68%	–	–	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical Experimental
	Xu et al. (2015)	InGaP/InGaAs/Ge triple junction	<ul style="list-style-type: none"> Ambient temperature between 15 and 17 °C 	54%	28%	84%	<ul style="list-style-type: none"> Experimental
	Yew et al. (2015)	Triple junction	<ul style="list-style-type: none"> Beam radiation of 700 W/ m² Solar irradiance of 1000 W/ m² Default temperature of 25 °C 	34.1%-38.7%	20%-25%	–	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical
	Mi et al. (2016)	GaInP/GaInAs/Ge triple junction	<ul style="list-style-type: none"> Solar irradiance of 900 W/ m² Ambient temperature of 25 °C 	–	–	–	<ul style="list-style-type: none"> Experimental
	Cui et al. (2016)	GaInP/InGaAs/G, c-Si, CIGS and GaAs	<ul style="list-style-type: none"> Ambient temperature of 27 °C Water inlet temperature of 20 °C PV cell temperature between 21 and 35 °C Total solar irradiance of 1000 W/m² 	–	–	25%-27%	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical
	Mojiri et al. (2016)	Silicon	–	50%	3.8%	–	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical Experimental
	Widyolar et al. (2017)	GaAs	<ul style="list-style-type: none"> Beam radiation of 700 W/m² Fluid inlet temperature between 100 and 500 °C 	37%	8%	–	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical Experimental
	Ceylan et al. (2016)	Silicon	<ul style="list-style-type: none"> Ambient temperature between 20 and 40 °C 	–	11%	–	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical Experimental
	Gürel (2016)	Silicon	<ul style="list-style-type: none"> Total radiation of 1000 W/m² PV cell temperature of 25 °C 	–	–	11%-16%	<ul style="list-style-type: none"> Experimental
	Xu et al. (2016)	InGaP/InGaAs/Ge	<ul style="list-style-type: none"> Ambient temperature of 25 °C Wind velocity of 4 m/s Beam radiation of 1000 W/m² 	60%	28%	–	<ul style="list-style-type: none"> Theoretical

Tabla 3: Conducted researches on hybrid systems according to the type of PV cell.

La siguiente característica a partir la cual vamos a diferenciar los diferentes tipos de PVT será el tipo de colector solar del que disponen, podremos diferenciar entre:

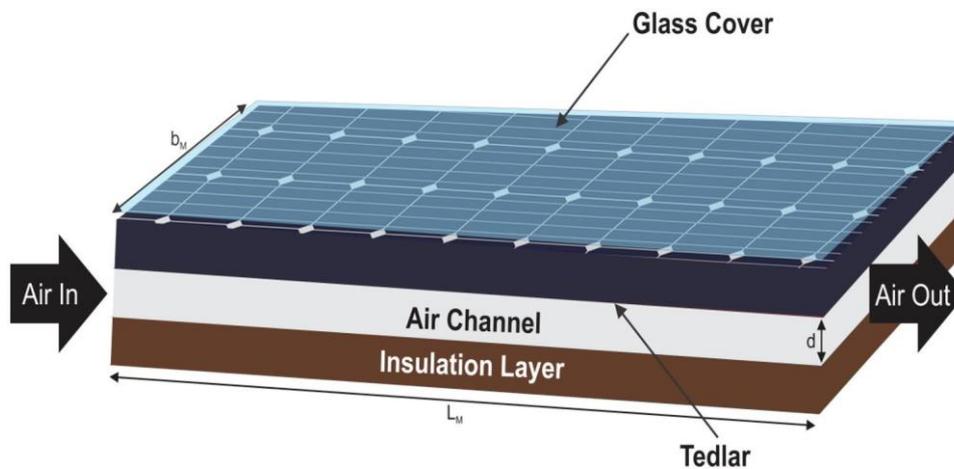
- Colector plano.
- Colector cilindro-parabólico.
- Colector de receptor central.
- Colector disco-parabólico.
- Lineal de Fresnel.

Entre todos estos el más común y el único que tiene una representación significativa en el mercado actual es el primero, el colector plano, ya que es el único que trabaja a

temperaturas alrededor de los 60°C , que es la temperatura que se obtiene en las placas PVT. El resto de los colectores a los cuales llamamos colectores de concentración son usados en la actualidad en centrales termosolares cuyo objetivo es calentar a altas temperaturas, en torno a los 400 o 500°C , el fluido caloportador para la generación de energía eléctrica.

El siguiente aspecto en el que nos centraremos es el fluido caloportador o fluido de trabajo, según su circulación podemos diferenciar en circulación natural o forzada, según el tipo de fluido con el que se trabaja, que actualmente lo más común es que sea aire, agua o una mezcla entre aire y agua, también podremos clasificar los distintos tipos de colectores PVT si el fluido entra por encima de la célula fotovoltaica o por debajo y por último también los clasificaremos si la entrada del fluido caloportador es única o por el contrario es múltiple.

Figura 4: Colector con aire como fluido de trabajo.



A continuación, se adjunta una tabla que al igual que en el caso anterior y siendo también del mismo artículo hace una recopilación de datos de diferentes sistemas PVT tanto de forma teórica y experimental respecto al fluido con el que se trabaja.

Tabla 4: Theoretical and experimental works on water or/and air PVT systems.

St. Nb	Reference(Author/s, Year)	Working fluid	Operating conditions	Efficiency Thermal	Electrical	Total	Type of study
	Hung et al. (2001)	Water	<ul style="list-style-type: none"> ● Total radiation between 200 and 900 W/m² ● Ambient temperature between 25 and 35 °C 	44.5%	9.1%	53.5%	● Experimental
	Zondag et al. (2003)	Water	<ul style="list-style-type: none"> ● Ambient temperature of 20 °C ● Sky temperature of 4 °C ● Incident angle 45° ● Wind velocity of 1 m/s 	52%-58%	8.1%-9.7%	–	● Theoretical ● Experimental
	Solanki et al. (2009)	Air	<ul style="list-style-type: none"> ● Total radiation of 800 W/m² ● Solar radiation of 600 W/m² ● Inlet fluid temperature of 38 °C 	42%	8.4%	51%	● Theoretical ● Experimental
	Aste et al. (2017)	Water	–	22%-29%	6%-14%	–	● Theoretical
	Ibrahim et al. (2009b)	Water	<ul style="list-style-type: none"> ● Solar radiation of 800 W/m² ● Wind velocity of 1 m/s 	50.12%	11.98%	68%	● Theoretical
	Xu et al. (2011)	Water	<ul style="list-style-type: none"> ● Solar radiation between 500 and 900 W/m² ● Wind velocity of 0.75 m/s ● Ambient temperature between 34.2 and 38.5 °C 	–	17.5%	–	● Experimental
	Bambook and Sproul (2012)	Air	<ul style="list-style-type: none"> ● Solar radiation of 800 W/m² ● Ambient temperature of 17 °C 	28%-55%	10.6%-12.2%	–	● Experimental
	Kim et al. (2014)	Water	–	30%	17%	47%	● Experimental
	Alobaid et al. (2017)	Water	–	–	10–35%	–	● Theoretical
	Fan et al. (2018)	Air	<ul style="list-style-type: none"> ● Wind velocity between 0 and 8 m/s ● Sky temperature between 10 and 22 °C ● Beam radiation up to 810 W/m² 	48.8%-56.9%	–	–	● Theoretical ● Experimental
	Kazemian et al. (2018)	Water	<ul style="list-style-type: none"> ● Total radiation between 400 and 580 W/m² ● Ambient temperature between 28 and 32 °C 	63.37%-70.89%	13.15%-14.35%	76%-84%	● Theoretical ● Experimental
	Tiwari et al. (2018b)	Air	<ul style="list-style-type: none"> ● Ambient temperature between 35 and 43 °C ● Total radiation between 100 and 900 W/m² ● Incident angle of 30° 	11.26%	26.68%	56.3%	● Theoretical
	Maatallah et al. (2019)	Water	<ul style="list-style-type: none"> ● Ambient temperature between 32 and 38 °C ● Total radiation between 390 and 560 W/m² 	26.87%	13.72%	40.59%	● Experimental
	Misha et al. (2019)	Water	<ul style="list-style-type: none"> ● Inlet water temperature of 26 °C ● Solar irradiance of 600, 800 and 1000 W/m² ● Wind velocity of 1 m/s 	59.6%	11.71%	–	● Theoretical ● Experimental
	Senthilraja et al. (2019)	WaterAir	<ul style="list-style-type: none"> ● Ambient temperature of 30 °C ● Ambient temperature between 34 and 38.6 °C ● Wind velocity between 0.6 and 2.3 m/s ● Total radiation between 420 and 940 W/m² 	33.8%31.1%	8.5%8%	42%38%	● Theoretical ● Experimental

Como comentario a la tabla y a los ensayos realizados en diferentes condiciones de operación, cabría señalar que por lo general el agua trabaja mejor o al menos obtiene una mayor eficiencia tanto térmica, eléctrica como global que en los colectores en los que se usa aire. Hay que tener en cuenta que esta afirmación es muy generalizada habría que tener en cuenta cada caso en concreto a la hora de tomar una decisión y seguir también otra serie de criterios además del de la eficiencia, como por ejemplo el criterio logístico o el económico que no son nada despreciables.

Los últimos criterios que vamos a adoptar en esta clasificación es si está o no acristalado y en caso de estarlo diferenciaremos entre único y múltiple y si tiene aislante térmico, en caso de tenerlo tendríamos que tener en cuenta cuál es dicho material que será usado como aislante térmico.

En las siguientes imágenes veremos un resumen y distintas formas de clasificar, aunque todas muy similares, los colectores PVT.

Figura 5: Clasificación colectores PVT.

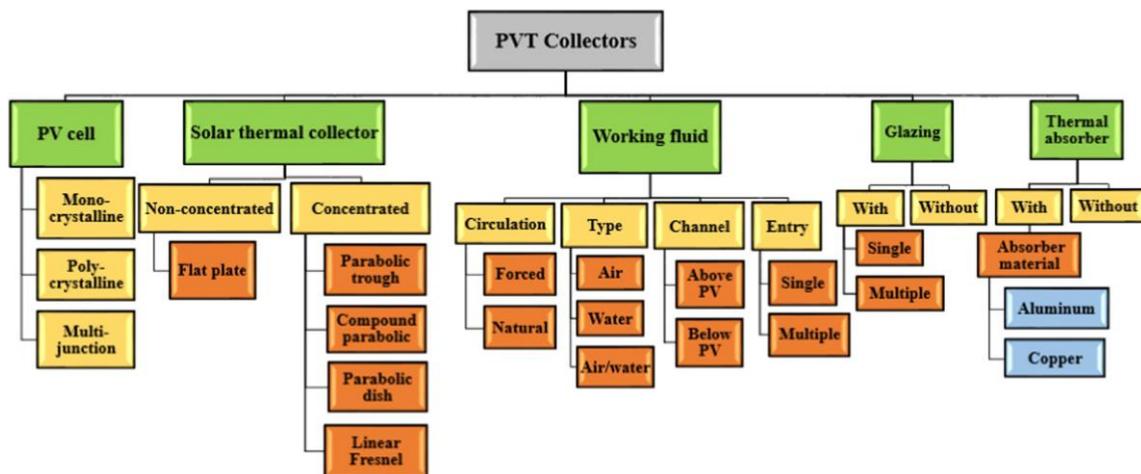
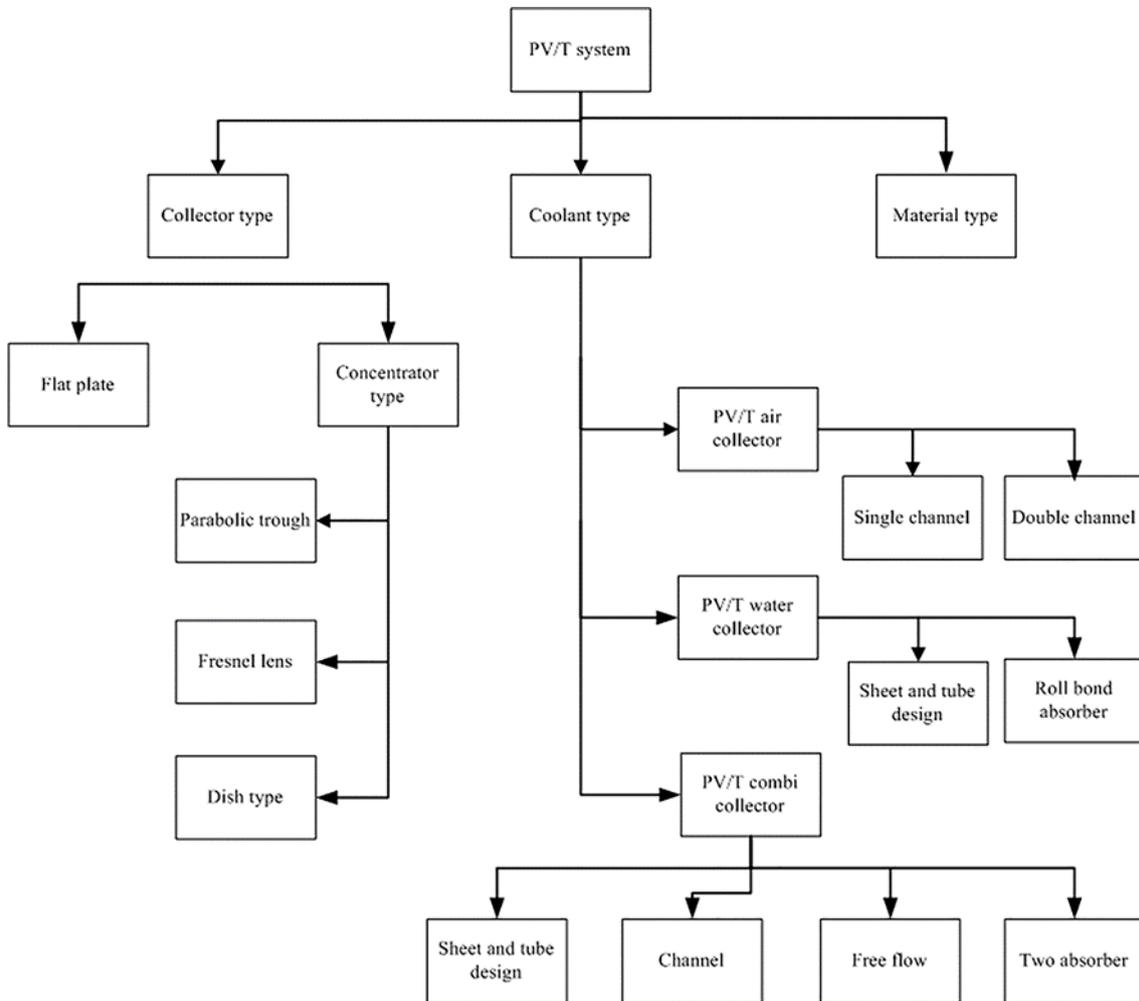


Figura 6: Clasificación sistemas PVT según el artículo: “Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement”.



Dentro del campo concepto de diseño también debemos tener en cuenta otras características a la hora de elegir un sistema PVT respecto a otro tipo de sistema para obtener energía eléctrica, térmica o ambas. Unas de las ventajas más importantes que tienen los sistemas híbridos respecto al resto de tecnologías es una economización muy importante del espacio. Otro detalle a tener en cuenta son las condiciones climáticas del lugar donde se quiere colocar el sistema PVT, habrá que tener en cuenta que estas

condiciones pueden variar a lo largo del año como se puede ver en las imágenes del artículo “*Investigation of Solar Photovoltaic-Thermal (PVT) and Solar Photovoltaic (PV) Performance: A Case Study in Ghana*”. Escrito por Saeed Abdul-Ganiyu, David A Quansah, Emmanuel W Ramde, Razak Seidu y Muyiwa S. Adaramola, publicado el 28 de mayo de 2020.

Figura 7: Variación de temperatura ambiente en Kumasi en 2019.

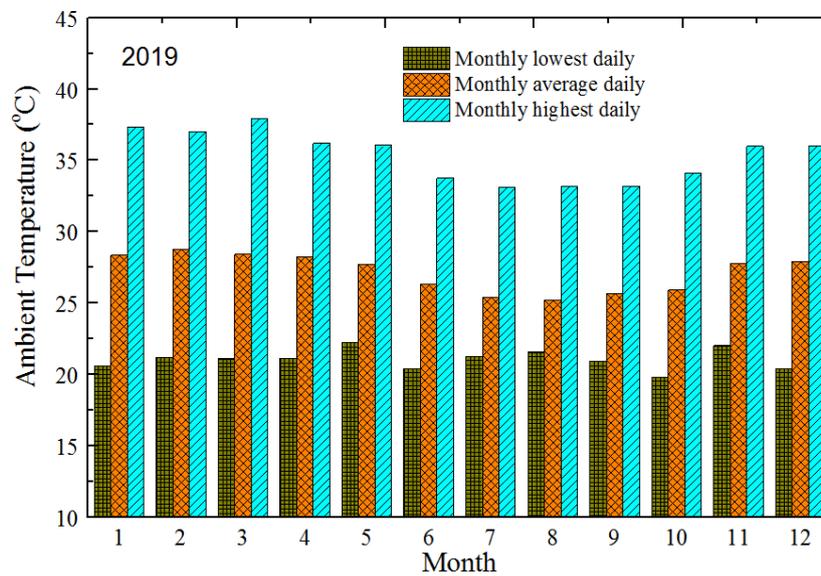
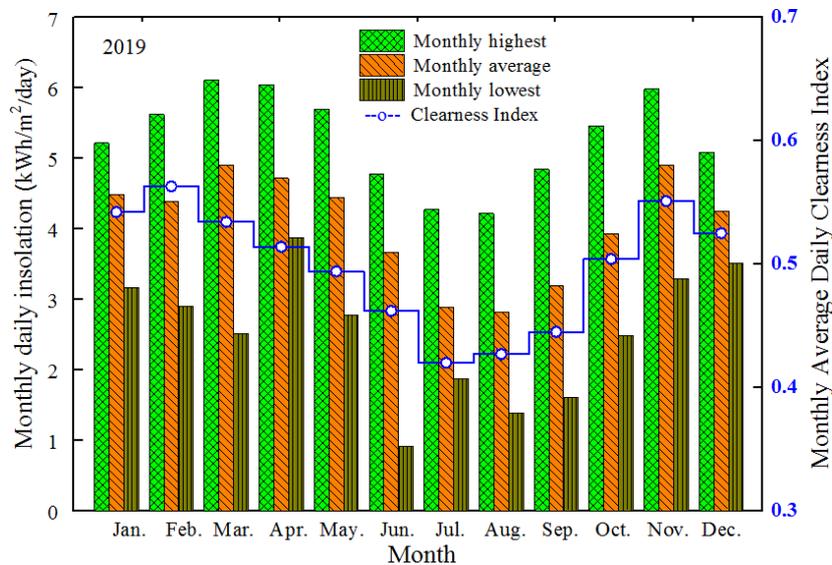


Figura 8: Measured monthly in-plane solar irradiation with clearness index from Homer SW.



ESTADO ACTUAL EN EL MUNDO

Desde el comienzo del desarrollo de la tecnología solar, se han diferenciado dos tipologías de paneles: los módulos fotovoltaicos que generan electricidad y los colectores térmicos que calientan agua.

Combinando ambas tecnologías surgen en los años 70 los primeros paneles solares híbridos. Se entienden por paneles solares híbridos a los paneles solares capaces de transformar la irradiación solar en electricidad y generar simultáneamente agua caliente con el mismo panel, además de refrigerarlo. Fruto de las investigaciones y evoluciones realizadas, esta tecnología tiene numerosas tipologías.

El hecho de que la instalación de la tecnología híbrida no se haya extendido se debe principalmente a que ambas tecnologías tenían dimensiones y propósitos muy diferentes.

La tecnología fotovoltaica ha estado enfocada a grandes instalaciones y los elevados costes indirectos de las pequeñas potencias, ha hecho poco rentable su uso a pequeña escala hasta la actualidad. La reducción de los precios sufrida durante los últimos años conlleva que las pequeñas instalaciones sean económicamente interesantes para el usuario final.

Por otro lado, la energía solar térmica está concebida para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria en los edificios, lo cual conlleva que las instalaciones sean relativamente pequeñas.

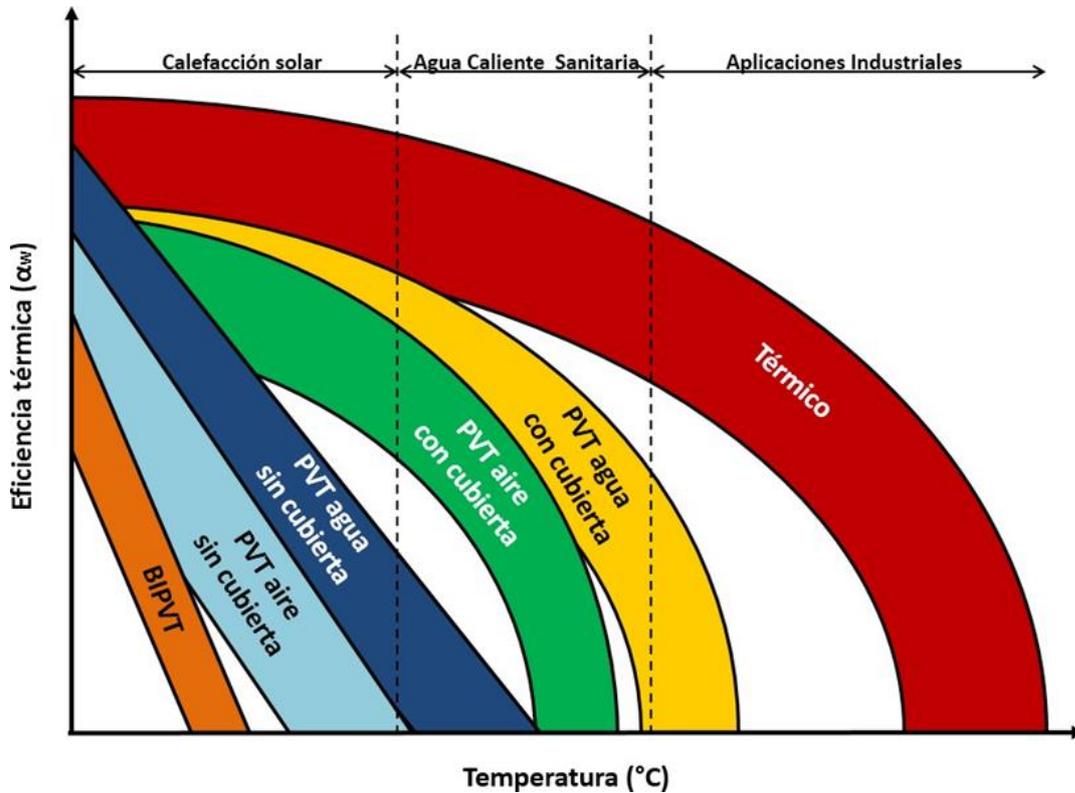
Desde una perspectiva global, el catalizador principal para que su desarrollo se produjese en la década de los 70, fue el incremento sustancial del precio del petróleo. Pero el desarrollo de los paneles híbridos está motivado por tres conceptos diferentes que

convergen hacia esta misma solución tecnológica. Por un lado, se perseguía conseguir mayores ahorros económicos mediante la integración solar en los edificios, ya que el aporte fotovoltaico tenía un rendimiento muy bajo. Por otro lado, los sistemas autónomos en los que el sistema de ventilación pudiese ser abastecido con placas fotovoltaicas, conllevó el aprovechamiento de este calor residual. Y, por último, se trató de mejorar el rendimiento eléctrico a partir del efecto refrigerador que tiene el aprovechamiento del calor. Estos tres conceptos caminaban hacia un mismo objetivo, los paneles híbridos.

Desde mediados de los años 70, los paneles híbridos han sido investigados por autores como Wolf (1976), Florschuetz (1979), Kern and Russell (1978) y Hendrie (1980 y 1981) los cuales han desarrollado los primeros modelos teóricos y estudios experimentales donde evaluaron la eficiencia y energía generada por diferentes tipologías de paneles híbridos.

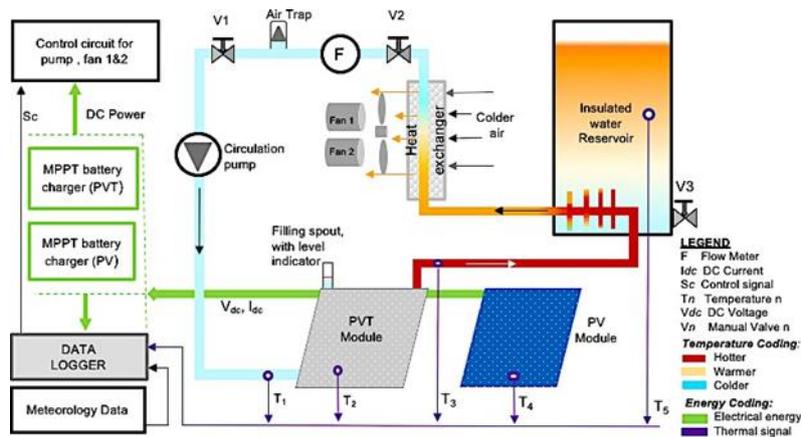
En los años 80 se continúa investigando sobre esta temática, en especial en tecnología plana (PVT) como Cox Iii and Raghuraman (1985), o Lalović, Kiss et al. (1986), aunque también comienza a investigarse sobre los paneles híbridos de concentración (CPVT), con trabajos como los de Mbewe, Card et al. (1985) o Hamdy, Luttmann et al. (1988). Ya en los años 90, algunos autores siguen desarrollando esta tecnología destacando grupos de trabajo como Garg(1997) que al menos durante una década trabaja en el desarrollo teórico y experimental del PVT refrigerados por aire y por agua estandarizando las abreviaciones PVT/a y PVT/w, respectivamente. Autores como Sopian, Yigit et al. (1995) consiguen avances en PVT/a con simple paso o doble paso, Prakash (1994) realiza modelos dinámicos para comparar el PVT/a con el PVT/w concluyendo que los refrigerados por agua tienen mejor eficiencia que los de aire, y Bergene and Løvvik (1995) desarrollan un modelo transitorio concluyendo que los PVT/w pueden alcanzar rendimientos globales entre el 60 % y el 80 %. D. Vries (1998) publica su tesis comparando diferentes tipologías de paneles híbridos incluyendo un combi- panel en el que utiliza agua y aire.

Figura 8: Mapa de eficiencia térmica según la temperatura de consumo.



En la siguiente imagen se mostrará un esquema básico del sistema PVT en el que se realizó el ensayo en Kumasi (Ghana) que se había nombrado en el apartado anterior apartado de concepto de diseño. En el esquema se puede ver como se distinguen dos circuitos, el primero el eléctrico, habría que tener en cuenta que parte de la electricidad generada se recircula para el control del circuito de bombas y ventiladores del circuito térmico por el que circula el fluido caloportador, en este caso el agua. Por otra parte, en el circuito térmico el agua obtiene un aumento de la temperatura y es llevado gracias a las bombas a un depósito de agua caliente sanitaria.

Figura 9: Esquema PVT instalado en Kumasi.



A continuación, se va a hacer una estimación de coste de un panel híbrido a partir de los datos obtenidos a través de internet de dos empresas españolas, esto nos servirá para poder tener una idea de cual es el coste de esta tecnología.

La primera empresa es Chromagen Solar Water Solutions, en su catálogo se puede observar que un panel híbrido WARIS tipo WRS200-ST48F con una potencia máxima de 200W, una intensidad máxima de operación de 8,1 A y un voltaje máximo de operación de 24,7 V, cuyo fluido de trabajo será agua tiene un coste de 2952,75€ sin tener en cuenta los impuestos que se aplicarían en España, si los tenemos en cuenta el precio ascendería a la cifra de 3663,58€.

Por otro lado, nos fijamos en el catálogo de la empresa Abora que también es española y tiene una amplia experiencia y trayectoria en el sector de la energía solar, especializada en el diseño, desarrollo y fabricación de paneles solares híbridos. Los dos modelos de los que se han obtenido datos son los siguientes:

- Modelo aH60Optium, cuyo precio de venta al público sería de 795€ por unidad, habría que tener en cuenta que la racorería, la estructura y la mano de obra no estaría en el precio. Las características de este panel se pueden ver a continuación:

+ Especificaciones Generales	
Largo x Ancho x Espesor	1650 x 995 x 82 mm
Area Total	1.65m ²
Area de Apertura	1.57 m ²
Nº células	60
Peso	45 kg.
Vidrio Frontal	3.2 mm. templado
Marco	Aluminio
Protección Caja de Conex.	IP65
Nº Diodos	3 diodos
Dimensiones de célula	156 x 156
Tipo de conexión FV / Longitud cables	Solarlok PV4 / 1m

Tipo de célula	Mono-cristalina
Potencia Nominal (W)	260
Tensión Máxima Potencia (Vmpp)	31.44 V
Corriente Máxima Potencia (Impp)	8.59A
Tensión Circuito Abierto (Voc)	38.65 V
Corriente Cortocircuito (Isc)	9.07 A
Eficiencia del módulo (%)	16.01
Tolerancia de Potencia (W)	0/+3%
Tensión Máxima del Sistema	DC 1000 V (IEC)
Backsheet	Negro
Coefficiente de temperatura de Pmpp	-0.43%/°C
Coefficiente de temperatura de Voc	-0.34%/°C
Coefficiente de temperatura de Isc	+0.03%/°C
Corriente inversa máxima	15A
Temperatura NOCT*	45+/-2 °C

Especificaciones Térmicas	
Rendimiento óptico	0.59
Coef. Pérdidas Térmicas,a1	3.3W/m ² .K
Coef. Pérdidas Térmicas,a2	0.018W/m ² .K ²
Volumen líquido interior	1.5 L
Temperatura de estancamiento	154,9 °C
Num. Conexiones hidráulicas	4 conexiones
Medida Conexión hidráulica	conexionado rápido
Presión máxima admisible	10 bar

- Por otro lado el modelo aH60 Black que tiene un precio de venta al público de 895€ por unidad, al igual que el modelo anterior habría que tener en cuenta que la racorería, la estructura y la mano de obra quedan fuera del precio mencionado anteriormente. Las características de este modelo son las siguientes:

Especificaciones Generales	
Largo x Ancho x Espesor	1650 x 995 x 82 mm
AreaTotal	1.65m ²
Area de Apertura	1.57 m ²
Nº células	60
Peso	45 kg.
Vidrio Frontal	3.2 mm.templado
Marco	Aluminio
Protección Caja de Conex.	IP65
Nº Diodos	3 diodos
Dimensiones de célula	156 x 156
Tipo de conexión FV / Longitud cables	Solarlok PV4 / 1m

Tipo de célula	Mono-cristalina
Potencia Nominal (W)	260
Tensión Máxima Potencia (Vmpp)	31.44 V
Corriente Máxima Potencia (Impp)	8.59A
Tensión Circuito Abierto (Voc)	38.65 V
Corriente Cortocircuito (Isc)	9.07 A
Eficiencia del módulo (%)	16.01
Tolerancia de Potencia (W)	0/+3%
Tensión Máxima del Sistema	DC 1000 V (IEC)
Backsheet	Negro
Coeficiente de temperatura de Pmpp	-0.43%/°C
Coeficiente de temperatura de Voc	-0.34%/°C
Coeficiente de temperatura de Isc	+0.03%/°C
Corriente inversa máxima	15A
Temperatura NOCT*	45+/-2 °C

Especificaciones Térmicas	
Rendimiento óptico	0.56
Coef. Pérdidas Térmicas, a1	3.3 W/m ² .K
Coef. Pérdidas Térmicas, a2	0.018 W/m ² .K ²
Volumen líquido interior	1.5 L
Temperatura de estancamiento	152,1 °C
Num. Conexiones hidráulicas	4 conexiones
Medida Conexión hidráulica	conexiónado rápido
Presión máxima admisible	10 bar

Aunque es muy importante saber los costos materiales del proyecto dentro del tema económico no podemos dejar de lado el tema de las tarifas económicas y las ayudas que pueden dar los gobiernos locales, un buen ejemplo de esto es el artículo “*Techno-economic analysis of hybrid PV/T systems under different climate scenarios and energy tariffs*” escrito por J.A. Aguilar-Jiménez, L. Hernández-Callejo, V. Alonso-Gómez, N. Velázquez, R. López-Zavala, A. Acuña y D. Mariano-Hernández publicado en 2020 en la revista Solar Energy.

En este artículo se compara la energía y el ahorro obtenidos con 5 módulos PVT en 5 lugares con distintas condiciones climatológicas y distintas tarifas energéticas. Los lugares eran: Mexicali, Soria, Bigene, Fresno y Madison. En el artículo se observa que las ciudades con altas temperaturas ambientales y altos recursos solares, como era de esperar obtenían una mayor energía que las ciudades con temperaturas bajas gracias a los sistemas híbridos, sin embargo en alguna de estas ciudades de condiciones menos favorables para la producción de energía solar al centrarnos únicamente en el tema económico se observaba que las tarifas energéticas eran más bajas. Este caso pone de manifiesto que las tarifas energéticas locales tienen un gran impacto, en ocasiones tienen un impacto más significativo en la viabilidad del proyecto que las climatológicas.

Modules	Mexicali	Soria	Bigene	Fresno	Madison
1	\$ -1,076.4	\$ 627.7	\$ -1,309.1	\$ -705.7	\$ -1,282.8
2	\$ -453.4	\$ 2,396.5	\$ -717.3	\$ 254.5	\$ -953.4
3	\$ -0.9	\$ 3,823.1	\$ -322.4	\$ 1,028.1	\$ -743.1
4	\$ 382.4	\$ 5,083.0	\$ 252.4	\$ 1,693.9	\$ -617.7
5	\$ 735.7	\$ 6,279.9	\$ 370.7	\$ 2,377.3	\$ -490.6
6	\$ 1,071.3	\$ 7,415.2	\$ 634.0	\$ 3,008.6	\$ -401.4

Tabla 4: Ahorro económico durante la vida útil del sistema PVT sin considerar subsidios.

Lo último que cabría destacar en este apartado y no por eso menos importante es la falta de estándares, normas y certificaciones de esta tecnología que se encuentra en su etapa inicial en el mercado, esta ausencia hace que exista un enorme déficit de información técnica para este tipo de colectores a la hora de realizar ensayos, de manera que esto conduce a una implementación de políticas restringidas por parte de las entidades gubernamentales, menos incentivos para los productores y más cautela por parte del consumidor al adquirir dichos productos, la suma de todos estos factores mencionados anteriormente dan lugar a una fuerte barrera de mercado. Esta situación como se puede deducir no es favorable para un despegue

a corto plazo en el mercado, y es uno de los aspectos que se tienen que mejorar en un futuro, se debería buscar una discusión entre los integrantes del mercado para apuntar al desarrollo de regulaciones y estandarizaciones.

METODOLOGÍAS DE MODELADO Y SIMULACIÓN.

Si nos centramos en los métodos y programas existente para el modelado, la simulación y la experimentación de los sistemas PVT encontraremos con distintos softwares capaces de realizar simulaciones. Yo me centraré en el uso del programa TRNSYS el conozco y he sacado toda la información del artículo “*Performance modeling of PVT collectors: Implementation, validation and parameter identification approach using TRNSYS*” el cuál tiene por autores a Danny Jonasa, Manuel Lämmle, Danjana Theis, Sebastian Schneider y Georg Frey, publicado en la revista Solar Energy en el año 2019.

En este artículo habla y explica la modelación de ciertos parámetros de los colectores PVT, a través del uso de dicha aplicación. Se diferencian entre 2 formas de uso de esta aplicación:

- La primera es conocida como two-step, consiste en realizar la simulación a través de TRNSYS por separado, es decir, primero la eléctrica o la térmica y a continuación la contraria.

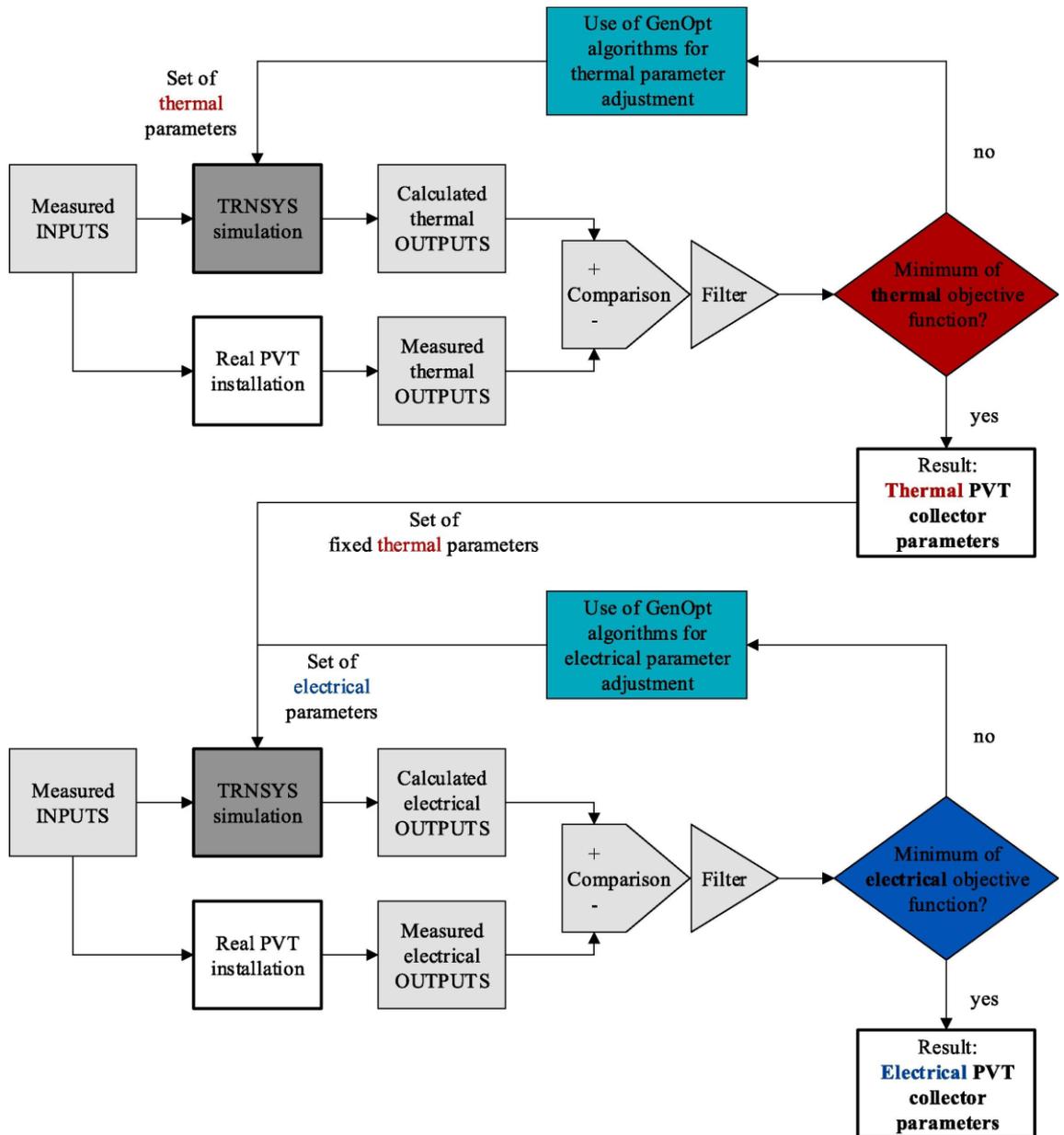


Figura 10: Esquema método two-step.

- El segundo método que se puede usar es el denominado como one-step, que como su propio nombre indica consiste en una única simulación, es decir, simular a la vez los parámetros eléctricos y los térmicos.

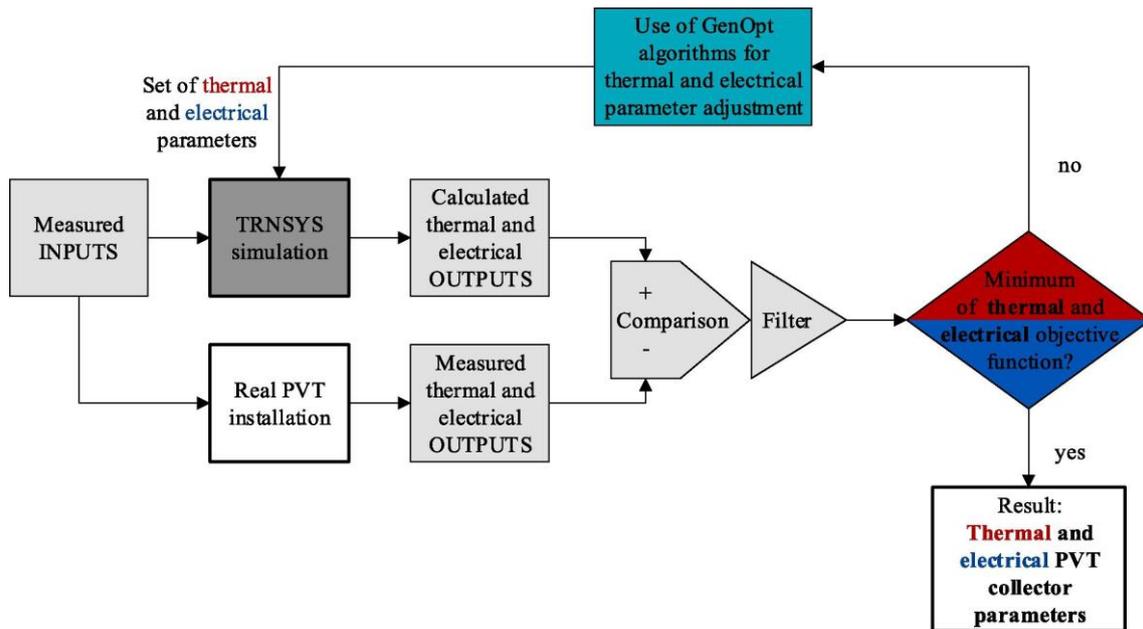


Figura 11: Esquema método one-step.

CONCLUSIONES Y TENDENCIA AL FUTURO.

Como conclusión a este trabajo de investigación en el que se ha intentado entender el funcionamiento y la situación actual de la tecnología PVT, podemos decir que esta nueva tecnología que no solo obtiene un beneficio eléctrico y además añade una obtención de energía térmica que en el caso de los paneles fotovoltaicos tradicionales no tienes, si no que al refrigerar y bajar la temperatura de la superficie del panel fotovoltaico hace que la eficiencia eléctrica mejore notablemente.

La energía térmica que se obtiene hoy en día tiene uno uso como agua caliente sanitaria ya que la temperatura que se logra obtener en dicha agua puede llegar a unos 60°C como máximo lo cuál nos sirve para este uso, además de refrigerar la placa PV y mejorar notablemente su eficiencia eléctrica. Si hablamos de la parte térmica de cara a un futuro puede que una solución o una forma de mejorar y aumentar la cantidad de energía térmica que se obtenga sería intentar ir introduciendo otros tipos de colectores que ya se usan en algunas centrales termosolares y así obtener un mayor gradiente en el fluido de trabajo.

Otra mejora aplicable en cuanto al tema de una mayor obtención de energía térmica podría ser el uso de distintos tipos de fluidos de trabajo que permitan un mayor gradiente de temperatura en ellos, lo que haría al sistema PVT más eficiente. En la actualidad, aunque no esté ampliamente extendido se están realizando ensayos con distintos tipos de nanofluidos, aunque existen un amplio margen de crecimiento y mejora en este sentido.

Otras de las ventajas de estos sistemas es que aunque la energía que genera no es muy abundante, por tanto para grandes empresas que demandan una gran cantidad de energía tanto eléctrica como térmica pueden ser útiles pero no podrían depender exclusivamente de esta fuente de energía, no obstante el espacio que ocupa es relativamente pequeño, estas dos características hacen de esta tecnología perfecta para el uso de pequeños consumidores aislados de la red, ya que permite economizar el espacio y además dotar a la vivienda de agua caliente sanitaria y electricidad, obviamente hay que tener en cuenta que la ubicación geográfica y situación climatológicas hay que tenerlas totalmente en

cuenta para tomar una decisión y ver la viabilidad del proyecto, al igual que la tarifa energética del lugar y las ayudas gubernamentales si existen.

En cuanto al mercado actual de esta nueva tecnología es escaso, ya que es relativamente nueva, y además la falta de estándares, normas y certificaciones de esta tecnología que se encuentra en su etapa inicial en el mercado, esta ausencia hace que exista un enorme déficit de información técnica para este tipo de colectores a la hora de realizar ensayos, de manera que esto conduce a una implementación de políticas restringidas por parte de las entidades gubernamentales, menos incentivos para los productores y más cautela por parte del consumidor al adquirir dichos productos, la suma de todos estos factores mencionados anteriormente dan lugar a una fuerte barrera de mercado. Esta situación como se puede deducir no es favorable para un despegue a corto plazo en el mercado, y es uno de los aspectos que se tienen que mejorar en un futuro, se debería buscar una discusión entre los integrantes del mercado para apuntar al desarrollo de regulaciones y estandarizaciones.

Por último, creo que de cara al futuro los sistemas híbridos tienen mucho potencial, ya que como todas las energías renovables creo que tendrán un papel muy importante ya no solo en el mercado energético sino también en la vida diaria de cada uno. Además, hay que tener en cuenta que más pronto que tarde habrá una estandarización de normas y certificados lo que hará que sea mucho más fácil el crecimiento en el mercado de los sistemas PVT para todos, tanto consumidores y proveedores, esto también podría hacer posible mayores incentivos y subsidios a este tipo de energía limpia por parte de organismos gubernamentales haciendo que los precios se hagan más asequibles. Todo esto podría hacer que exista un crecimiento de esta tecnología, veremos hasta que nivel.