Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Modelado de un panel solar híbrido a partir de datos experimentales

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Delgado González

DIRECTORES: Miguel Ángel Álvarez Feijoo
Elena Arce Fariña
Cristina Alonso Tristán

CURSO ACADÉMICO: 2016-2017

Universidade Vigo

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Modelado de un panel solar híbrido a partir de datos experimentales

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Infantería de Marina

Universidade Vigo

RESUMEN

Las energías renovables, entre ellas la energía solar, tecnología fotovoltaica (PV) y térmica (T), están adquiriendo un papel cada vez más relevante en el ámbito energético, debido, fundamentalmente, a cuestiones medioambientales. Factores como el cambio climático y la falta de sostenibilidad de otros medios de obtención de energía, hacen que las energías renovables se posicionen como garantía de un mundo sostenible. Fruto de este desarrollo, aparecen los sistemas híbridos fotovoltaico/térmicos (PV/T), que aprovechan la radiación solar para la producción tanto de energía eléctrica como térmica. Estos sistemas ofrecen rendimientos visiblemente mayores que los sistemas PV. Esto es, la producción de electricidad de un sistema híbrido PV/T puede ser significativamente mayor que la obtenida por un sistema PV convencional, puesto que la refrigeración de las células fotovoltaicas provoca una reducción en la temperatura de éstas, lo cual influye directamente en el rendimiento del panel. Por otro lado, el fluido utilizado en la instalación se podrá calentar a la temperatura deseada y posteriormente destinarla a uso doméstico.

Bajo estas consideraciones, en el presente trabajo se han estudiado las prestaciones que ofrece un panel híbrido, mediante la simulación en TRNSYS de una instalación real situada en la localidad de Burgos. Además, se ha analizado la viabilidad de implementación de una instalación de estas características en maniobras y despliegues de unidades de Infantería de Marina (IM). Para ello, se han recogido datos en cuatro puntos de la Península Ibérica, así como en la capital Iraquí, Bagdad.

PALABRAS CLAVE

Energías renovables, panel solar híbrido, fotovoltaico/térmico (PV/T), Infantería de Marina (IM).

AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar mostrando mi más sincero agradecimiento a mis tutores, Elena Arce Fariña y Miguel Ángel Álvarez Feijoo, por haberme apoyado durante la realización de este trabajo, a pesar de dirigir muchos trabajos más.

Al profesor Guillermo Rey González, por haberme ayudado en momentos puntuales decisivos con la simulación en TRNSYS.

A mis compañeros Kike, Nachos y Nanos. No habría sido posible llevar a cabo el trabajo sin el incesante apoyo de ellos.

Agradezco especialmente a mis padres y hermanos que siempre me animaron a seguir adelante, tanto durante la realización de este trabajo, como a lo largo de todo el periodo de formación en la Escuela Naval Militar/Centro Universitario de la Defensa.

CONTENIDO

Contenido 1
Índice de Figuras 3
Índice de Tablas 6
1 Introducción y objetivos 7
1.1 Introducción 7
1.2 Objetivos 8
2 Estado del arte 9
2.1 Las energías renovables 9
2.1.1 El cambio climático y el Protocolo de Kioto 9
2.1.2 Potencial de las tecnologías basadas en energía renovable 10
2.1.3 La energía solar 11
2.1.4 Tecnologías fotovoltaicas existentes 13
2.2 Energía solar fotovoltaica 16
3.2.1 Descripción de sistemas fotovoltaicos (PV) 16
2.2.2 Conversión de energía solar en electricidad 18
2.2.3 Pérdidas y rendimiento de la célula fotovoltaica 21
2.2.4 Módulos fotovoltaicos 21
2.2.5 Magnitudes y características 22
2.3 Energía solar térmica 22
2.3.1 Calentamiento de aire 22
2.3.2 Producción de agua caliente sanitaria 24
2.3.3 Producción de agua caliente para calefacción 27
2.3.4 Funcionamiento de una instalación solar 29
2.3.5 Elementos principales de una instalación solar 29
2.3.6 Sistemas híbridos 31
2.4 Paneles solares Fotovoltaico/Térmicos PV/T 33
2.4.1 Tipos de paneles PV/T 33
2.5 Descripción de la instalación real bajo estudio 37
2.5.1 Elementos de la instalación 38
2.5.2 Coste de la instalación 41
2.5.3 Instalación fotovoltaica 42
2.6 Descripción del modelo PV/T 43
3 Metodología 45

3.1 Software empleado 45
3.1.1 TRNSYS 45
3.1.2 Colector PV/T bajo estudio 45
3.2 Demanda eléctrica por equipos y unidades 47
3.2.1 Equipos de uso individual 47
3.2.2 Equipos de uso colectivo 47
3.3 Consumos de los equipos en función de sus perfiles de uso 48
3.4 Consumo durante el campamento en el Teleno 50
3.5 Modelo TRNSYS 52
3.6 Resumen de los parámetros de referencia utilizados para la simulación 54
3.7 Lugares objeto de estudio 54
3.7.1 Clasificación Köppen para la Península Ibérica 54
3.8 Resultados de la simulación 58
3.8.1 Almería 58
3.8.2 Burgos 60
3.8.3 León 61
3.8.4 Pontevedra 63
3.8.5 Bagdad 65
3.9 Comparación de los resultados 67
3.9.1 Producción eléctrica 67
3.10 Comparación de los datos con los obtenidos en la instalación real 69
3.11 Estudio de viabilidad de uso de un panel PV/T en campamento en el Teleno 71
3.12 Posibilidad de instalación de un sistema de paneles PV/T en una base permanente en Bagdad 72
3.13 Amortización de la instalación para campamentos no permanentes 72
4 Conclusiones y líneas futuras 79
4.1 Conclusiones 79
4.2 Líneas futuras 80
5 Bibliografía 81
Anexo I: Descripción de los elementos utilizados en el modelo de TRNSYS 84
Anexo II: Disposición de los paneles en el Teleno 87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Clasificación de los colectores PV/T [1] 8
Figura 2-1 Efecto invernadero [3] 10
Figura 2-2 Energía por unidad de superficie de cada fuente de energía [4] 11
Figura 2-3 Superficie que ocuparía cada tecnología [5] 11
Figura 2-4 Protuberancia solar [6] 12
Figura 2-5 Representación de los flujos de energía entre el espacio, la atmósfera y la superficie terrestre 12
Figura 2-6 Tipos de células de 1ª generación [8] 14
Figura 2-7 Célula solar HIT [9] 14
Figura 2-8 Célula solar de película delgada [10] 15
Figura 2-9 Célula solar de perovskita [12] 15
Figura 2-10 Eficiencia de las distintas tecnologías usadas en las células solares [13] 16
Figura 3-10 Tipos de sistemas fotovoltaicos 16
Figura 2-12 Esquema de un sistema fotovoltaico [14] 17
Figura 2-13 Hueco creado por la radiación 19
Figura 2-14 Formación de un campo eléctrico en una unión PN [2] 19
Figura 2-15 Esquema de una célula fotovoltaica 20
Figura 2-16 Flujo de electrones de la zona P a N 20
Figura 2-17 Diseño y funcionamiento de una célula solar de silicio cristalino [2] 21
Figura 2-18 Varias células fotovoltaicas hacen un módulo y varios módulos un array 21
Figura 2-19 Composición de un módulo fotovoltaico [2] 22
Figura 2-20 Calentamiento del aire en un panel solar 23
Figura 2-21 Sistema de calefacción con almacenamiento 24
Figura 2-22 Producción de ACS [16] 24
Figura 2-23 Producción ACS con bomba 25
Figura 2-24 Sistema termosifón 25
Figura 2-25 Tanque de estratificación 26
Figura 2-26 Disposición del sistema de aporte auxiliar 27
Figura 2-27 Tipos de carga térmica 27
Figura 2-28 Esquema básico de una instalación solar 29
Figura 2-29 Curva de rendimiento de un captador solar 30
Figura 2-30 Esquemas de una instalación de circuito abierto (izquierda) y circuito cerrado (derecha) 30

Figura 2-31 Esquema de una instalación de circulación natural (izquierda) y circulación forzada (derecha)....30
Figura 2-32 Diagrama de bloques de un SHGE [17] 31
Figura 2-33 Topología en serie de un SGHE [17]....32
Figura 2-34 Topología en paralelo con acoplamiento en paralelo de un SHGE [17] 32
Figura 2-35 Topología en paralelo con acoplamiento en CA [17]....33
Figura 2-36 Esquema de colectores de aire PV/T [19]....34
Figura 2-37 Colector de aire con aletas [19] 34
Figura 2-38 Esquema PV/T en fachada refrigerado por aire....34
Figura 2-39 Clasificación de los colectores PV/T basados en fluidos líquidos 35
Figura 2-40 Configuraciones posibles de colectores PV/T de agua....35
Figura 2-41 Geometrías estudiadas para un colector 35
Figura 2-42 Esquemas PV/T mixtos agua-aire [19]....36
Figura 2-43 Colectores de concentración parabólica [19]....36
Figura 2-44 Colector PV/T con concentración mediante lentes [19]....37
Figura 2-45 Instalación real....38
Figura 2-46 Aerotermo....39
Figura 2-47 Enfriador de agua....39
Figura 2-48 Depósito de inercia 40
Figura 2-49 Control programable....40
Figura 2-50 Esquema de la instalación solar fotovoltaica aislada....42
Figura 2-51 Balance de energía en un PV/T y si equivalente térmico 43
Figura 3-1 Colector utilizado en el módulo híbrido....46
Figura 3-2 Medidor de consumo eléctrico utilizado 50
Figura 3-3 Modelo TRNSYS 52
Figura 3-4 Diagrama de bloques de la simulación....54
Figura 3-5 Clasificación Köppen 56
Figura 3-6 Irradiancia Global Media (1983-2005) (kWh/m^2 por día) [23]....57
Figura 3-7 Irradiancia global, directa y difusa de las ciudades bajo estudio [23]....57
Figura 3-8 Radiación incidente media en Almería....59
Figura 3-9 Producción energética en Almería....59
Figura 3-10 Radiación incidente media en Burgos 60
Figura 3-11 Producción energética en Burgos 61
Figura 3-12 Radiación incidente media en León....62
Figura 3-13 Producción energética en León....63
Figura 3-14 Radiación incidente media en Pontevedra....64

Figura 3-15 Producción energética en Pontevedra 65
Figura 3-16 Radiación incidente media en Bagdad 66
Figura 3-17 Producción energética en Bagdad 66
Figura 3-18 Producción eléctrica de todos los lugares propuestos 67
Figura 3-19 Temperatura de la célula fotovoltaica 68
Figura 3-20 Voltaje de la célula/módulos (V) [24] 68
Figura 3-21 Comparación de potencia eléctrica y térmica en Burgos 69
Figura 3-22 Comparación radiación incidente media mensual AEMET/METEONORM 70
Figura 3-23 Distribución de estaciones meteorológicas de METEONORM 71
Figura 0-1 Diagrama grid del Teleno 87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Balance energético [7] 13
Tabla 2-2 Parámetros eléctricos del panel 38
Tabla 2-3 Coste de la instalación 41
Tabla 3-1 Datos eléctricos del módulo solar 46
Tabla 3-2 Características técnicas del colector 46
Tabla 3-3 Horas de uso de los visores 47
Tabla 3-4 Horas de uso equipos de comunicaciones 47
Tabla 3-5 Tiempo de uso de equipos colectivos 48
Tabla 3-6 Consumo visores 48
Tabla 3-7 Consumo equipos de comunicaciones 48
Tabla 3-8 Consumo equipos de uso colectivo 49
Tabla 3-9 Consumo total equipos individuales de una Compañía 50
Tabla 3-10 Consumo eléctrico del campamento 51
Tabla 3-11 Consumo térmico 51
Tabla 3-12 Lista de types utilizados en el modelo TRNSYS 53
Tabla 3-13 Parámetros de referencia de la simulación 54
Tabla 3-14 Datos Almería 58
Tabla 3-15 Datos obtenidos en Burgos 60
Tabla 3-16 Datos obtenidos en León 62
Tabla 3-17 Datos obtenidos en Pontevedra 64
Tabla 3-18 Datos obtenidos en Bagdad 65
Tabla 3-19 Comparación de los resultados reales y simulados en Burgos 69
Tabla 3-20 Datos registrados 72
Tabla 3-21 Consumo total base permanente 72
Tabla 3-22 Demanda eléctrica campamento IM 74
Tabla 3-23 Precio de los combustibles más comunes para el año 2017 [26] 75
Tabla 3-24 Precio de una bombona de gas propano 75
Tabla 3-25 Demanda térmica de campamento IM 76
Tabla 3-26 Beneficio anual acumulado cuatro paneles 77
Tabla 3-27 Beneficio anual acumulado dos paneles 78

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La energía solar es considerada la energía del futuro, pues es renovable, no contaminante y fácilmente accesible. Esta energía se puede aprovechar para calentar un fluido (energía solar térmica), para obtener electricidad (energía solar fotovoltaica), o para ambos propósitos a la vez.

La producción de energía térmica se basa en colectores solares por los que se hace circular un fluido que se calienta al pasar por los conductos del panel.

Mientras que la fotovoltaica utiliza células fotoeléctricas para transformar la energía solar en energía eléctrica. En una célula solar fotovoltaica (PV), la energía absorbida procedente de la radiación solar es parcialmente convertida en electricidad por el efecto fotoeléctrico y el exceso de calor generado se disipa a través de la célula solar. El calor adicional generado en la célula solar trae consigo un aumento en la temperatura de dicha célula. Cuando la temperatura aumenta, la concentración intrínseca de portadores aumenta, provocando un incremento en la corriente de saturación de las uniones PN (huecos e impurezas). Este incremento en la corriente de saturación disminuye el potencial de circuito abierto y la producción de energía. Por lo tanto, el incremento de la temperatura de las células solares disminuye el rendimiento del panel. Esto limita la tanto la eficiencia de generación de energía como la vida útil de las células solares. Una buena opción para solventar este problema es la utilización de colectores térmicos que combinados con los paneles fotovoltaicos constituyen lo que se denominan sistemas híbridos. Los colectores térmicos son capaces de absorber el exceso de calor generado en las células haciendo circular un fluido refrigerante por la parte posterior del panel solar fotovoltaico PV. El enfriamiento mejora la potencia de salida así como el rendimiento eléctrico mediante la disminución de la variación ascendente de la temperatura. A su vez, el calor recolectado puede ser aprovechado para calentar agua caliente sanitaria, o para su utilización en sistemas de calefacción domésticos.

Los paneles solares fotovoltaico/térmicos PV/T ofrecen ventajas económicas en comparación con una combinación de dos instalaciones separadas, térmica y fotovoltaica. Los sistemas PV/T producen tanto calor como energía eléctrica, y ofrecen rendimientos visiblemente mayores que los sistemas PV. Son adecuados especialmente en lugares donde el espacio para la instalación es limitado, ofreciendo mayor rendimiento por unidad de superficie y una reducción en el coste. Por otro lado, los sistemas PV/T son flexibles, tienen una vida útil mayor. Puesto que no hay elementos del sistema móviles, son menos ruidosos que otras tecnologías renovables. Estéticamente, son más vistosos que los sistemas en los que se combinan dos tipos de instalaciones separadas, térmica y fotovoltaica. [1]

Dependiendo del tipo de módulo, su diseño, tipo de fluido refrigerante y la intensidad de la radiación solar media, hay varios tipos de sistemas PV/T.

La clasificación general de los colectores PV/T se puede ver en la siguiente figura:

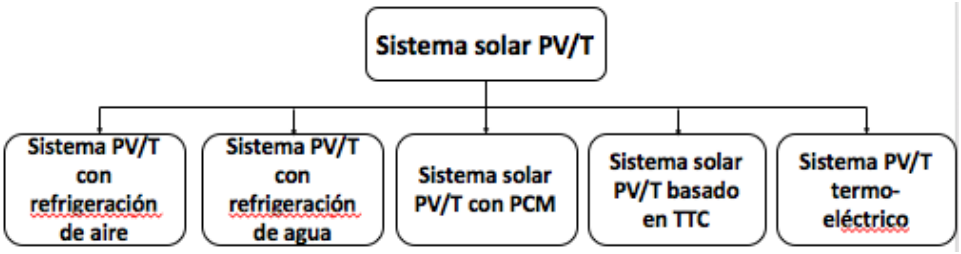


Figura 1-1 Clasificación de los colectores PV/T [1]

De los citados en la Figura 1-1, el más utilizado es el que emplea agua como refrigerante. Un sistema PV/T que utiliza agua como fluido refrigerante puede conseguir un rendimiento eléctrico de 10-12% y una eficiencia térmica de 33-72% [1]. El problema de este tipo de sistemas es que la eficiencia térmica disminuye cuando se demandan altas temperaturas, mayores de 35ºC.

Como se ha mencionado anteriormente, los paneles híbridos pueden conseguir una eficiencia global mayor, pues convierten mayor cantidad de radiación incidente en energía aprovechable. Sin embargo, el rendimiento eléctrico y térmico disminuye cuando se trabaja con temperaturas más elevadas.

En este trabajo, el panel solar fotovoltaico/térmico bajo estudio se ha instalado para producir energía eléctrica y calentar agua caliente sanitaria. La instalación bajo estudio se encuentra en Burgos y se pretende modelarlo en TRNSYS para evaluar la instalación real y estudiar su comportamiento en caso de ser trasladada a otras localidades. De esta forma, se pretende verificar su viabilidad de uso en el ámbito militar, concretamente en los lugares donde recientemente ha habido despliegues, por ejemplo en Afganistán o Irak. Se pretende estudiar la cantidad de energía eléctrica y térmica que es capaz de proporcionar en estos lugares y si sería capaz de satisfacer las necesidades energéticas del contingente desplegado en esas zonas de forma permanente, disminuyendo así el coste energético de otras tecnologías y aumentando la flexibilidad energética.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el modelado de un panel solar híbrido en TRNSYS basándose en una instalación real en Burgos, y determinar, mediante simulación en distintas localidades, en qué localización y en qué condiciones este sistema puede proporcionar una cantidad de energía eléctrica y térmica mayor, ofreciendo las mejores prestaciones.

Adicionalmente, se estudiará la viabilidad de implementación de una instalación de estas características en maniobras y despliegues de unidades de Infantería de Marina (IM). Como objetivo secundario se pretende determinar el número de paneles que habría que instalar en campamentos de IM en función de la demanda eléctrica y térmica existente en ellos.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Las energías renovables

La humanidad ha empleado distintos tipos de energía a lo largo de su historia. Inicialmente se obtenía de la naturaleza en forma de biomasa (madera), eólica o hidráulica. Pero no es hasta el siglo XVII durante la industrialización cuando se da paso al uso extendido de las energías fósiles como pueden ser el carbón, el petróleo y el gas natural.

Este tipo de energía, sin embargo, presenta dos problemas importantes: En primer lugar, son fuentes de energía finitas, y en segundo lugar, su uso produce una gran contaminación y problemas derivados de ella, siendo el más conocido e importante el llamado "*cambio climático*", que tiene consecuencias negativas que hoy en día solo se comienzan a sufrir.

Las energías renovables**,** en cambio, son ilimitadas y el impacto en el medioambiente que tiene su uso con respecto a las energías fósiles en general muy reducido. Las principales energías renovables que se utilizan actualmente son la biomasa, la energía hidráulica, la geotermia y, recientemente, la energía eólica y la solar. Esta última se utiliza tanto para calentar un fluido (energía térmica y termoeléctrica), como para producir energía eléctrica (energía solar fotovoltaica). [2]

2.1.1 El cambio climático y el Protocolo de Kioto

El efecto invernadero es esencial para el mantenimiento del clima en la Tierra. Sin este efecto, la temperatura media de la Tierra sería de -2ºC, de forma que sería imposible la existencia de vida en la Tierra tal como la conocemos. Este efecto se explica de manera esquematizada en la Figura 3.1. Parte de la energía que penetra en la atmósfera de la Tierra se refleja en la superficie terrestre, pero debido a la diferente longitud de onda de la radiación incidente y reflejada, una parte de esa energía es absorbida por los llamados *gases de efecto invernadero,* como son el dióxido de carbono, el vapor de agua, el metano o los óxidos de nitrógeno. El aumento de la concentración de estos gases, el dióxido de carbono y los óxidos de nitrógeno en especial, está provocando un aumento de energía absorbida por estos gases, que tiene como consecuencia un aumento de la temperatura media de la superficie terrestre. Debido a esto, se empiezan a observar cambios generales en el clima, como por ejemplo el aumento de la temperatura en la superficie terrestre que provoca el derretimiento del hielo de los polos y el aumento de la superficie de las aguas oceánicas. Detener este aumento del efecto invernadero requiere que se reduzcan significativamente las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera en todo el planeta, sustituyendo paulatinamente las fuentes fósiles por energías renovables. [2]

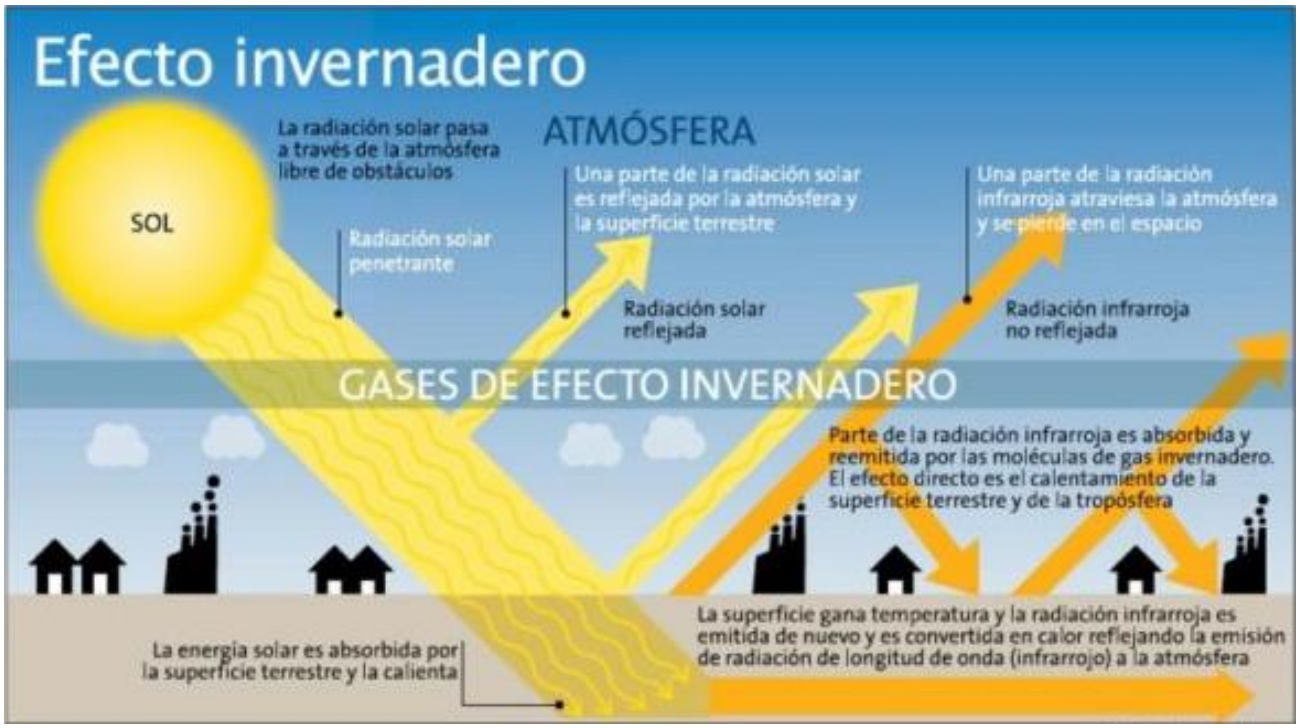


Figura 2-1 Efecto invernadero [3]

En 1997, en la ciudad japonesa de Kioto un acuerdo, se firmó un acuerdo en el que las potencias mundiales se comprometían a reducir la emisión de gases de efecto invernadero en un 5% entre 2008 y 2012 con respecto a las emisiones registradas en 1990. [2]

2.1.2 Potencial de las tecnologías basadas en energía renovable

Para poner estas fuentes de energía en perspectiva, se muestra más adelante el potencial que tiene cada una de ellas con respecto a la demanda global total de energía, que actualmente es de 16TW, incluyendo calefacción, transporte e industria, por lo tanto este dato no se refiere únicamente a la electricidad.

A continuación, se cita la cantidad de energía que se puede obtener a partir de las fuentes de energía renovables más importantes:

- Eólica: Produce entre 25 y 75 TW. Supera con creces la cantidad de energía que se necesitaría globalmente. El problema es que varía notablemente en función del clima y la estación del año.
- Energía maremotérmica OTEC: Puede proporcionar de 3 a 11 TW si evoluciona completamente.
- Biomasa: Es capaz de ofrecer de 2 a 6 TW.
- Hidroeléctrica: Actualmente proporciona una elevada fracción de las necesidades energéticas actuales con 1,2 TW. Puede llegar a ofrecer de 3-4 TW. El mayor inconveniente para el crecimiento de esta tecnología es que no tiene espacio suficiente disponible en la superficie terrestre para expandirse.
- Geotérmica y energías del mar: También pueden cubrir gran parte de nuestras necesidades energéticas. Hasta 4,3 TW.
- Energía solar: Si se cubriese por completo el planeta con paneles solares, obtendríamos 23000 TW de energía, un valor mucho mayor del que jamás hará falta. [4]

En la siguiente tabla se indica la cantidad de energía que puede ofrecer cada una de estas fuentes energéticas por unidad de superficie, de forma que se obtiene una idea de la cantidad de terreno necesario para que una instalación a gran escala de estas energías sea productiva. [4]

FUENTE	W/m^2
Hidroeléctrica	8-10
Eólica	2-3
Solar	20-30
Biomasa	0,1-0,3
Geotérmica	0,005-0,015
Mareas	2,5-3,5
Oleaje	20-30 kW/m

Figura 2-2 Energía por unidad de superficie de cada fuente de energía [4]

A la vista de los datos de la tabla, ¿cuánto terreno sería necesario para desplegar estas tecnologías de forma que se obtuviese una cantidad de energía suficiente para subsistir globalmente?

Se estima que la demanda eléctrica en el año 2040 será de 4,2 TW. En la figura 2-3 se puede apreciar de forma visual la extensión de terreno que cada fuente de energía necesitaría ocupar para obtener 4,2 TW [4]:

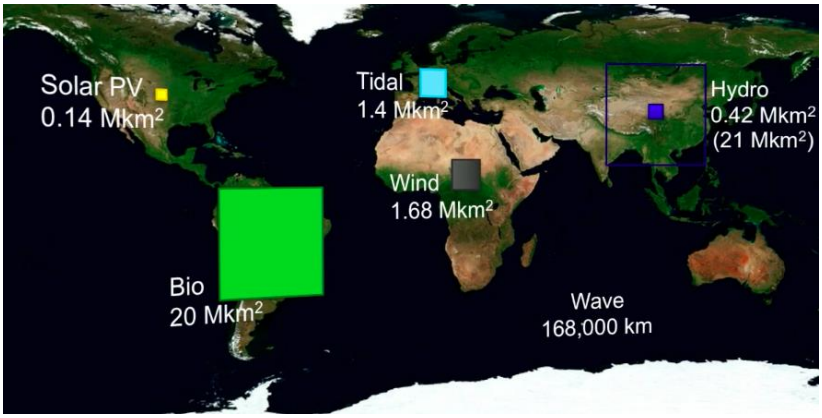


Figura 2-3 Superficie que ocuparía cada tecnología [5]

Para satisfacer nuestras necesidades energéticas, no sería suficiente con utilizar únicamente una de estas fuentes individualmente, sino que sería necesario combinar varias de estas fuentes energéticas para obtener energía de forma eficiente.

De entre todas ellas, la energía solar tiene un potencial muy elevado. Es por ello que se está investigando y desarrollando a gran velocidad.

2.1.3 La energía solar

En el Sol tienen lugar constantemente una serie de reacciones termonucleares que liberan gran cantidad de energía. Una parte de esta energía llega a la superficie terrestre, la cual supone una cantidad anual de energía muy elevada de forma (10^{18} kWh). Esta es una cantidad de energía que supera con creces la energía que los combustibles fósiles pueden proporcionar anualmente.

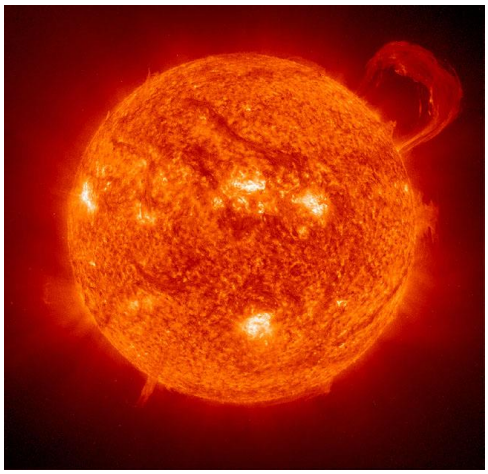


Figura 2-4 Protuberancia solar [6]

Bastaría con utilizar el 0,01% de la energía procedente del Sol para satisfacer nuestras necesidades.

La intensidad de la radiación solar que llega a la parte exterior de la atmósfera, depende de la distancia entre la Tierra y el Sol. Esa distancia no es constante, por lo tanto la irradiancia varía entre 1,325 W/m^2 y 1,412 W/m^2. El valor medio de esta irradiancia se denomina constante solar. [2]

Si se considera que la temperatura de la Tierra se mantiene constante en el tiempo, la cantidad total de energía que llega a causa de la radiación solar será igual a la cantidad de energía radiada hacia el espacio. La irradiancia solar captada por la Tierra en el exterior de la atmósfera es de 1,367 W/m^2. Por lo tanto, para realizar el balance energético habrá que considerar la radiación solar incidente en el exterior de la atmósfera de 1,367/4 = 342 W/m^2. Hacia el espacio se pierden 107 W/m^2, or tanto se aprovecharía la diferencia 342 – 107= 235 W/m^2. Si este fuese el calor absorbido realmente, la temperatura en la superficie Terrestre sería inferior a -20ºC. Lo que ocurre realmente se puede observar en la siguiente figura:

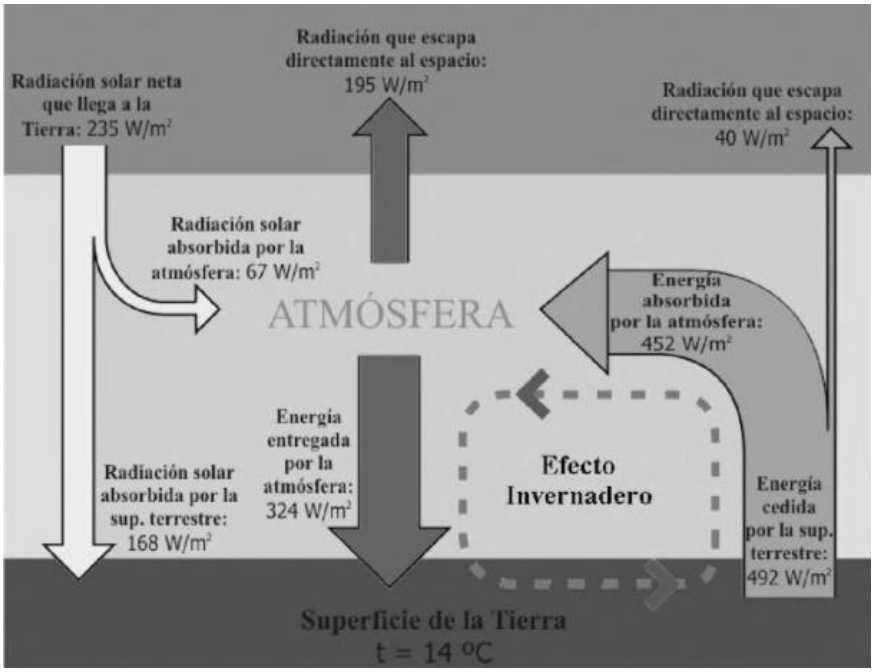


Figura 2-5 Representación de los flujos de energía entre el espacio, la atmósfera y la superficie terrestre

De los 342 W/m^2, llegan a la superficie de la Tierra 198 W/m^2, de los cuales 30 W/m^2 se reflejan al espacio, por lo tanto se absorben 168 W/m^2.

La atmósfera retiene parte de la energía y la transmite a la superficie terrestre, elevando la temperatura a 14ºC. Este fenómeno fue descrito anteriormente y es el llamado efecto invernadero. [7]

Tabla 2-1 Balance energético [7]

FLUJO ENTRANTE (W/m^2)		FLUJO SALIENTE (W/m^2)	
Balance de energía en la superficie terrestre			
Radiación solar	168	Radiación emitida por la superficie terrestre	390
Radiación atmosférica	324	Difusión (evaporación del agua)	78
		Convección	24
Total	**492**	**Total**	**492**
Balance de energía en la atmósfera			
Radiación solar absorbida por la atmósfera	67	Radiación al espacio	195
Difusión (evaporación del agua)	78	Radiación a la superficie	324
Convección	24		
Radiación terrestre	350		
Total	**519**	**Total**	**519**

2.1.4 Tecnologías fotovoltaicas existentes

Existen diversos tipos de tecnologías fotovoltaicas, cada una con sus ventajas y desventajas. Se categorizan principalmente en 1ª generación, 2ª generación y la 3ª generación:

- 1ª generación: Son las más comunes. Están basadas en silicio cristalino y se subdividen a su vez en monocristalinos y policristalinos
- 2ª generación: Estos son los llamados de película fina (CdTE, ClGS)
- 3ª generación: Son tecnologías nuevas que pueden sobrepasar la eficiencia teórica de las células convencionales de la 1ª y la 2ª generación. Estos son capaces de obtener rendimientos de hasta un 46% [5]

La tecnología fotovoltaica más común es la de silicio cristalino. Se puede hacer una distinción entre tres tipos de silicio cristalino: monoccristalino, policristalino y amorfo.

- **Monocristalino**: Contienen un único cristal de silicio extraído de un baño de silicio fundido. Son las células más utilizadas en la tecnología solar y las más comercializadas ya que su rendimiento es mayor que el que se puede obtener con los demás tipos de células solares, siendo este entre un 15% y un 18%. El coste es elevado, por ello hay una tendencia a utilizar silicio policristalino. [2]
- **Policristalino**: Es una tecnología mucho más económica. Están formados por un conjunto de estructuras monocristalinas de silicio. Tienen un rendimiento que no se aleja en gran medida al obtenido con las células monocristalinas, siendo este de entre 12% y 14%.
- **Amorfo**: Aparecen debido a que la fabricación de células solares de silicio cristalino sigue siendo muy alta. La fabricación de este tipo de células es mucho más simple y, por lo tanto,

mucho más económica. Sin embargo, se degradan más rápidamente y su rendimiento es inferior al 10%. [2]

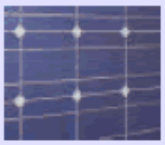
CÉLULAS		RENDIMIENTO LABORATORIO	RENDIMIENTO DIRECTO	CARACTERÍSTICAS	FABRICACIÓN
	MONOCRISTALINO	24 %	15 - 18 %	Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralsky).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	POLICRISTALINO	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	AMORFO	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

Figura 2-6 Tipos de células de 1ª generación [8]

Otra de las técnicas existentes, y que ofrecen el mayor rendimiento, es la llamada célula HIT (heterofunction with intrinsic thin layer). Esta se obtiene apilando múltiples uniones "PN". Cada una de estas capas absorben diferentes partes del espectro solar. [5]

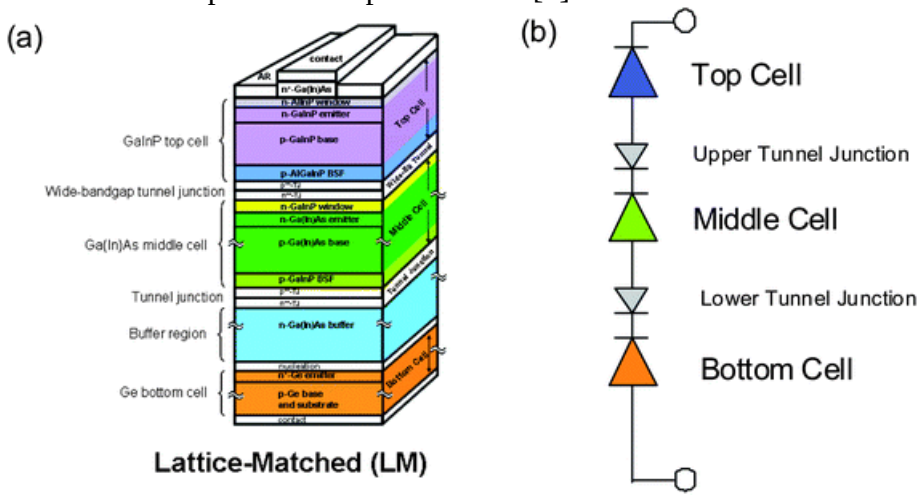


Figura 2-7 Célula solar HIT [9]

Las células HIT se forman mediante la llamada tecnología III-V. El término III-V se refiere a los grupos de la tabla periódica a partir de los cuales se forman las capas. Los elementos del grupo "III" tienen tres electrones de Valencia, mientras que los del grupo "V" tienen cinco electrones de Valencia. Alguno de los ejemplos más comunes de este tipo son el Galio y el Arsenio. El Galio no se puede obtener tan fácilmente como el silicio, por lo tanto es más caro que este. Las células III-V son muy caras con respecto a las tecnologías de silicio fotovoltaico. Debido a esto, su uso más común es en aplicaciones espaciales donde el buen rendimiento de las células es de prioridad máxima. [5]

En cuanto a la tecnología fotovoltaica de película delgada, es de las áreas de más rápido crecimiento, en gran parte debido a su reducido coste.

Las células solares de película fina utilizan mucho menos material para la obtención de electricidad. Usa capas extremadamente finas de silicio.

Figura 2-8 Célula solar de película delgada [10]

Por lo tanto, el poco material y la baja energía consumida por las tecnologías de capa fina, junto con la probabilidad de un alto grado de automatización del proceso, ofrecen un considerable potencial de reducción de costes frente a la tecnología de silicio cristalino. [11]
La mayor desventaja de este tipo de paneles solares es que son menos eficientes que los paneles solares tradicionales.

Son flexibles y su grosor es de 2 – 5 micrómetros. La combinación de flexibilidad y ligereza ofrece un gran rango de aplicaciones.

Las células solares de perovskita usan minerales como capa absorbente con la fórmula general abx 3.

Esta tecnología ha evolucionado mucho en la última década, obteniendo grandes mejoras en la eficiencia. En 2006 el rendimiento era de aproximadamente un 2%, actualmente es del 22%. El problema de este tipo de célula solar es que aún no se puede aplicar industrialmente. Esta célula todavía es muy inestable en ambientes húmedos y condiciones lumínicas desfavorables.

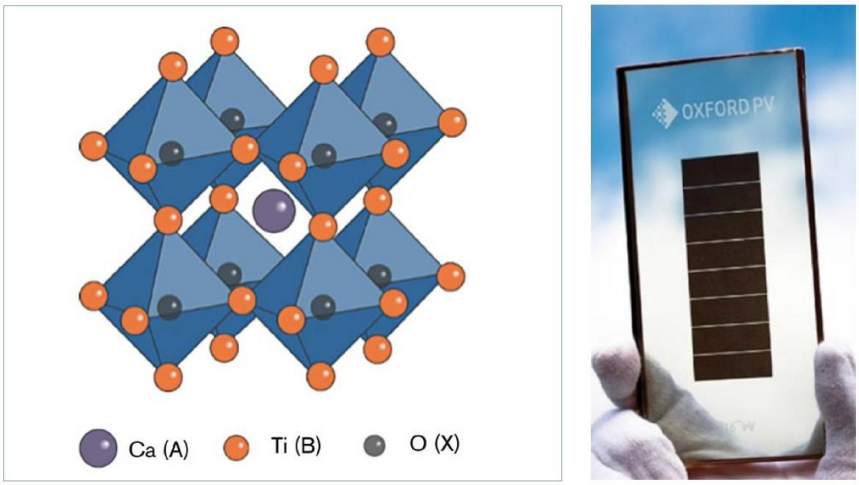


Figura 2-9 Célula solar de perovskita [12]

A continuación, se muestra un gráfico en el que se puede apreciar la eficiencia de las distintas tecnologías fotovoltaicas citadas anteriormente:

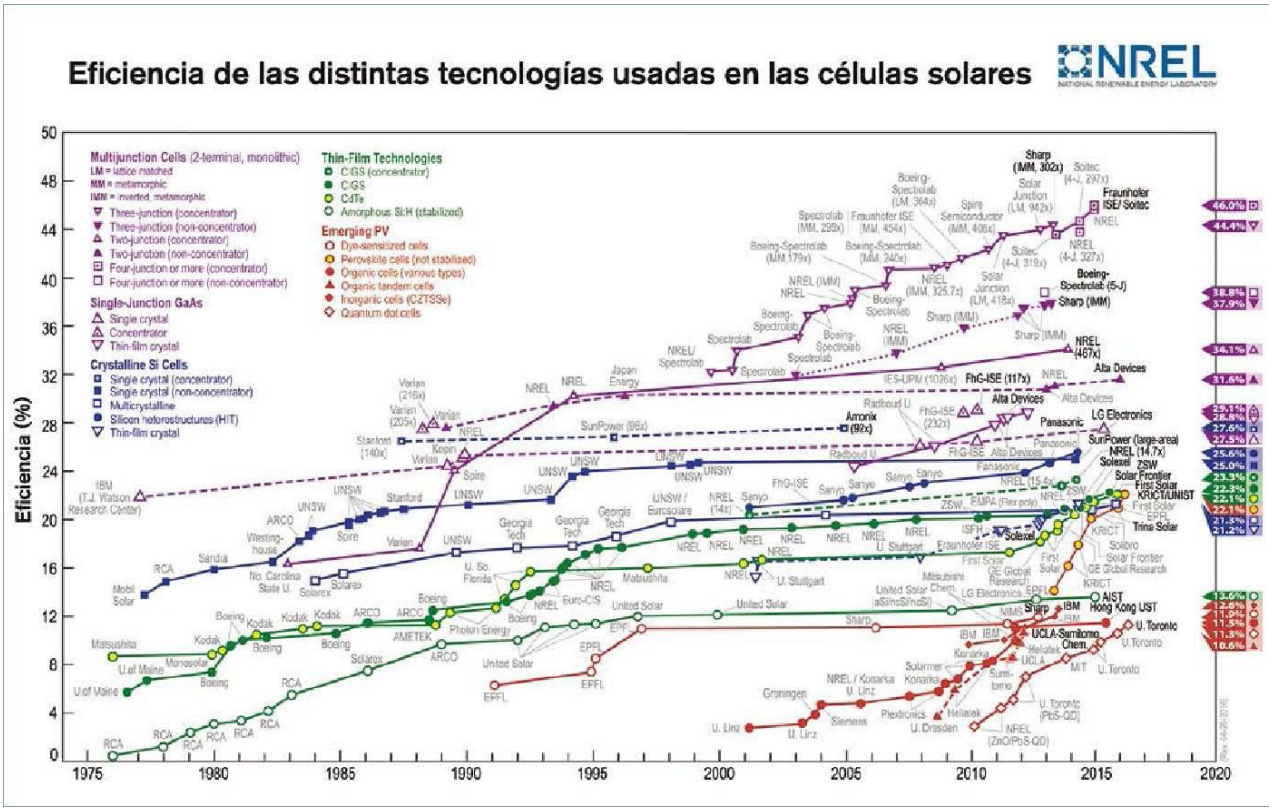


Figura 2-10 Eficiencia de las distintas tecnologías usadas en las células solares [13]

2.2 Energía solar fotovoltaica

3.2.1 Descripción de sistemas fotovoltaicos (PV)

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de componentes mecánicos y electrónicos utilizados concurrentemente para captar la energía solar y transformarla en energía eléctrica disponible para uso diario.

Atendiendo al esquema siguiente, estos sistemas se pueden clasificar en:

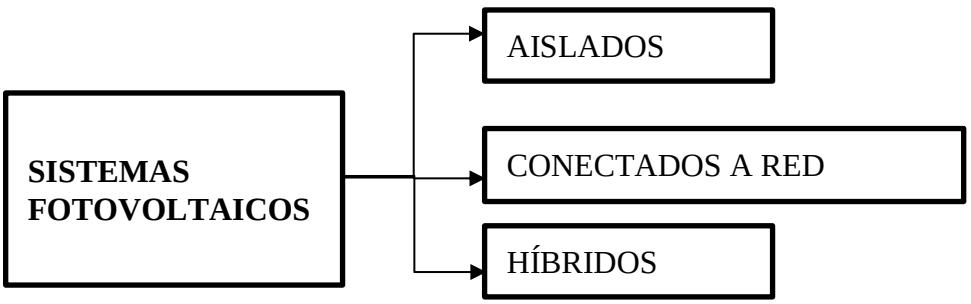


Figura 2-11 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Hay distintas opciones para construir un sistema fotovoltaico, pero habitualmente consta de los siguientes componentes:

- **Generador fotovoltaico:** Encargado de absorber la radiación solar y convertirla posteriormente en corriente eléctrica.
- **Baterías o acumuladores:** Se encargan de almacenar la energía eléctrica producida en el generador fotovoltaico para utilizarla cuando la necesidad de flujo eléctrico sea mayor que la capacidad de producción del generador.

- **Regulador de carga:** Encargado proteger la batería evitando sobretensiones que puedan dejarla inutilizada.
- **Inversor o acondicionador:** Su función es la de transformar la corriente continua producida por el generador fotovoltaico en corriente alterna.
- **Elementos de protección del circuito:** Por ejemplo interruptores de desconexión, diodos de bloqueo, etc. Sirven para proteger la descarga y derivación de elementos en caso de fallo o sobrecarga.

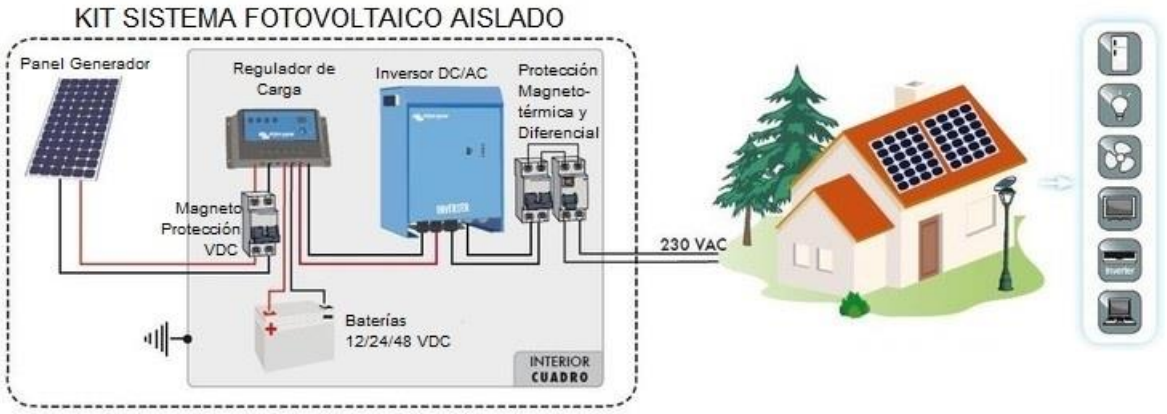


Figura 2-12 Esquema de un sistema fotovoltaico [14]

Cuando no se pueda mantener la demanda, sería necesario un generador auxiliar para complementar la energía del generador fotovoltaico.

2.2.1.1 Sistemas aislados

Su objetivo principal es satisfacer la demanda de energía eléctrica de los lugares donde la red eléctrica no existe o en lugares que son de difícil acceso.
Puesto que la demanda energética existe tanto de día como de noche, normalmente están equipados con sistemas de acumulación de energía.

Los principales componentes de este tipo de sistemas son:

- **Módulos fotovoltaicos**
- **Regulador de carga**
- **Acumuladores**
- **Inversor**
- **Elementos de protección del circuito**

Existen también instalaciones aisladas que no requieren de acumuladores, pero que por lo tanto únicamente funcionarán durante el día.

2.2.1.2 Sistemas de conexión a red

Estos sistemas no tienen acumuladores, ya que la energía producida durante las horas de insolación, se dirige a la red eléctrica.

Con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de estas instalaciones en lo referente a la entrega de la energía, estos sistemas disponen de sistemas de seguimiento del estado de la tensión de la red de distribución.

Por otro lado, se sustraen las baterías que son la parte más cara y compleja de los sistemas.
Los principales componentes son:

- **Módulos fotovoltaicos:** Captan la energía solar.
- **Inversor para la conexión a red**

- **Elementos de protección del circuito**
- **Contador de energía:** Mide la energía producida durante su funcionamiento.

2.2.1.3 Sistemas híbridos

Uno de los principales problemas de la generación de electricidad a partir de paneles PV, es que el rendimiento de estos varía en función de la temperatura. Por lo tanto, es necesario un sistema que sea capaz de disminuir la temperatura de las células para mejorar el rendimiento de los paneles. Este es el caso de los sistemas híbridos.

Cuando un sistema fotovoltaico además del generador incorpora otro generador de energía, se denomina sistema híbrido. Normalmente es compatible con cualquier otra generación de energía.

La disposición y configuración de los sistemas híbridos, y depende del tipo de equipos que se empleen.

2.2.2 Conversión de energía solar en electricidad

Como se explicó anteriormente, el efecto fotovoltaico consiste en la conversión de luz en electricidad. Esto se consigue con ciertos materiales que son capaces de absorber fotones y emitir electrones. En el momento en que los electrones libre son capturados, es cuando se produce la energía eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

2.2.2.1 Generalidades

Toda la materia está formada de átomos, que tiene dos partes bien diferenciadas:

- Núcleo: Carga eléctrica positiva.
- Electrones: Carga eléctrica negativa.

Para formar un conjunto estable y neutro eléctricamente, los electrones giran alrededor del núcleo en bandas de energía diferentes. De esta forma compensan la carga positiva de éste.
Los llamados electrones de valencia son los de la última capa, y se unen con otros formando una red cristalina.

Eléctricamente existen tres tipos de materiales:

- **Conductores:** Los electrones de valencia no están muy ligados al núcleo y su movimiento a través de la red cristalina es sencillo.
- **Semiconductores:** Los electrones de valencia están más ligados al núcleo, pero con un pequeño empuje de energía basta para que se comporten como conductores.
- **Aislantes:** su configuración es muy estable. Sus electrones de valencia están muy ligados al núcleo. Para separarlos la energía necesaria sería muy grande.

En las células fotovoltaicas se utilizan materiales semiconductores.

2.2.2.2 Materiales semiconductores

La energía que une al núcleo con sus electrones de valencia es parecida a los fotones.
Cuando la luz solar incide sobre un material semiconductor, los enlaces entre el núcleo y los electrones de valencia se rompen y quedan libres para circular por el material semiconductor.

A este espacio libre que deja el electrón se le denomina “hueco”, y tiene carga positiva, teniendo el mismo valor que el electrón pero de signo contrario.

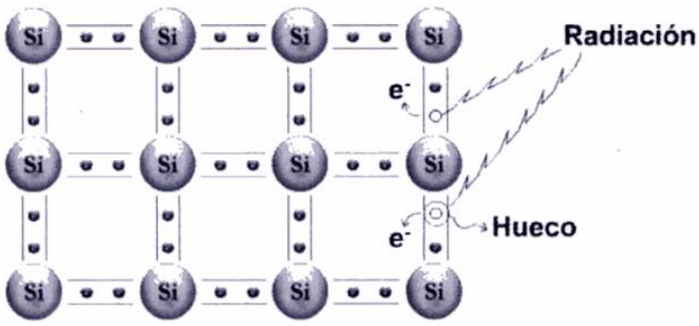


Figura 2-13 Hueco creado por la radiación

La libertad de movimiento de algunos electrones debidos a este efecto se denomina *conductividad intrínseca*. Los electrones libres y los huecos provocados por la radiación, tienden a recombinarse perdiendo su actividad. Para evitar esto, hay que crear un campo eléctrico en el interior del semiconductor.

La conductividad intrínseca no sirve para generar energía eléctrica directamente. Para que esto suceda, se tienen que introducir "impurezas" en la red cristalina. Estas impurezas tienen átomos que pueden tener o un electrón más, o bien un electrón menos que el átomo de silicio. A la introducción de estas impurezas en la red cristalina se le denomina "dopado". [2]

En el caso de que se introduzca fósforo como dopaje, se obtendrá un dopado tipo "N"; si se introduce boro, en cambio, se obtendrá un dopado tipo "P", con exceso de huecos.

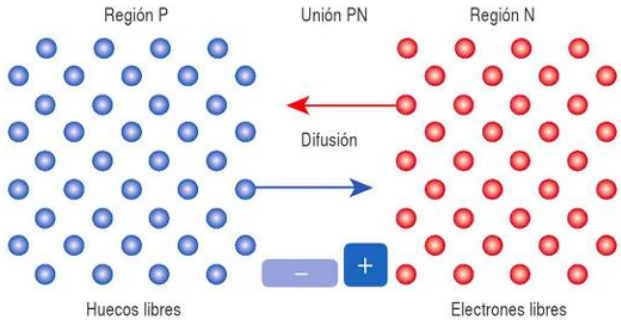


Figura 2-14 Formación de un campo eléctrico en una unión PN [2]

Cuando en un material semiconductor se introducen impurezas de tipo "N" por un lado y de tipo "P" por el otro se forma una unión "PN" con dos regiones separadas. Los electrones no se pueden mover libremente para combinarse, puesto que forman parte de una red cristalina, y se establece un campo eléctrico. Este campo evita que las cargas se muevan, de modo que la difusión se detiene. Como se puede apreciar en la Figura 2-14, la carga de la región N impedirá que se difundan más huecos en ella. De la misma forma, la carga negativa de P evitará que fluyan en ella más electrones. A Esto se le denomina unión *bloqueada*. [2]

2.2.2.3 El efecto fotoeléctrico

Cuando la unión PN anterior es expuesta a radiación solar, los electrones de la red absorben los fotones. Estos fotones aportan energía que rompe enlaces y forman nuevos pares electrón-hueco. El campo eléctrico provoca que los electrones se muevan hacia la región N y que los huecos vayan hacia la región P. A este proceso se le denomina *efecto fotoeléctrico.* [2]

2.2.2.4 Células fotovoltaicas

En la célula fotovoltaica es donde se convierte la radiación solar en energía eléctrica.

Una célula fotovoltaica está formada por una lámina de material semiconductor, con un grosor que oscila entre 0,25mm y 0,35mm, que generalmente es de forma cuadrada y de 100 cm^2 de superficie.

Todas las células fotovoltaicas están formadas de una capa fina de material tipo N y otra más gruesa de material tipo P.

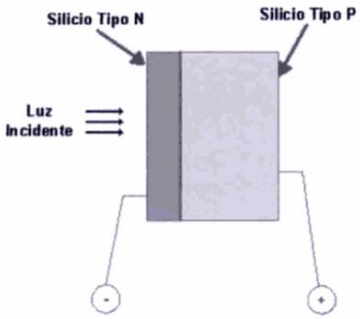


Figura 2-15 Esquema de una célula fotovoltaica

Estas capas por separado, son eléctricamente neutras, pero al combinarlas se forma un campo eléctrico en la unión PN.

Cuando incide luz solar sobre la célula se rompe el par electrón-hueco y el campo eléctrico de la unión los separa para que no se junten, de forma que los electrones se llevan a la zona N y los huecos a la zona P. Con un sistema externo, se unen la capa negativa y la positiva, y se permite el flujo de electrones de la zona P a la zona N.

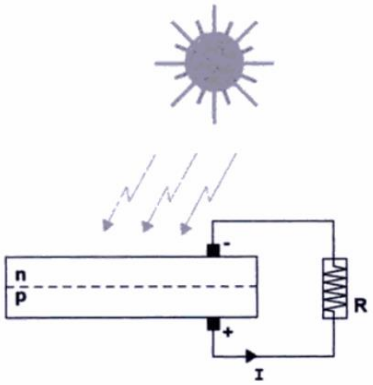


Figura 2-16 Flujo de electrones de la zona P a N

Mientras siga incidiendo la luz solar habrá corriente eléctrica y su intensidad será proporcional a la cantidad de luz recibida por la célula.

2.2.2.5 Fabricación de la célula fotovoltaica

Una célula fotovoltaica suele estar formada por dos materiales semiconductores dopados con elementos diferentes. La capa superior es de tipo N, normalmente dopada con fósforo. La capa inferior es de tipo P, dopada generalmente con boro. En la capa inferior es normal que se incluya una capa conductora de plata o aluminio. La parte superior tiene que dejar que pase la radiación solar, por lo que tiene forma de rejilla.

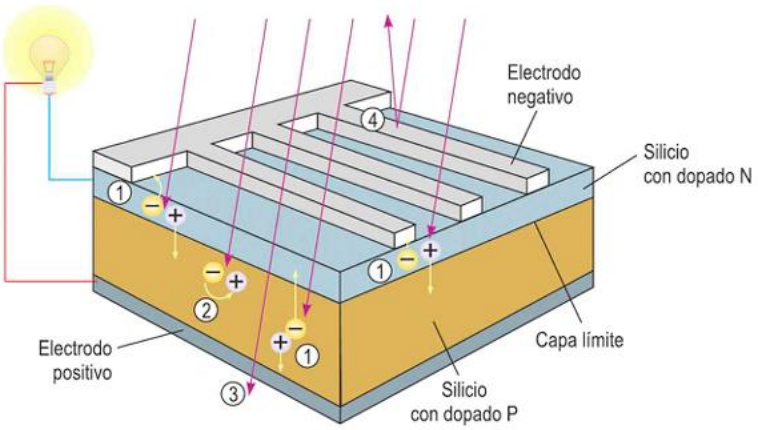


Figura 2-17 Diseño y funcionamiento de una célula solar de silicio cristalino [2]

En referencia a la Figura 2-17:

1) Las cargas se separan.
2) Se recombinan parte de ellas.
3) Parte de la energía luminosa no se utiliza, sino que atraviesa la célula y se pierde.
4) La reflexión.

Una célula convencional consta de una capa P (normalmente de silicio dopado con boro) de 100 a 500 micras de espesor, sobre la que se produce la difusión de una capa fina de fósforo para formar la unión PN. [2]

2.2.3 Pérdidas y rendimiento de la célula fotovoltaica

En la célula fotovoltaica se producen una serie de pérdidas que limitan su rendimiento, ascendiendo éstas hasta un 16%, provocando que solo sea posible extraer una parte de la energía solar que incide sobre ella:

- Reflexión de parte de la radiación solar: 3%.
- Energía de los fotones demasiado baja para generar un par electrón-hueco: 22%.
- Energía de los fotones demasiado alta para romper el enlace de silicio: 30%.
- Recombinación de lectrones y huecos: 8,5%.
- Debido a pérdidas de tensión en la célula: 20%.
- Pérdidas en las resistencias: 0,5%.

2.2.4 Módulos fotovoltaicos

Una célula solar típica actualmente tiene una superficie aproximada de 243 cm^2 y produce una potencia aproximada de 4W, tensión de 0,5V e intensidades de entre 7 y 8ª. El valor de la tensión es muy pequeño, por lo que se hace necesario colocar varias células en serie formando un panel. Un panel solar se define como un grupo de módulos conectados eléctricamente en una combinación en serie y paralela para conseguir los valores de corriente y de tensión necesarios. [15]

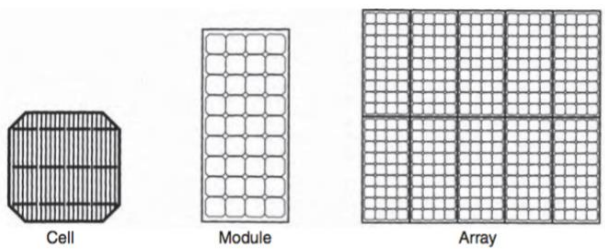


Figura 2-18 Varias células fotovoltaicas hacen un módulo y varios módulos un array

La mayoría de los paneles fotovoltaicos contiene entre 36 y 96 células conectadas en serie y llegan a proporcionar hasta 300W y valores de tensión que rondan los 30V.

Además de la célula solar, tiene que contener algunos elementos adicionales:

- Elementos para protegerlo de los agentes atmosféricos, proporcionándole un buen aislamiento
- Elementos que le proporcionen solidez y consistencia mecánica. [15]

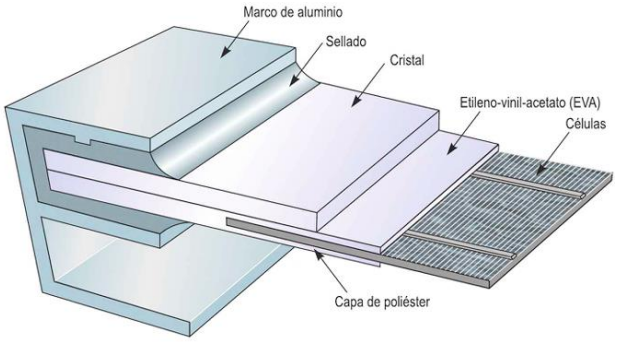


Figura 2-19 Composición de un módulo fotovoltaico [2]

- **Cubierta frontal:** Es un buen conductor de la radiación solar y sirve para proteger contra agentes atmosféricos. Es antirreflexiva y antiadherente.
- **Encapsulado:** Da mayor solidez a las células. Debe permitir la transmisión de la radiación solar, y no perder propiedades con la radiación ultravioleta.
- **Cubierta posterior:** Su función es la de proteger al módulo de agentes atmosféricos y aislarlo eléctricamente.
- **Marco:** Proporciona resistencia y rigidez al módulo.
- **Conexiones:** Se encuentran en la parte posterior del módulo, en una caja que lo protege del polvo. Los módulos actualmente vienen provistos de cables y conectores para poder realizar la instalación de forma fácil y rápida.

2.2.5 Magnitudes y características

2.3 Energía solar térmica

2.3.1 Calentamiento de aire

La radiación solar es una forma de energía y se puede cuantificar.

$$Q = h * f = h * \frac{c}{\lambda}$$

Donde h es la constante de Planck y c la velocidad de la luz.
La combinación de una alta absortividad, baja emisividad y una neutralización IR provoca un aumento en la temperatura de una superficie opaca.

La radiación solar calienta una placa solar que está en contacto con un flujo de aire que esta sobre o bajo ella. Se produce un flujo de calor convección entre la placa y el aire que calienta a este último.

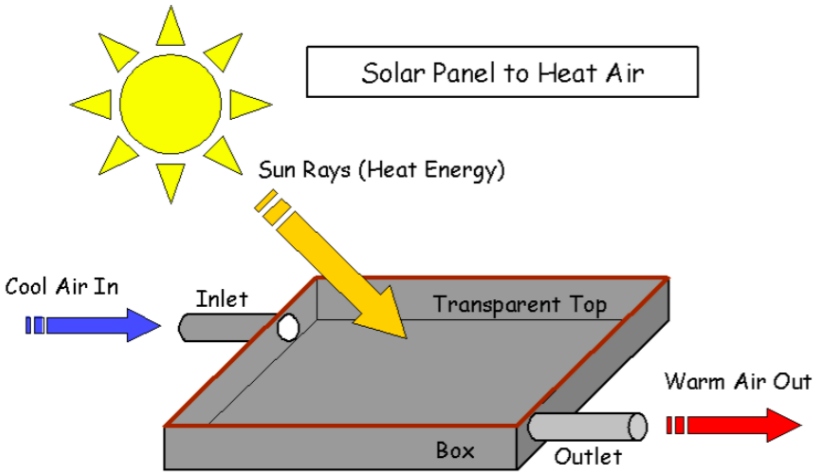


Figura 2-20 Calentamiento del aire en un panel solar

Existen diversos tipos de colectores con características diferentes cada uno. La selección del tipo de colector dependerá de la aplicación que tenga. Si se utiliza para obtener una elevada temperatura del aire, será necesario utilizar un captador con una alta eficiencia, con el inconveniente de obtenerlo a un mayor coste. En cambio, si no se precisa una elevada temperatura del aire, se podrá emplear un colector de menor eficiencia, incurriéndose en un menor coste.

Tipos de colectores:

- Colector de aire sin cubierta.
- Colector de aire de paso inferior.
- Colector de aire de paso superior.
- Colector de aire de placa suspendida con simple paso.
- Colector de aire de placa suspendida con soble paso
- Colector de aire de placa sin aletas.
- Colector de aire de placa con aletas.
- Colector de aire de placa corrugada en V.
- Colector de aire de placa perforada.

Los colectores instalados en el exterior toman aire frío directamente del interior del edificio y lo hacen circular por el colector para calentarlo y posteriormente devolverlo al interior del edificio. Se pueden colocar en diferentes disposiciones en función de la envolvente del edificio donde se instale. Estos tipos de sistemas de calefacción pueden ser de dos tipos:

- Pasivos: el flujo se produce por convección natural.
- Activos: el flujo se produce por un ventilador.

Este tipo de sistemas se pueden combinar con sistemas de almacenamiento que permiten tener acceso a la calefacción en horas de escasa radiación solar.

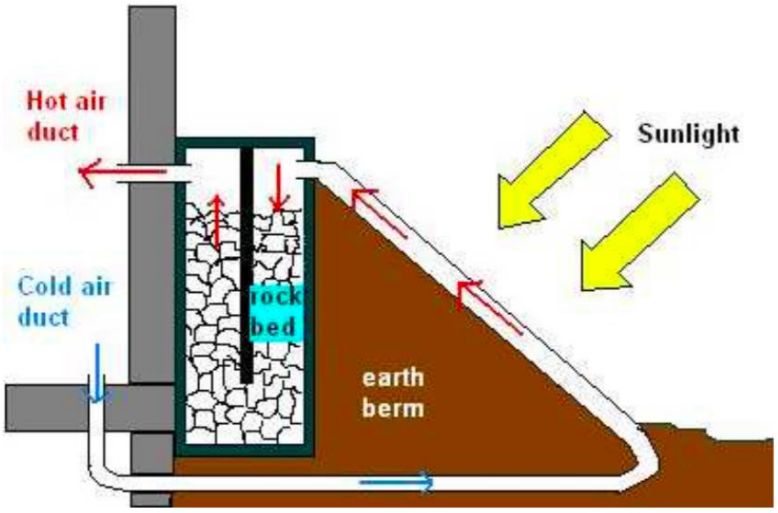


Figura 2-21 Sistema de calefacción con almacenamiento

2.3.2 Producción de agua caliente sanitaria

Mediante el aprovechamiento de la energía solar se puede calentar agua para aplicaciones domésticas o en la industria. Esto se puede conseguir sin la necesidad de emplear combustibles, sin generar productos contaminantes, en localizaciones remotas e incluso teniendo en cuenta la dificultad de la variabilidad de la energía solar.

Actualmente existen varios métodos para producir agua caliente mediante el uso de energía solar. El más sencillo, pero menos habitual, es mediante el uso de cilindros solares.

A continuación se muestra una imagen explicativa del funcionamiento general de un sistema de producción de agua caliente sanitaria. Los captadores calientan el agua que posteriormente se almacena en un tanque hasta que es utilizada. Se cuenta además con un sistema auxiliar para contrarrestar el desfase existente entre producción y consumo. [16]

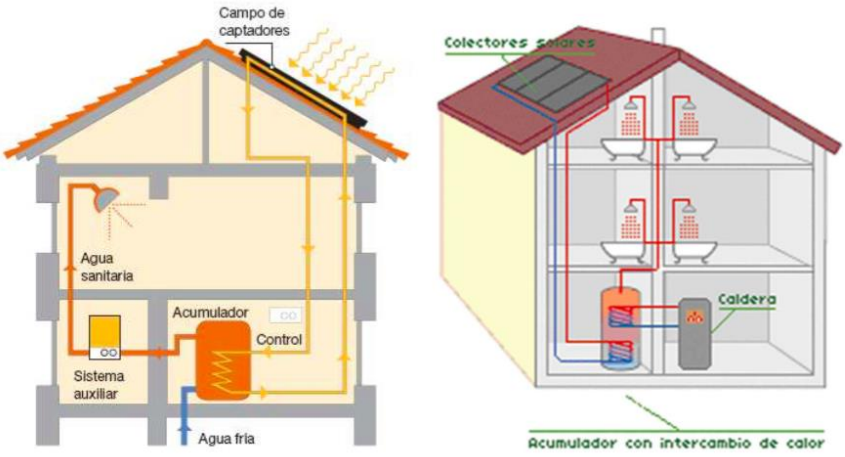


Figura 2-22 Producción de ACS [16]

En la figura 2-23 se muestra un esquema general para la producción de ACS utilizando una bomba.

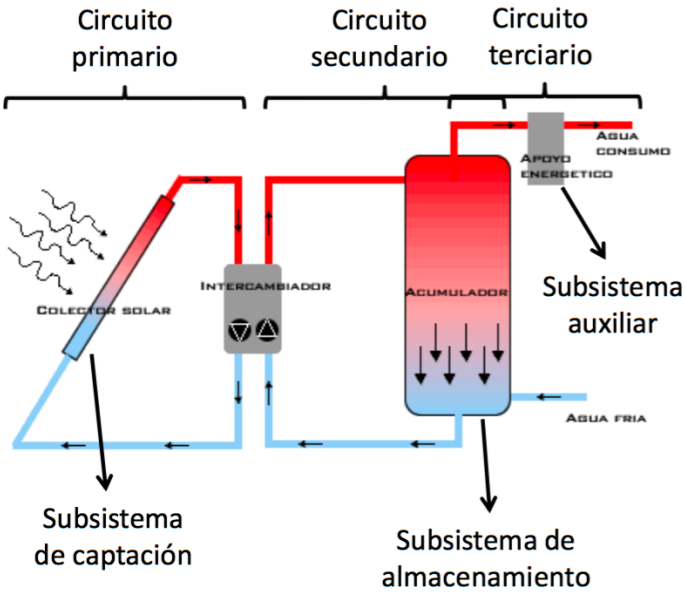


Figura 2-23 Producción ACS con bomba

El sistema de captación es el encargado de transformar la radiación solar en calor y transferir éste al fluido calorportador. Existen diversos tipos de colectores solares destacando los colectores planos, los de vacío y los mixtos.

- Colector solar plano: Se basa en el "efecto invernadero" que produce la cubierta de vidrio. Este tipo de colectores sufre pérdidas por conducción, convección y radiación. Se trata del tipo de colector más empleado pues su precio es bajo. La cubierta de este tipo de colectores asegura la estanqueidad exterior, tiene un alto coeficiente de transmisión en las bandas visible e IR y buenas propiedades mecánicas.
- Colector solar de vacío: Este tipo de colectores evitan las pérdidas por convección debido al vacío producido, por lo que aumentan tanto la eficiencia como la temperatura de salida. Entre los inconvenientes de estos colectores están su elevado coste, su fragilidad y la pérdida de vacío.
- Colector solar mixto: Se basan en el aprovechamiento de las ventajas de los colectores planos (efecto invernadero y menor pérdida por radiación) y las de los colectores de vacío (menor pérdida por convección). Su rendimiento es muy elevado así como su coste.

Existen otros tipos de sistemas para la producción de agua caliente sanitaria. Estos son los sistemas termosifón cuyo funcionamiento se basa en la convección natural (sin bomba)

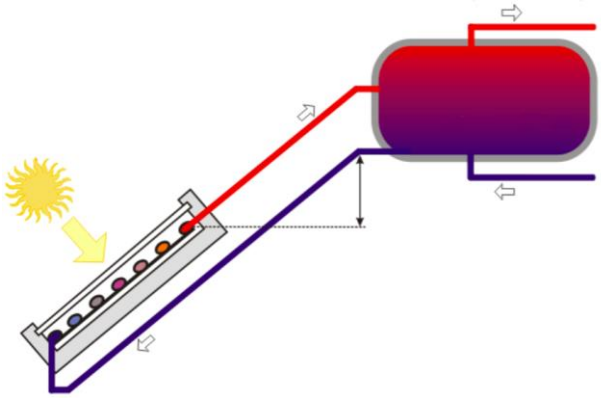


Figura 2-24 Sistema termosifón

En este sistema el tanque se debe colocar por encima de los colectores, y el agua que se consume será el agua que se encuentra en el mismo colector.

Los componentes principales de una instalación solar térmica para producir ACS son:

- Estructura
- Fluido calorportador
- Intercambiador de calor
- Sistemas de almacenamiento
- Sistemas de aporte auxiliar de energía
- Vasos de expansión
- Bombas de circulación
- Tuberías
- Purgadores de aire
- Válvulas

La estructura se suele montar con cierta inclinación y debe soportar esfuerzos producidos por viento y nieve. El fluido calorportador transporta el calor procedente de los colectores al sistema de almacenamiento. Se suele utilizar como fluido una mezcla de agua y anticongelantes teniendo en cuenta principalmente el calor específica, la viscosidad y el coeficiente de dilatación. Los intercambiadores de calor se utilizan para separar circuitos, de forma que el fluido que circula por cada uno de estos circuitos pueda ser distinto.

En cuanto al sistema de almacenamiento destacar el desajuste temporal que existe entre la producción de energía solar y la demanda. Para que la energía solar cubra la mayor parte de la demanda energética se debe contar con un sistema de almacenamiento y una fuente auxiliar de energía.

Los tanques de almacenamiento tienen por objeto la estratificación del fluido. Es decir, el establecer distintos niveles térmicos en el tanque. De esta forma, se pretende enviar agua para consumo lo más caliente posible y mandarla a los colectores más fría. Para conseguir esta estratificación, son necesarios un sistema de bajo caudal, la selección adecuada de los puntos de aporte y retirada del fluido y que la altura del tanque sea la adecuada.

Figura 2-25 Tanque de estratificación

El sistema de aporte de calor auxiliar puede combinarse de diversas formas con el sistema de aporte solar:

- A: Se coloca serpentín en la parte superior del tanque. Es el método más sencillo y barato, pero el rendimiento no suele ser bueno.

- B: El calentamiento del agua se realiza cuando esta abandona el tanque, aumentando su temperatura hasta la de consumo. Este método aprovecha al máximo la energía solar y las pérdidas no son elevadas.
- C: Aporte auxiliar que sustituye al aporte solar cuando la temperatura del tanque no es suficiente. Desaprovecha parte de la energía solar.

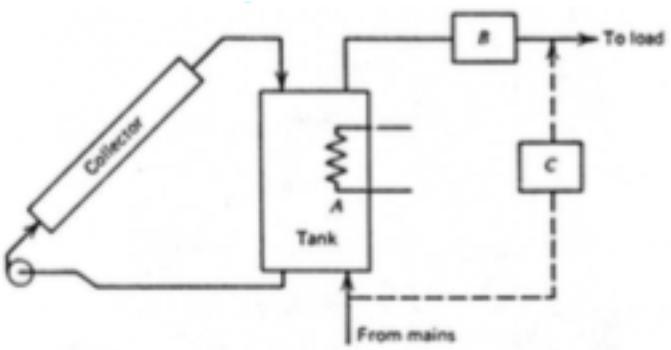


Figura 2-26 Disposición del sistema de aporte auxiliar

Los vasos de expansión tiene como función la de absorber la variaciones de volumen experimentadas por el fluido.

Las bombas de circulación se encargan de bombear el fluido calorportador por los colectores solares. Suelen emplearse bombas de circulación centrífugas.

2.3.3 Producción de agua caliente para calefacción

Para contrarrestar la carga térmica en un edificio, es necesaria agua caliente a una temperatura específica que dependerá de la tecnología empleada.

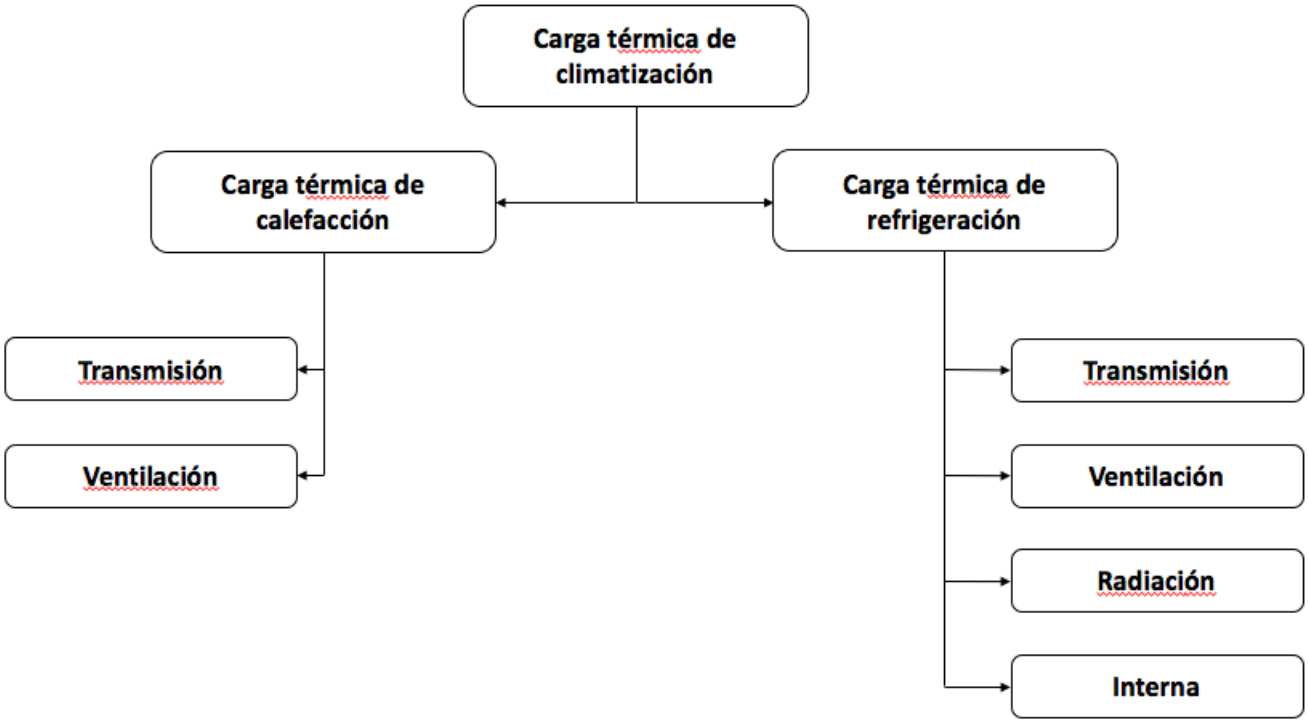


Figura 2-27 Tipos de carga térmica

La carga térmica puede ser de dos formas:

- Sensible: debida a una variación de temperatura.
- Latente: debida a una variación de humedad.

Carga térmica de transmisión: Esta carga es sensible y se transmite dentro del edificio por conducción entre los cerramientos.

$$Q_{trans} = U \times A \times (T_{int} - T_a)$$

Donde Q es la carga térmica en W, U el coeficiente de transferencia de calor, A el área de transferencia, T_{int} la temperatura interior y T_a la temperatura ambiente.

Carga térmica de ventilación e infiltraciones: la carga de ventilación consiste en renovar el aire del interior de un edificio, mientras que la de infiltraciones se debe al aire que entra en el edificio por los intersticios.

La carga térmica de radiación es una carga sensible producida por la incidencia de la radiación solar sobre superficies internas del edificio y que atraviesan superficies acristaladas.

La carga interna es la derivada del uso de un edificio, es decir, la carga producida por los equipos en funcionamiento en el edificio o incluso las personas que habitan en él.

Se han explicado brevemente las distintas cargas térmicas existente. A continuación se presentan los sistemas de calefacción más comunes:

- Radiadores: Consiste en hacer circular agua caliente por unos radiadores de forma que se calienta el aire de la habitación a calefactar. Es un sistema que se basa fundamentalmente en la convección natural.
- Fancoils: Consiste en hacer circular agua caliente por un intercambiador de calor y que fuerza el paso del aire de la habitación para que mantenga contacto con este intercambiador, forzando de esta forma la convección.
- Suelo radiante: se basa en la circulación de agua caliente por una serie de tuberías que se encuentran en el suelo de la habitación a calefactar. Está basado en convección natural

A día de hoy, la energía solar térmica ha alcanzado un nivel de popularidad que era impensable hace tan solo unos años. No solo se utiliza para proporcionar agua caliente sanitaria a las viviendas, sino que también suministra calefacción.

Actualmente, la mayoría de los captadores solares que existen en el mundo tiene como finalidad principal la de proporcionar agua caliente para uso doméstico. El aporte de energía solar para uso en sistemas de calefacción es la función secundaria. También cabe destacar el uso de la energía solar térmica en la climatización del agua para piscinas. Hoy en día, más de 10 millones de familias disponen de agua caliente gracias a la energía solar, ahorrando de esta forma 6,3 millones de toneladas de carbón al año y evita la emisión de 13 millones de toneladas de CO_2.

La energía solar térmica utiliza la radiación del Sol para calentar un fluido, generalmente agua o aire. Se basa en transformar los rayos solares en calor. En una instalación térmica, se utilizan superficies oscuras en los captadores solares para captar la mayor parte de radiación solar posible. En días soleados basta con que los rayos solares incidan directamente sobre el sistema de captación para obtener la cantidad de energía necesaria para usar en diversas aplicaciones.

El cristal, al igual que la atmósfera terrestre, puede ser atravesado fácilmente por los rayos solares de ondas cortas y no deja pasar a la radiación de onda larga. Cuando los rayos solares cruzan una superficie de cristal, la temperatura en el interior del habitáculo aumenta y el cristal impide que la energía calorífica luego vuelva a salir al exterior.

Un sistema de captación solar se basa en aprovechar este efecto a pequeña escala de efecto invernadero. Por un lado se aprovecha gran parte de la radiación que llega a la instalación solar y por otro impide la fuga de calor.

2.3.4 Funcionamiento de una instalación solar

El principio de funcionamiento de una instalación solar es el de aprovechar la energía solar mediante un conjunto de captadores y almacenarla para consumirla cuando sea necesario.
Este mecanismo tiene múltiples aplicaciones en el ámbito doméstico e industrial: calefacción, calentamiento de agua de piscina, precalentamiento de fluidos para procesos industriales, etc.

El principio fundamental de cualquier instalación solar fotovoltaica consiste en absorber la energía solar. Esta calienta el fluido que se encuentra en el interior del captador, evitando que se enfríe a través de un aislamiento térmico.

Al almacenar energía térmica durante periodos de tiempo prolongados, los depósitos de almacenamiento pierden parte de esta energía térmica, por lo que el funcionamiento de la instalación estará condicionado por la cantidad de radiación solar que incide sobre el captador y por la demanda energética de cada momento.

Con el fin de evitar faltas energéticas en los periodos de tiempo que no hay suficiente radiación o el consumo es superior de lo esperado, la mayoría de los sistemas de energía solar térmica están dotados de un sistema de aporte de energía extra. En estos casos, entra en funcionamiento un sistema de calentamiento auxiliar que compensa el déficit existente.

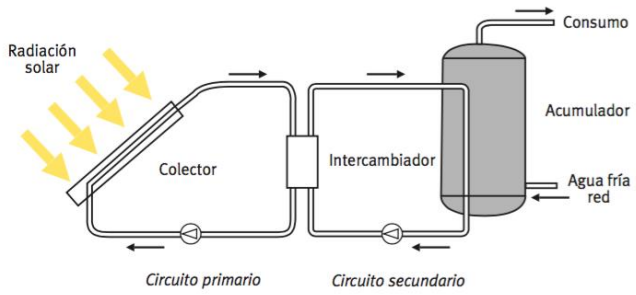


Figura 2-28 Esquema básico de una instalación solar

Actualmente una instalación solar solo cubre entre el 50 y el 80% de la demanda total de agua caliente sanitaria de una vivienda. Esto es así puesto que la instalación de sistemas de acumulación de energía a largo plazo es muy costoso.

2.3.5 Elementos principales de una instalación solar

- **Captadores solares**: Los captadores solares más comunes son los captadores planos. El principio de funcionamiento de este tipo de captadores es el de una "trampa de calor" que combina el efecto de absorción de los cuerpos oscuros con el "efecto invernadero". Con este sistema de captación se consigue absorber la mayor parte de la energía solar que incide sobre la superficie y devolver la menos posible. Generalmente están destinados a a calentar agua. Están cerrados herméticamente y en la parte superior se encuentra una superficie de cristal que permite el paso de la radiación solar e impide que se pierda la ganancia térmica obtenida. Dentro del captador es donde se encuentra la placa absorbedora, que está fabricada con materiales conductores.
  En cuanto a la eficiencia de los captadores solares, esta viene definida por su curva de rendimiento, que indica la energía que se podrá aprovechar en cada situación.

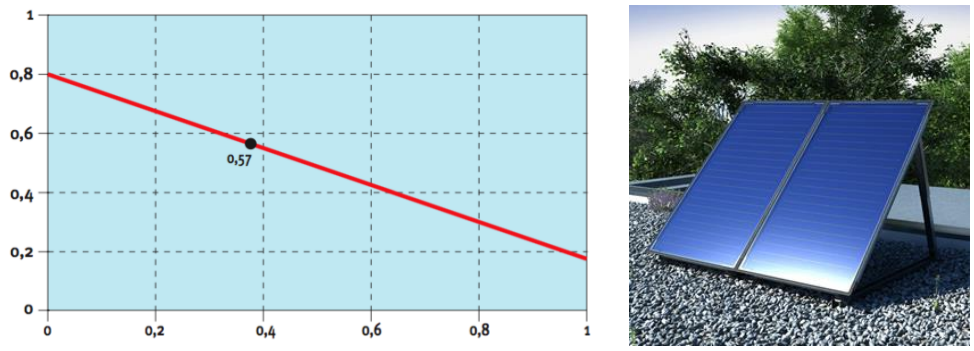


Figura 2-29 Curva de rendimiento de un captador solar

- **Sistema de distribución:** Se encarga de transportar el agua caliente proveniente de los captadores solares hasta el lugar de consumo. Existen varios sistemas de distribución disponibles en el mercado cuyo principal cometido es evitar la pérdida de energía térmica proveniente de los captadores:
    - *Instalaciones de circuito abierto:* Estos sistemas transportan directamente el agua caliente al depósito donde se acumula. Una vez se calienta el captador, el agua aumenta su temperatura y se desplaza hacia arriba. Cuando llega al depósito de almacenamiento, se vacía con una cantidad igual de agua que se dirige al captador. Son sistemas económicos y sencillos de fabricar.
    - *Instalaciones de circuito cerrado:* En estas instalaciones existen dos circuitos: el primario del sistema captador y el secundario del sistema de almacenamiento. En el circuito primario se introduce un líquido que fluye por dentro del captador para calentar el agua del tanque de almacenamiento con un intercambiador de calor.

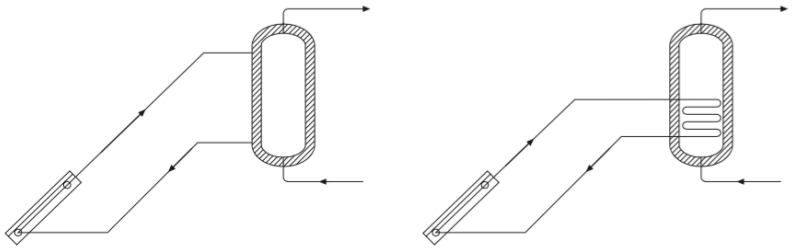


Figura 2-30 Esquemas de una instalación de circuito abierto (izquierda) y circuito cerrado (derecha)

    - *Circulación forzada de agua:* Se basan en una bomba de impulsión que funciona con un aporte externo de energía eléctrica. Su cometido es transferir el fluido de forma más rápida, reduciendo la pérdida de energía térmica durante el proceso.
    - *Circulación natural o termosifón:* No tienen bombas de impulsión. El fluido caliente por naturaleza tiende a ascender. Suelen ser utilizados en áreas con climas cálidos.

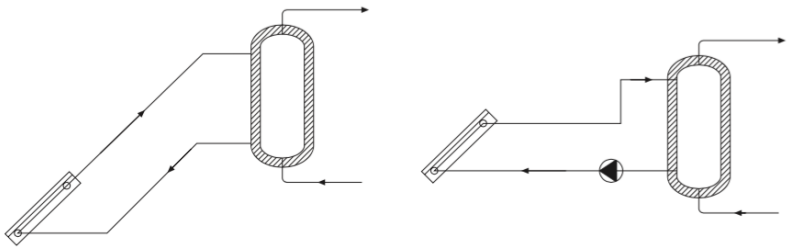


Figura 2-31 Esquema de una instalación de circulación natural (izquierda) y circulación forzada (derecha)

- **Almacenamiento:** Para aprovechar al máximo la energía solar, es necesario acumular la energía en los momentos que hay radiación solar, para que posteriormente pueda ser utilizada cuando haya demanda. Según las características del tanque de almacenamiento, se podrán

mantener las calorías durante más o menos tiempo. Los depósitos de forma cilíndrica darán mejor resultado. Esto es debido a que el agua caliente disminuye su densidad y se coloca encima del agua fría. Hay muchos tipos de tanques de almacenamiento de agua caliente en el mercado, siendo los más comunes los fabricados con hacer, acero inoxidable, aluminio y fibra de vidrio.

- **Sistema de apoyo convencional:** Es un sistema imprescindible en cualquier instalación solar ya que proporciona energía cuando no hay suficiente radiación solar o el consumo es superior al esperado. Algunos sistemas de apoyo son:
  - Eléctricos, donde la energía se ofrece dentro del suministrador mediante una resistencia.
  - Calderas de Gas o Gasóleo.

2.3.6 Sistemas híbridos

Un sistema híbrido de generación de energía se define como la integración de dos o más tecnologías (solar, eólica, térmica, etc.) con la finalidad de satisfacer los requerimientos energéticos a un costo competitivo. [17]

En la siguiente figura se presenta el diseño básico de un SHGE, indicándose los principales elementos de éste: fuentes de generación, elementos de conversión de energía y control, almacenamiento de energía y carga.

Estos sistemas se suelen utilizar para proveer de electricidad a lugares aislados de la red eléctrica por sus ventajas ambientales y económicas.

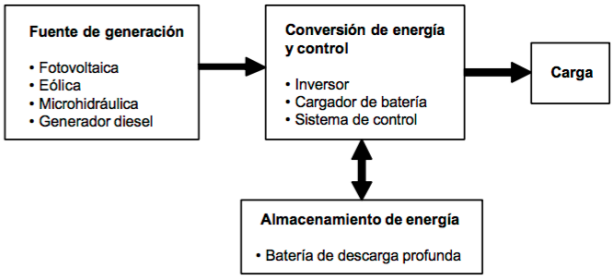


Figura 2-32 Diagrama de bloques de un SHGE [17]

Los SHGE se pueden clasificar en serie y en paralelo, y estos últimos a su vez se clasifican en paralelo con CC (corriente continua) y con acoplamiento de CA (corriente alterna).

Serie

En los SHGE en serie, el generador y las fuentes de energía renovable se utilizan para cargar las baterías. El generador diesel se conecta directamente con el inversor para alimentar la carga. Posteriormente, el inversor convierte la energía proveniente de las baterías y del generador en CA. Esta corriente luego se manda a la carga.

La potencia que llega a la batería se puede regular de dos formas, controlando la excitación del alternador o incorporando un regulador de carga. [17]

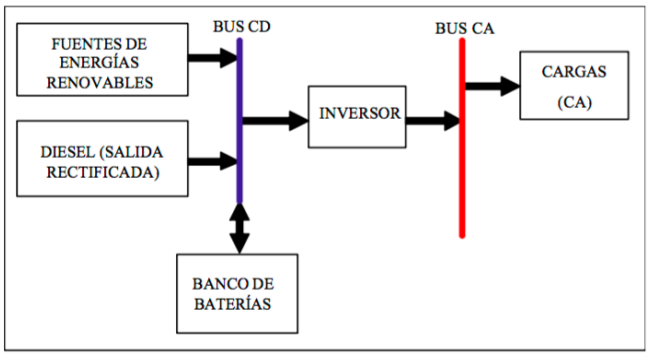


Figura 2-33 Topología en serie de un SGHE [17]

El diseño es sencillo y fácil de implementar, pero tiene algunas desventajas:

- El sistema tiene baja eficiencia ya que cierta cantidad de energía se pierde por el bajo rendimiento de la batería y el inversor.
- El inversor debe ser grande para que su capacidad sea más grande que la demanda máxima.
- Cuando las fuentes de energía están generando, el control del generador diésel es limitado.

Paralelo con CC

El funcionamiento de estos sistemas es mejor que los de topología en serie. En este tipo, las fuentes de energía y el generador suministran una parte de la demanda directamente, lo que aumenta el rendimiento del sistema.

El generador diésel y el inversor pueden funcionar de forma separada o paralela, de forma que se pueden aunar distintas combinaciones para alimentar la carga. [17]

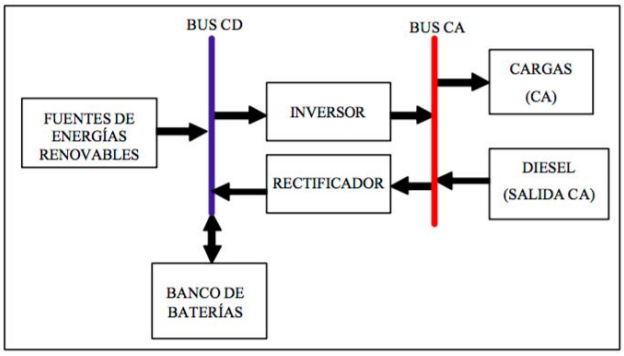


Figura 2-34 Topología en paralelo con acoplamiento en paralelo de un SHGE [17]

El diseño de este sistema es complicado debido a la operación en paralelo, pero tiene algunas ventajas:

- La carga del sistema se puede alimentar eficientemente.
- El rendimiento del generador diésel es alto.
- Se puede reducir la capacidad de la batería y la fuente energética garantizando el suministro de la demanda de pico.

Paralelo con CA

Esta disposición tiene las siguientes ventajas:

- La carga demandada del sistema se puede aumentar así como la capacidad de las fuentes de generación sin grandes cambios en la configuración eléctrica.
- A su vez, se tiene las ventajas mencionadas para el acoplamiento en CD.

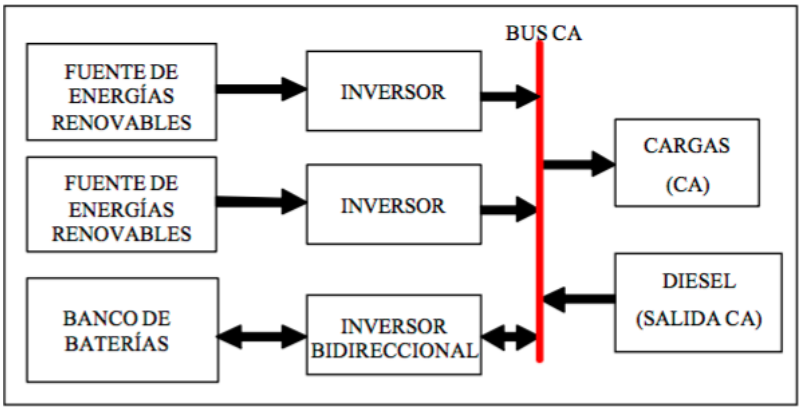


Figura 2-35 Topología en paralelo con acoplamiento en CA [17]

Esta topología tiene las siguientes desventajas: [17]

- El sistema necesita un controlador sofisticado.
- Cada generador requiere de un inversor.
- El coste se ve incrementado debido al control y los inversores requeridos.

2.4 Paneles solares Fotovoltaico/Térmicos PV/T

Un panel solar Fotovoltaico/Térmico es una combinación de un panel fotovoltaico PV sobre un panel solar térmico. Esta combinación se diseñó para mejorar el rendimiento de los paneles PV convencionales. A medida que la temperatura de los módulos PV disminuye, el rendimiento de este también lo hace. Haciendo circular un fluido, actuaría como un refrigerador para el panel PV, disminuyendo su temperatura y por lo tanto aumentando la eficiencia de éste. Por otro lado, en los casos en que se necesita calentamiento, el calor extraído del panel fotovoltaico PV sirve como un segundo beneficio con el rendimiento incrementado del módulo PV. Este tipo de tecnología se puede utilizar para calentar agua en viviendas, para calefacción o en piscinas.

Otra ventaja de combinar sistemas fotovoltaicos y térmicos es la superficie total de un panel de este estilo. Es un 40% menor comparado con paneles fotovoltaicos y térmicos que tienen la misma capacidad. En los casos en los que el área disponible para la instalación es limitada, los PV/T son la mejor opción.

Hay varios tipos de paneles PV/T y se clasifican según el fluido utilizado, la geometría del panel y si está integrado en un edificio o no. La existencia de acristalado en el colector es otro factor que distingue las características de un PV/T.

Hay cuatro tipos de paneles PV/T: Colectores de fluido gaseoso, de fluido líquido, mixtos aire-agua y panel híbrido de concentración. [18]

2.4.1 Tipos de paneles PV/T

Colectores de fluido gaseoso

Estos colectores son los más sencillos de construir. Consiste en hacer circular el fluido refrigerante, que suele ser aire del entorno o del propio recinto a calefactar. Hay cuatro tipos de configuraciones de estos sistemas que se obtienen variando la circulación del aire superior y/o inferior, así como su dirección. Esto se puede observar en la siguiente figura: [19]

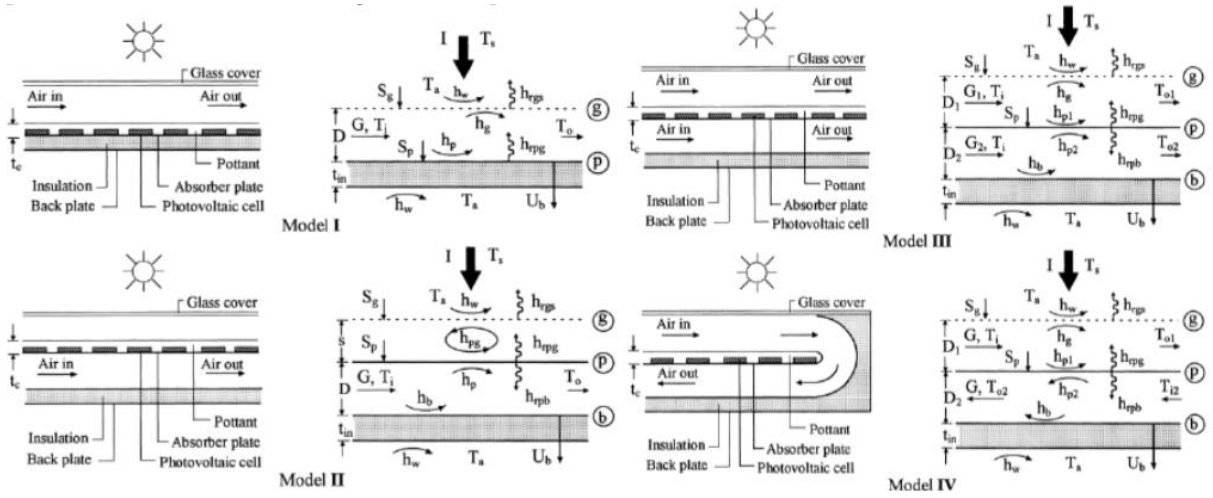


Figura 2-36 Esquema de colectores de aire PV/T [19]

De los modelos de la Figura 2-36 se concluye que el más eficiente es el III. Esto es debido a que se produce una doble refrigeración de la célula fotovoltaica, por cada uno de los lados. También es cierto que el aumento de la temperatura del fluido no depende del modelo utilizado.

Cuando se utiliza aire como fluido, una desventaja importante es la baja transmisión térmica que tiene. Varios expertos han tratado de mejorar este aspecto cambiando la geometría de la superficie del colector. Un ejemplo de esto es la planteada por el autor Othman, quién planteó la colocación de aletas para incrementar la superficie de transmisión térmica. [19]

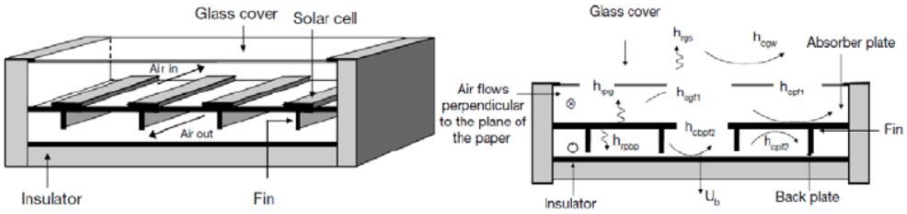


Figura 2-37 Colector de aire con aletas [19]

Otra aplicación de los PV/T es integrándolos en las fachadas de viviendas. Haciendo circular el aire por una cámara hueca en la parte trasera, se refrigera el panel PV y posteriormente se puede utilizar el aire caliente para climatizar la vivienda.

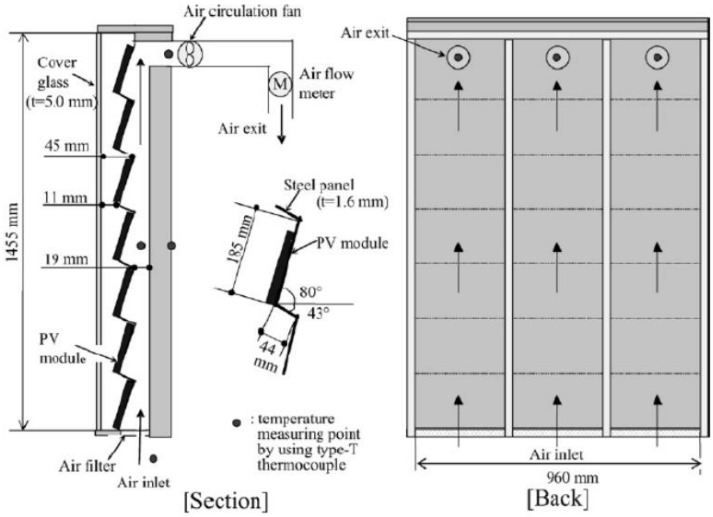


Figura 2-38 Esquema PV/T en fachada refrigerado por aire

Colectores de fluido líquido

Este tipo de PV/T son los que utilizan un fluido como líquido portador de calor. Debido a la gran similitud que tienen con los paneles solares térmicos convencionales, estos son los que más se están desarrollando y evolucionando actualmente. Los líquidos utilizados en este tipo de PV/T tienen mayor capacidad de transporte y proporcionan mayor transferencia térmica por unidad de masa, por lo tanto son menos voluminosos. En la figura siguiente se muestran los principales líquidos utilizados en estos paneles: [19]

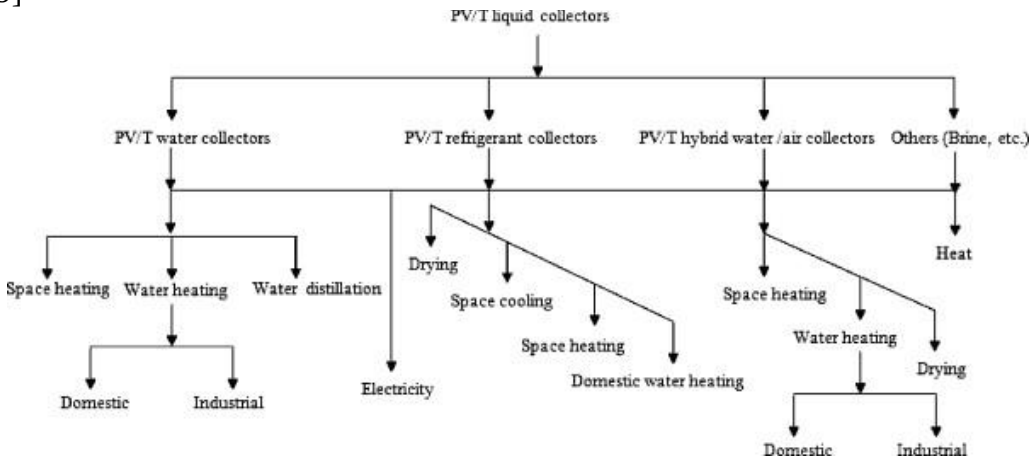


Figura 2-39 Clasificación de los colectores PV/T basados en fluidos líquidos

En la Figura 2-40, se muestran las posibilidades de diseño de este tipo de paneles; refrigerando las células fotovoltaicas por la parte inferior utilizando tubos, canales o mediante la circulación de un flujo en lámina libre, o haciendo circular el fluido por la parte superior de los módulos fotovoltaicos. [19]

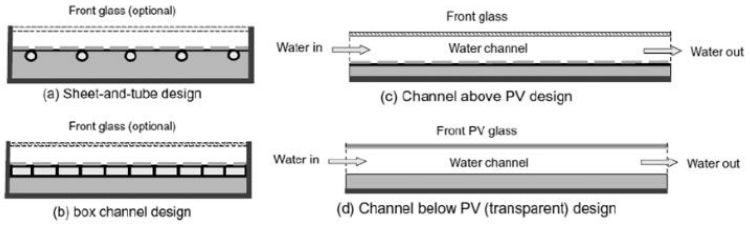


Figura 2-40 Configuraciones posibles de colectores PV/T de agua

La posibilidad que más se está desarrollando, es la configuración mediante tubos. Se han realizado diversos estudios sobre la geometría que deberían tener los colectores.

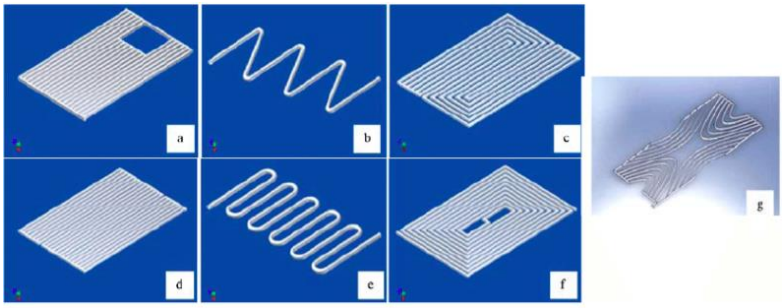


Figura 2-41 Geometrías estudiadas para un colector

De las geometrías estudiadas, se concluyó que la más adecuada era la "f", un colector continuo en espiral.

Colectores mixtos agua-aire

Estos colectores juntan las dos técnicas mencionadas anteriormente en un mismo módulo. De esta forma se consigue calentar agua y aire al mismo tiempo.

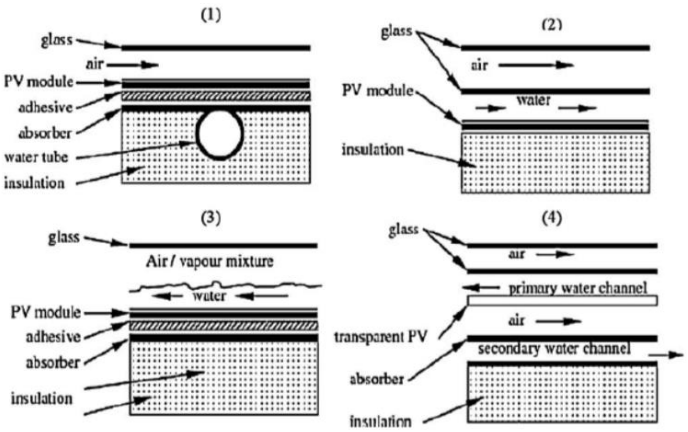


Figura 2-42 Esquemas PV/T mixtos agua-aire [19]

En las diferentes opciones, la innovación es la posición de los flujos de cada uno de los fluidos. Aunque este tipo de modelos no son muy útiles por la dificultad de su construcción y la baja temperatura con la que salen los fluidos. [19]

Panel híbrido de concentración

Este tipo de paneles son una alternativa a los paneles solares planos. Estos aumentan la eficiencia de los paneles concentrando la radiación solar en ciertos puntos. Este efecto es favorable puesto que permite trabajar a temperaturas más elevadas, que superan la temperatura de vaporización. El problemas es que en los módulos PV esto provoca un sobrecalentamiento del panel provocando una disminución del rendimiento eléctrico y mayor degradación. La solución a este problema es la colocación de elementos refrigerantes en la célula PV. Existen dos tipos de paneles: los primeros los que incorporan reflectores parabólicos y los segundos mediante lentes concentradoras.

Existen dos diseños diferentes de concentración con colectores parabólicos. El primero cuenta con dos tramos parabólicos independientes que conduce la radiación hacia el fondo del colector donde se coloca el módulo PV. El segundo diseño concentra la radiación en el propio foco. En la siguiente figura se muestran esquemas de ambos:

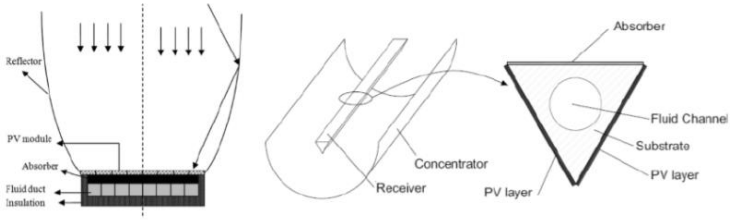


Figura 2-43 Colectores de concentración parabólica [19]

Con este tipo de colector, el rendimiento eléctrico es un 6% menor, sin embargo, la producción térmica es mucho mayor a la que se conseguiría con un PV/T sin concentración y obteniendo un fluido a mayor temperatura a la salida del colector.

El segundo tipo de colector con concentración es mediante lentes. El mayor inconveniente de esta tecnología es el coste de las lentes. En la siguiente figura se muestra un esquema de este tipo, aunque está en desuso actualmente por motivos de costes:

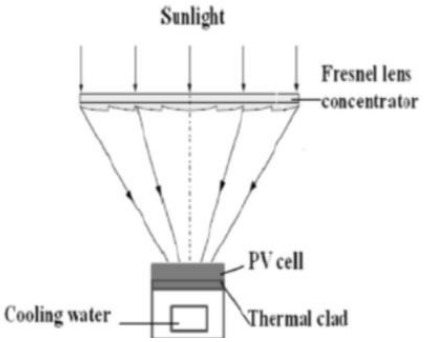


Figura 2-44 Colector PV/T con concentración mediante lentes [19]

Los paneles solares híbridos PV/T permiten aprovechar el calor residual de los paneles PV aumentando el rendimiento eléctrico de estos paneles mediante la refrigeración de las células PV.

Es una tecnología relativamente nueva por lo que aún está en desarrollo.

Los principales fluidos utilizados en esta tecnología son aire y agua, aunque se está estudiando la posibilidad de utilizar la tecnología PV/T en bombas de calor como evaporadores, por lo tanto, utilizarían fluidos refrigerantes.

La tecnología de baja concentración presenta una disminución en la producción eléctrica, pero se compensa con el aumento en la producción de energía térmica. [19]

2.5 Descripción de la instalación real bajo estudio

La instalación híbrida que se estudiará en este trabajo se encuentra en Burgos. El estudio del panel solar híbrido se hará en función de los datos tomados en el año 2012 de las características principales de funcionamiento.

El circuito hidráulico cuenta con un panel solar híbrido, un depósito de inercia y una bomba, que se colocan en serie. Para realizar una refrigeración efectiva del panel, en punto de entrada del flujo se coloca en la parte inferior y la salida en la parte superior. El fluido es posteriormente direccionado a la parte superior del depósito de inercia. De esta forma, se consigue estratificar el fluido dentro del depósito según la temperatura a la que esté. En la parte superior del depósito se encuentra en fluido más caliente y en la parte inferior el frío. El flujo sale por la parte lateral inferior del depósito. El depósito tiene una conexión en su parte inferior para su llenado y vaciado, de forma que se evite circular suciedad que pudiera encontrarse dentro del depósito, y garantizar un buen mantenimiento de los elementos del sistema. El fluido frío sale del depósito para dirigirse a la bomba que lo impulsa de nuevo a la parte inferior del panel y comenzar de nuevo el ciclo.

En paralelo al circuito descrito se encuentra un aerotermo por el que circula el fluido para disipar el calor al ambiente. Este aerotermo dispone de válvulas manuales para activarlo o desactivarlo. Se desactiva solo en caso de querer tener el depósito a mayor temperatura y estudiar el comportamiento de la instalación a alta temperatura.

El enfriamiento del fluido, para obtener temperaturas por debajo de la temperatura ambiente, se realiza haciendo circular el fluido por un enfriador. Este está conectado directamente al depósito de inercia. El fluido se extrae de la parte media del depósito y se devuelve a este por la parte inferior.
En la siguiente figura se puede ver la instalación real:

Figura 2-45 Instalación real

El panel solar híbrido tiene las características eléctricas mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 2-2 Parámetros eléctricos del panel

Parámetro		Valor	Parámetro		Valor
Potencia máx. a STC	P_{mp}	220 W	Coef temperatura P_{mp}	γ	-0,43 %/°C
Eficiencia a STC	η	13,6 %	Coef temperatura V_{oc}	α	-0,356 %/°C
Fill Factor	FF	0,740	Coef temperatura I_{sc}	β	0,062 %/°C
Tensión potencia máx.	V_{mp}	29,2 V	Temperatura de la célula	NOCT	
Corriente potencia máx.	I_{mp}	7,54 A	Diodo BY-PASS		12 A /40 V
Tensión circuito abierto	V_{oc}	36,7 V	Tensión máx. UL/IEC	V_{max}	600/1000 V
Corriente cortocircuito	I_{sc}	8,10 A	Ensayo corriente inversa		13,5 A

El panel PV/T está conectado a una batería, un regulador y una carga, de forma que la batería se recarga continuamente y cuando no hay radiación incidente sobre el panel el regulador enciende el foco con el fin de descargar la batería.

En el circuito hidráulico, hay una serie de sensores que dan información sobre la temperatura a la entrada y salida del panel, así como en su interior, obteniendo la temperatura de trabajo de las células fotovoltaicas.

En esta instalación es posible variar:

- El caudal de fluido que circula por la instalación.
- La temperatura del fluido en la entrada.
- La acumulación de calor.
- El trabajo por debajo de la temperatura ambiente.

2.5.1 Elementos de la instalación

A continuación, se hace una descripción de cada uno de los elementos de la instalación.

Aerotermo

La función de este elemento es disipar el calor. Está formado por un circuito de aletas por el que se hace circular el fluido. Por otra parte, cuenta con un ventilador para realizar convección forzada. Se puede controlar el encendido y apagado de este elemento para conseguir una disipación parcial de la energía.

Es un modelo BD 08 SALVADOR ESCODA. Puede ofrecer potencias de hasta 8 kW. El ventilador ofrece una velocidad constante de giro y consume 100 W.

Figura 2-46 Aerotermo

Enfriador de agua

Con el aerotermo descrito anteriormente, solo se puede enfriar el fluido hasta temperaturas ligeramente superiores a la del ambiente. Con el enfriador de agua se puede trabajar con rangos de temperatura por debajo de esta. Es un enfriador de compresión mecánica. Tiene una segunda aplicación que es la de funcionar como bomba de calor, de modo que se podría calentar el fluido.

El modelo utilizado es TCAEY-THAEY 105P/L RHOSS. Ofrece potencias de hasta 5,5 kW y consume 2kW. Entrará en funcionamiento cuando la temperatura del fluido en el depósito de inercia varíe con respecto a los valores de referencia. El encendido y apagado se realiza de forma automática por la máquina.

Figura 2-47 Enfriador de agua

Bomba

Con la bomba se hace circular el fluido por todo el circuito. Se trata de una bomba que se puede variar el caudal. Se trata de un modelo AX25/4-B SEDICAL. Esta bomba tiene una potencia superior a la necesaria, pero al ser regulable no presenta ningún problema.

Tiene tres modos de funcionamiento. El primero presenta una presión proporcional en el cual el funcionamiento de la bomba es lineal y tiene 3 modos de regulación. El segundo es el de presión constante, en el que se puede variar la velocidad del rodete para mantener una presión constante de la instalación. El tercer modo es a velocidad constante pudiendo escoger tres velocidades diferentes.

Depósito de inercia

El depósito en cuestión tiene una capacidad de 100 litros. La temperatura de entrada del fluido se pretende mantener constante en la entrada del panel.

Este depósito es del fabricante SALVADOR ESCODA. Dispone de varias tomas de conexión. En la conexión superior se hace entrar el fluido y por las salidas lateral e inferior se manda el fluido hacia el panel. Existen otras dos conexiones que se dirigen al enfriador de agua.

Figura 2-48 Depósito de inercia

Control

Con este dispositivo se controla el funcionamiento de la instalación de manera autónoma. Controla el encendido de diferentes elementos.

Se utiliza un control LOGO 24RC SIEMENS. Es un módulo lógico PLC. El control se ocupa de controlar los relés que accionan el ventilador del aerotermo y la bomba de circulación. Se incorporan dos sondas de temperatura PT1000, que proporcionan el valor de la temperatura a la entrada y a la salida del fluido en el depósito.

Figura 2-49 Control programable

2.5.2 Coste de la instalación

A continuación, se detalla el coste de la instalación por elemento, indicando el coste total al final de la tabla.

Tabla 2-3 Coste de la instalación

Componente	Coste ud.	Unidades	Coste
Baúl intemperie estanco 120x60x50	115,00	1	115,00
Armario eléctrico Schneider 80x60	695,00	1	695,00
Solera de hormigón	450,00	1	450,00
Enfriadora	4.148,00	1	4.148,00
Bomba regulable	317,00	1	317,00
Depósito de inercia 100l	455,00	1	455,00
Aerotermo	644,07	1	644,07
Vaso de Expansión 18l	88,00	1	88,00
Válvula bola ¾"	5,13	4	20,52
Válvula bola 1"	10,96	3	32,87
Válvula bola. Soldar 22mm	7,83	4	31,31
Antirretorno ¾"	5,94	1	5,94
Machón latón ¾"	0,81	10	8,10
Entronque latón ¾"	1,66	14	23,24
Codo latón 90º	1,62	4	6,48
Te latón 1"	2,20	1	2,20
Te latón ¾"	1,80	8	14,40
Reductor latón ¾"-½"	0,55	4	2,20
Reductor latón 1"- ¾"	0,77	4	3,08
Reductor latón 2"- ¾"	4,31	1	4,31
Tapón latón ½"	0,38	3	1,14
Tapón latón 1-½"	1,49	1	1,49
Tapón 2"	4,94	2	9,88
Válvula de seguridad 3 bar	12,04	1	12,04
Purgador automático	15,43	2	15,43
Tubo de cobre 22mm	5,04	6	30,24
Te cobre 22mm	0,74	2	1,48
Codo 90º. 22mm	0,55	8	4,40
Latiguillos MP20	12,22	8,2	100,20
Caudalímetro	286,00	1	286,00
Sondas de temperatura + racor ½	80,00	4	320,00
Datalogger CR1000	2.115,08	1	2.115,08
Control LOGO	1.125,00	1	1.125,00

Diferenciales	63,00	1	63,00
Magneto-térmico	35,00	6	210,00
Enchufes	10,00	2	20,00
Reguladores Solares MPPT 75	257,54	2	515,08
Batería	193,00	2	386,00
Control de descarga batería	19,90	2	39,80
Focos LED 50W	42,00	2	84,00
Cables y punteras	85,00	1	85,00
Potenciómetros 100k	18,69	2	37,38
Potenciómetros 20k	14,44	2	28,88
Transductores de corriente	14,63	2	29,26
Liquido anticongelante TIFOCOL	5,15	120	618,00
Otros accesorios	125,00	1	125,00
Total			**13.330,50**

2.5.3 Instalación fotovoltaica

Los elementos de descritos anteriormente caracterizan el comportamiento de la instalación desde un punto de vista térmico.

Este panel solar híbrido también convierte la radiación solar en energía eléctrica. Es por ello que tiene que ser posible medir la cantidad de energía eléctrica producida por el prototipo.

A continuación se muestra un esquema de la instalación fotovoltaica bajo estudio. Destacar que se puede incorporar un inversor para poder trabajar con corriente alterna, pero en la instalación real, por cuestiones económicas, no se incorpora por lo que únicamente funcionará con corriente continua.

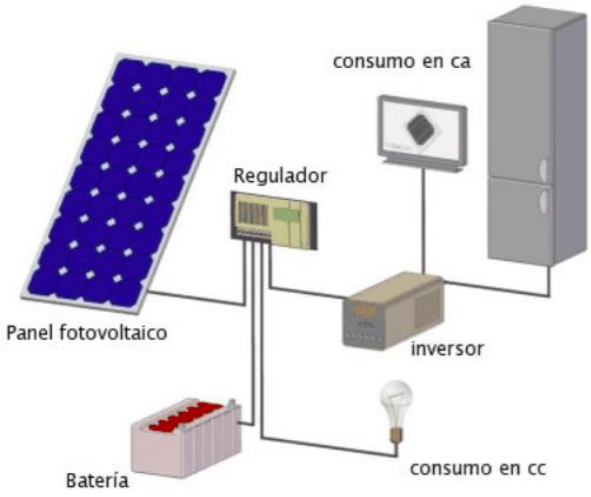


Figura 2-50 Esquema de la instalación solar fotovoltaica aislada

El regular se ocupa de la gestión de la energía eléctrica del panel. En función de las necesidades, se ocupa de cargar la batería o de alimentar la carga, pero en todo momento extrae la mayor parte de energía posible del panel. El funcionamiento de esta instalación aislada será muy parecido a aquel que se da en condiciones óptimas. Esto se debe a la refrigeración del panel al tratarse de un panel solar híbrido. El rendimiento eléctrico será mayor ya que la temperatura de las células es menor. Los componentes están dimensionados para condiciones de potencia máxima.

Como regulador en la instalación real, se optó por utilizar el modelo BLUESOLAR MPPTG 75/50 de VICTRON ENERGY. Este permite una entrada de tensión de 75V, una corriente máxima de 50 A y una potencia máxima de entrada de 700W. Este regulador puede trabajar con baterías tanto de 12 como

de 24 V. En el caso de la instalación bajo estudio, se optó por una batería de 12 V con una capacidad de 95 Ah.

Por último, la instalación cuenta con un elemento que consume energía. En este caso se trata de un foco de led de 50 W. La tensión de alimentación es de 12 V. Este está orientado hacia el cielo puesto que únicamente se utiliza como carga.

2.6 Descripción del modelo PV/T

En 1978 Florschuetz desarrolló la primera formulación matemática para colectores fotovoltaicos/térmicos, basándose en el modelo de Hottel-Whillier. Este modelo se presenta en el libro de Duffie, 2013. El modelo bajo estudio se basa en gran parte en este. Como se muestra en la figura 3-51, la radiación solar, S, que ha sido absorbida por la célula después de cruzar el cristal laminado en la célula, se considera en parte como energía utilizable, Q_u, y otra parte se consideran pérdidas térmicas, Q_{loss}.

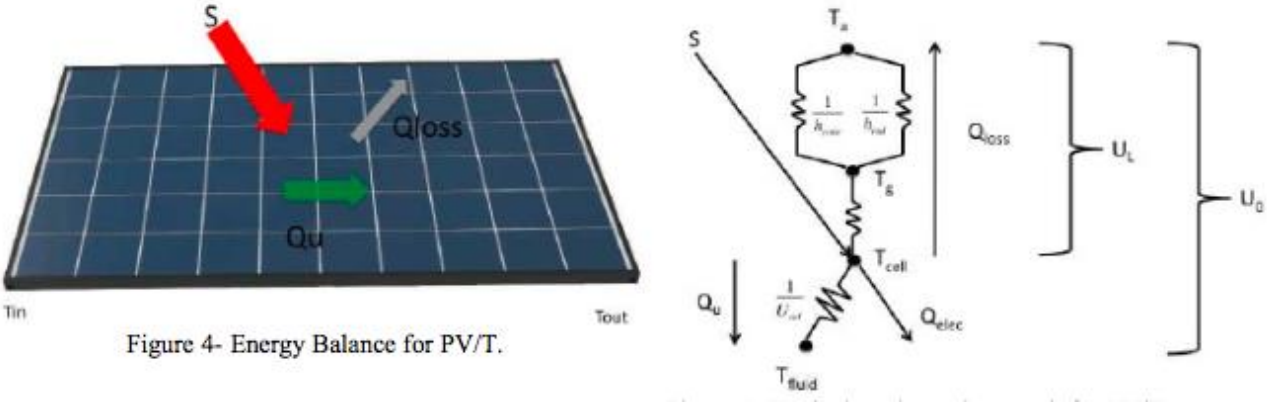


Figura 2-51 Balance de energía en un PV/T y si equivalente térmico

Se puede hacer un balance de energía:

$$S = Q_u + Q_{loss}$$

Donde Q_{loss} incluye pérdidas por radiación y convección las cuales dependen principalmente de la temperatura de la célula y la temperatura del aire. Q_u es la energía útil absorbida por el sistema como energía térmica, Q_{th}, y eléctrica, Q_{elec}. La parte de Q_u que no se transforma en energía eléctrica se transfiere a un fluido por efecto de convección y conducción en la parte baja del panel. La capacidad de un PV/T para transferir energía térmica se caracteriza por la variable U_{col}. De la figura 2-51 se puede deducir la siguiente ecuación:

$$Q_u = Q_{th} + Q_{elec} = A_c[S - U_L(T_{cell} - T_a)]$$

Donde U_L es el coeficiente de pérdida de calor total. La eficiencia de la célula, η, se puede definir como la proporción entre la energía eléctrica generada y la energía incidente sobre el panel. Por lo tanto, la electricidad generada se puede escribir como:

$$Q_e = A_c q_e = A_c \, \eta \frac{S}{\alpha}$$

donde α es la transparencia de la célula con respecto al cristal laminado. La dependencia de la eficiencia de la célula de la temperatura se puede definir como:

$$\eta = \eta_r[1 - \beta(T_{cell} - T_r)]$$

donde η es la eficiencia de la célula, η_r es la eficiencia de la célula en condiciones de referencia, β es el coeficiente de temperatura, T_{cell} es la temperatura de la célula y T_r es la temperatura de referencia.

Combinando las ecuaciones anteriores, se llega a la siguiente:

$$Q_{th} = A_c[S - U_L(T_{cell} - T_a)] = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})$$

Para definir mejor esta ecuación, es conveniente escribirla en función de la temperatura del fluido. Por lo tanto hay que definir el parámetro F', que representa la relación entre la resistencia a la transferencia de calor desde las células al aire y del fluido al aire.

$$F' = \frac{U_0}{U_L}$$

F' representa la proporción de la ganancia de energía térmica utilizable con la ganancia de energía térmica utilizable que resultaría si la superficie absorbente del colector hubiese estado a la temperatura del fluido. La ecuación queda como sigue:

$$Q_{th} = A_c F'[S - U_L(T - T_a)] = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})$$

donde T es la temperatura del fluido.

El type 50a de TRNSYS está basado en esta descripción del modelo de la ecuación. Consecuentemente, algunos parámetros que caracterizan la tecnología PV/T tienen que ser insertados:

- F' en el type 50a recibe el nombre de "collector fin efficiency factor"
- U_L recibe el nombre de "collector loss coefficient"

[20]

3 METODOLOGÍA

3.1 Software empleado

3.1.1 TRNSYS

TRNSYS es un programa de simulación desarrollado por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Wisconsin-Madison y apoyado por contribuyentes como TRANSOLAR Energietecknik GMBH, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) y Thermal Energy Systems Specialists (TESS).

Este programa resulta muy completo en cuanto a la predicción de las características de los sistemas de energía solar térmica a baja temperatura y diseñar el sistema con los componentes adecuados y más eficientes para obtener un comportamiento adecuado del sistema.

TRNSYS es un solver de ecuaciones diferenciales y algebraicas que incorpora una biblioteca con los componentes más comunes que se encuentran en los sistemas termoenergéticos y está diseñado para realizar simulaciones transitorias. Cada componente de TRNSYS utiliza una nomenclatura específica de este programa, denominando a cada elemento distinto TYPE "X". Este programa permite analizar el sistema completo mediante la suma de componentes y la interconexión de éstos.

Este programa también ofrece la posibilidad de realizar simulaciones de radiación. El software es capaz de proveer de todos los datos de radiación necesarios al usuario mediante las salidas de una hoja de datos meteorológicos. [21]

3.1.2 Colector PV/T bajo estudio

Las características del colector PV/T bajo estudio, que se simulará más adelante en TRNSYS, se obtienen del trabajo realizado por Pilar Santamaría Ventureira en la Universidad de Burgos (Tabla 3-1).

Tabla 3-1 Datos eléctricos del módulo solar

Datos eléctricos		
Potencia máxima a STC	P_{mp} (Wp)	220º
Eficiencia a STC	η(%)	13,6
Factor de llenado	FF	0,740
Voltaje a potencia máxima	V_{mp} (V)	29,2
Corriente a potencia máxima	I_{mp} (A)	7,54
Voltaje de circuito abierto	V_{oc} (V)	36,7
Voltaje de cortocircuito	I_{cc} (A)	8,10
Voltaje máximo UL	V_{max} (V)	800/1000
Coeficiente temperatura de Pmp	T_kP_{mp}	-0.43
Temperatura de célula normal de operación	ºC	47

Tabla 3-2 Características técnicas del colector

Diámetro del colector exterior (mm)	22
Diámetro del colector interior (mm)	19
Conductividad térmica (W/mK)	389,6

Se denominan colectores al conjunto de tubos que se sueldan en la placa de absorción. Estos tubos se pueden colocar de diversas formas, siendo la más común en serpentín, sin embargo, en este caso se dispone de forma paralela, de forma que la entrada y salida del fluido es perpendicular. En esta disposición, únicamente queda sin cubrir la zona donde se sitúa la caja de conexiones. La entrada de agua se produce por la parte inferior del módulo y la salida en la diagonal superior del módulo.

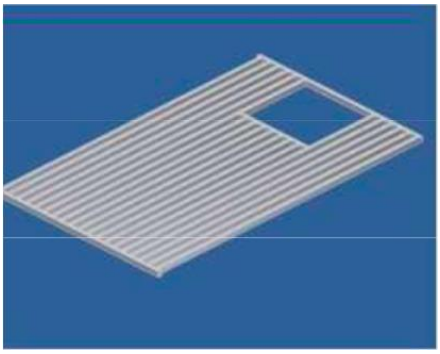


Figura 3-1 Colector utilizado en el módulo híbrido

Otros componentes de la instalación

Para poner en funcionamiento el módulo híbrido es necesario utilizar otros componentes:

- Cuadro eléctrico.
- Ventiladores.
- Intercambiador de calor.
- Bomba.
- Válvula de seguridad.
- Purgador.
- Tuberías de PVC.

- Válvula de llenado.
- Caudalímetro.

3.2 Demanda eléctrica por equipos y unidades

Para hacer una estimación de la cantidad de paneles solares PV/T que sería necesario instalar, según la demanda energética existente en un campamento de Infantería de Marina de entidad Compañía, se ha hecho un estudio del consumo medio de cada equipo electrónico individual utilizado por cada Unidad, y de los equipos colectivos que se utilizan en los despliegues y maniobras que se están realizando actualmente. El número de paneles solares necesarios variará según la ubicación del campamento puesto que la generación eléctrica varía en función de la radiación que incide directamente sobre el panel.

Para calcular la demanda energética global de cada equipo, se ha tenido en cuenta el tiempo medio de operación del equipo en cuestión. Éste se multiplica por su consumo unitario y por el número de equipos iguales existentes.

3.2.1 Equipos de uso individual

A continuación se incluyen una serie de visores y equipos de comunicaciones de utilización actual durante las maniobras y despliegues de unidades de Infantería de Marina de entidad Compañía. Se ofrece una estimación del perfil de uso de estos equipos, pues es complicado entregar un dato exacto. Los tiempos de uso de cada equipo se ofrecen en las siguientes tablas:

Tabla 3-3 Horas de uso de los visores

VISORES	HORAS/DÍA
A/N PEQ-2A	2,0
M3X	0,5
HWS 552	4,0
A/N PVS-14	2,0

Tabla 3-4 Horas de uso equipos de comunicaciones

EQUIPOS DE COMUNICACIONES	HORAS/DÍA
PR4G 9100	24
PR4G 9200	24

3.2.2 Equipos de uso colectivo

En este grupo se incluyen los contenedores modulares de uso colectivo que se utilizan en zonas de operaciones, en función del tamaño de la unidad a apoyar o del periodo de tiempo que se estima dure el despliegue.

Tabla 3-5 Tiempo de uso de equipos colectivos

CONTENEDORES	HORAS/DIA
COCINA	12
CONGELADOR	24
DEPURADORA	12
DUCHA-WC	12
FRIGORÍFICO	24
ISOTERMO	24
LAVANDERÍA	24
TALLER	12
TELEMEDICINA	24
LAVAVAJILLAS	12
WC	12

3.3 Consumos de los equipos en función de sus perfiles de uso

Para el caso de los visores nocturnos, se obtienes los consumos diarios que se muestran en la siguiente Tabla 3-6:

Tabla 3-6 Consumo visores

VISORES	POTENCIA (W)	HORAS/ DIA	TOTAL (Wh/DIA)
A/N PEQ-2A	1,00	2,00	**2,00**
M3X	8,40	0,50	**4,20**
HWS 552	0,01	4,00	**0,04**
A/N PVS-14	0,07	2,00	**0,14**

En cuanto a los equipos de comunicaciones, los consumos medios obtenidos de acuerdo a sus perfiles de uso son los que se muestran en la tabla 4-7.

Tabla 3-7 Consumo equipos de comunicaciones

EQUIPOS DE COMUNICACIONES	POTENCIA (W)	HORAS	TOTAL (Wh)
PR4G 9100	3,47	24	**83,28**
PR4G 9200	10.77	24	**258,48**

Para los equipos de uso colectivo, el consumo medio se ha calculado de igual manera que para los equipos de uso individual. Estos consumos se muestran en la tabla 3-8.

Tabla 3-8 Consumo equipos de uso colectivo

CONTENEDORES	POTENCIA (kW)	HORAS	TOTAL (kWh)
COCINA	40	12	**480**
CONGELADOR	8	24	**192**
DEPURADORA	20	12	**240**
DUCHA-WC	8	12	**96**
FRIGORÍFICO	8	24	**192**
ISOTERMO	8	24	**192**
LAVANDERIA	14	24	**336**
LAVAVAJILLAS	14	12	**168**
TALLER	8	12	**96**
TELEMEDICINA	12	24	**288**
WC	8	12	**96**
TOTAL			**1992**

Teniendo en cuenta los consumos de los equipos calculados anteriormente, se puede hacer una estimación de la demanda eléctrica que tendría una Compañía de fusiles de Infantería de Marina. Los equipos estudiados en este apartado son los más comunes en las Unidades de Infantería de Marina, pero existen muchos otros con consumos diferentes que también podrían haber sido objeto de estudio para el

cálculo de la demanda eléctrica de una Compañía de fusiles. A continuación, en la tabla 3-9, se muestra el consumo total de una Compañía:

Tabla 3-9 Consumo total equipos individuales de una Compañía

	CONSUMO (Wh)
VISORES	154,26
EQUIPOS COMUNICACIONES	3825,36
TOTAL	**3979,62**

A este hay que añadirle el consumo de los equipos colectivos descritos anteriormente.

3.4 Consumo durante el campamento en el Teleno

Las tiendas DRASH, ampliamente utilizadas por unidades de Infantería de Marina en todos sus despliegues ya que se utilizan como puestos de mando, instalaciones sanitarias y alojamiento para las tropas, ha sido objeto de estudio desde el punto de vista eléctrico. En este caso, se ha calculado la demanda eléctrica de seis tiendas DRASH utilizadas durante unas maniobras por la Compañía de alumnos de la Escuela Naval Militar. Para realizar esta medición, se han utilizado una serie de medidores de consume eléctrico del modelo ICO-GE 410 de 230V y 50 Hz, que realiza mediciones precisas.

Figura 3-2 Medidor de consumo eléctrico utilizado

En la siguiente tabla se presenta el consumo de cada una de las tiendas en una semana de maniobras en el Teleno:

Tabla 3-10 Consumo eléctrico del campamento

Tienda	Potencia	Consumo/semana
Cocina	226 W	4,90 kWh
Pañol	1680 W	4,49 kWh
Tropa	130 W	1,54 kWh
Comedor	186 W	2,53kWh
C1º	192 W	8,95kWh
Mandos	178 W	4,56 kWh
Total		26,97 kWh

Para calcular el consumo térmico en el campamento, se pesaron las bombonas de gas propano que se utilizaron durante el mismo. En total había dieciocho bombonas llenas de las cuales se vaciaron seis y otras seis no llegaron a utilizarse en ningún momento. Las bombonas contienen 11 kg de propano.

Cada kg de propano proporciona 13,39 kWh. Los datos recogidos durante la semana de campamento están recogidos en la tabla 3-11.

Tabla 3-11 Consumo térmico

Nº de bombona	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Consumo (kWh)
1	25,1	13,78	151,57
2	24,95	14,63	138,18
3	25,25	14,58	10,67
4	24,8	14,02	144,34
5	24,06	24,06	0
6	25,1	14,43	142,87
7	24,48	13,41	148,23
8	24,98	16,11	118,77
9	24,54	20,54	53,56
10	25,26	15,51	130,55
11	24,92	16,30	115,42
12	24,42	19,25	69,22
13	24	24,00	0
14	25,25	25,25	0
15	25	25,00	0
16	24,4	24,40	0
17	25,1	25,10	0
18	24,2	24,20	0
TOTAL			1123,38

3.5 Modelo TRNSYS

A continuación, se muestra la instalación objeto de estudio. Su funcionamiento es sencillo. Inicialmente, se obtiene calor de la radiación solar que se transmite por convección en el type560 al fluido que se encuentra en el colector y por lo tanto calentándolo. El flujo posteriormente se dirige al intercambiador de calor (type5g) donde se enfría el líquido. Posteriormente tras recibir la señal de encendido del type14h, el líquido se hace pasar por una bomba (type 114) que bombea el fluido de nuevo al panel para comenzar el ciclo de nuevo. En cuanto a la simulación, recalcar que se ha suprimido de esta el tanque de estratificación que existe en la instalación real pues para el estudio y los objetivos propuestos para este trabajo no influye ya que los datos obtenidos de generación eléctrica y térmica no se ven afectados por la ausencia de este.

Los elementos con nombre "Salida 1" y "Salida 2" plasman los datos obtenidos al correr la simulación en un documento .txt. Concretamente se muestra la radiación solar incidente sobre la placa por metro cuadrado, así como la generación de energía eléctrica y energía térmica en las condiciones y con los parámetros introducidos en la simulación, indicados en el apartado anterior,

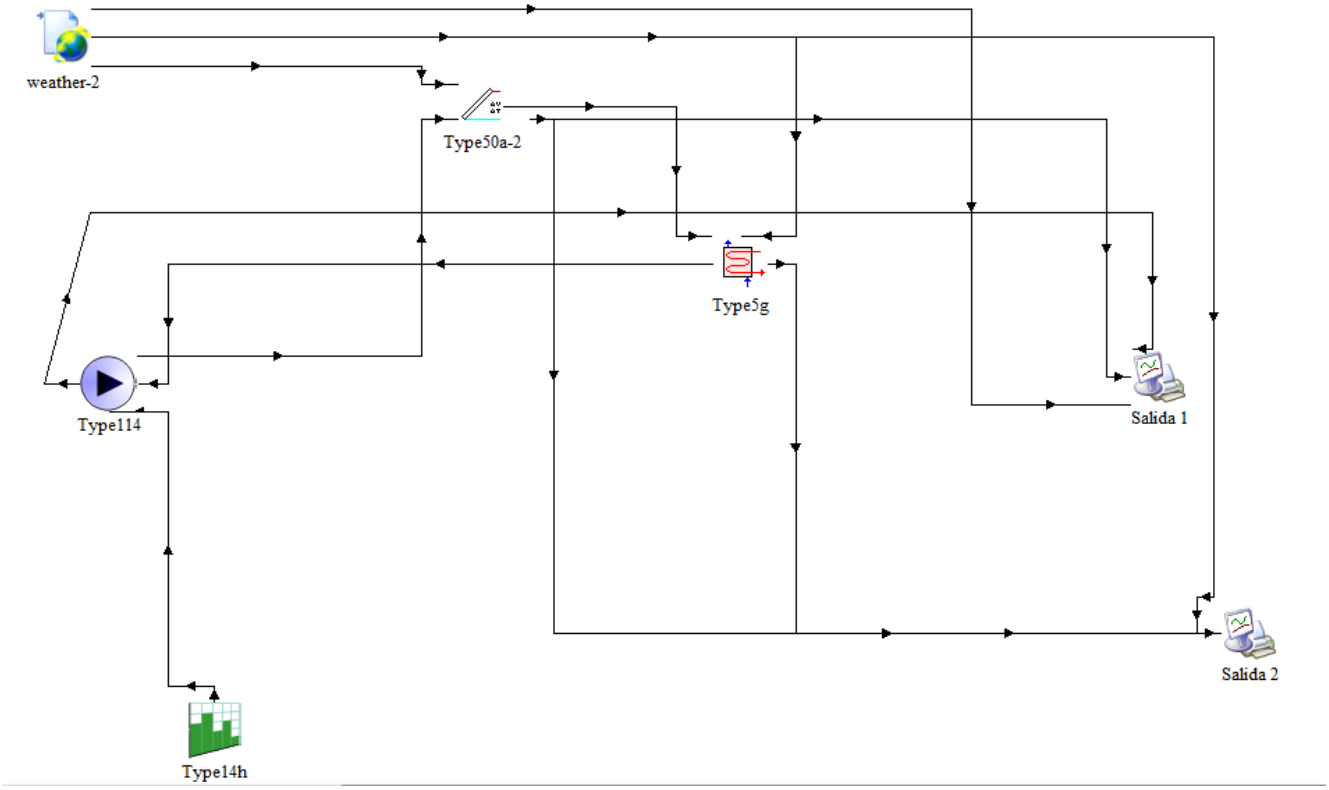


Figura 3-3 Modelo TRNSYS

Decripción de los types

- Colector PV/T (type50a): Este componente simula un colector sin esmaltar que tiene un doble propósito. Por un lado, crea energía eléctrica a partir de células fotovoltaicas y por otro, proporciona calor a un fluido que pasa por los tubos que están unidos a la placa de absorción localizada debajo de las células fotovoltaicas. Simula un colector híbrido PV/T de placa plana, de pérdidas constantes. Este colector es una modificación del colector normalizado de placa plana estándar "type 1", al que se le ha añadido un módulo fotovoltaico. El escogido

simula un colector en el que se combina energía térmica y eléctrica y que incorpora el trabajo y análisis de Florschuetz para colectores planos que trabajan a máxima potencia. [21]

- Intercambiador de calor (type5g): Este elemento modela un intercambiador de calor de dos tuberías, pudiendo transmitir calor y enfriar un flujo de aire desde un flujo líquido.

- Bomba (type114): su función principal es la de bombear el fluido hacia el colector de nuevo para volver a calentarlo. Para que funcione esta bomba es necesario que la temperatura del fluido contenido en la parte inferior del depósito sea menor que la temperatura que puede suministrar el colector. Si el colector no puede proporcionar suficiente energía debido a las condiciones climáticas, para aumentar la temperatura del fluido calorportador por encima de la temperatura del depósito, el colector estaría cediendo calor al exterior. Cuando el colector está en funcionamiento, la temperatura de salida debe ser mayor que la de la entrada. De no ser así, el absorbedor perdería calor hacia el exterior a expensas del fluido. En este caso la bomba no podría funcionar. Esta bomba es de caudal variable para poder analizar el comportamiento de los colectores PV/T. [21]

- Type14h: este type indica el momento en el que se debe recircular el fluido y las horas en las que está en funcionamiento el sistema. En este caso se ha configurado de tal forma que el circuito esté en funcionamiento constantemente, pero podría regularse el momento en que se recircule el fluido.

- El weather data introduce datos climatológicos de la localización deseada, realizando una media de todos los registros desde que se tienen datos.

Tabla 3-12 Lista de types utilizados en el modelo TRNSYS

Componente	Type
Collector PV/T	50a
Weather data	15
Bomba	114
Fan-coil	5g
Forcing function	14h

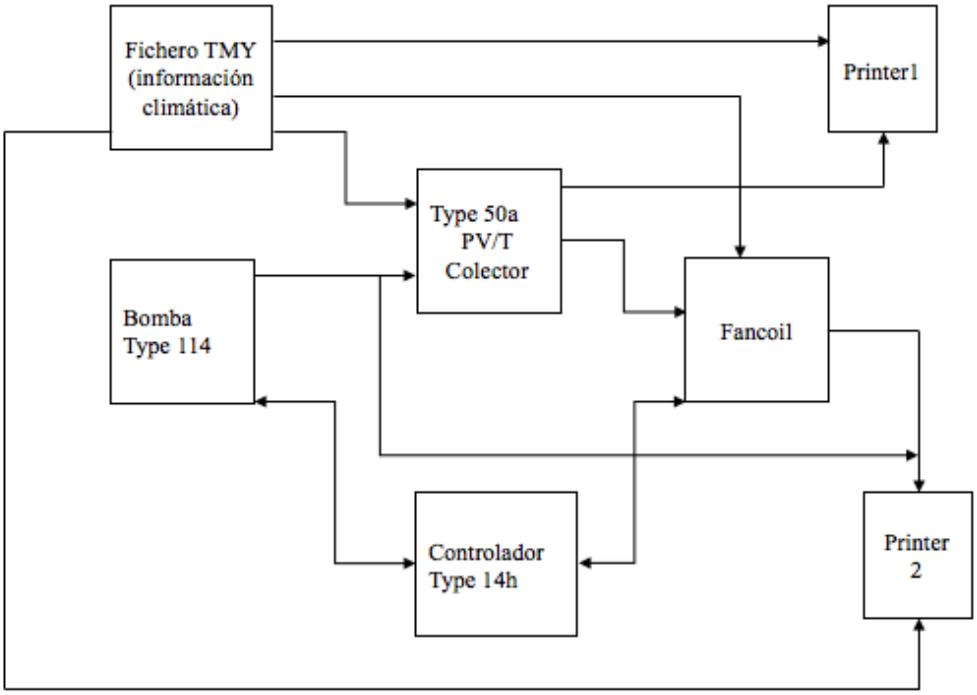


Figura 3-4 Diagrama de bloques de la simulación

3.6 Resumen de los parámetros de referencia utilizados para la simulación

Tabla 3-13 Parámetros de referencia de la simulación

PARAMETROS DE DISEÑO	VALORES
Superficie del colector	1,4 m^2
Número de colectores	1
Volumen del tanque	100L
Temperatura del agua para consumo	45ºC
Tiempo de funcionamiento de la bomba	24h
Factor de eficiencia del colector F'	0,53
Coeficiente de pérdida de calor U_L	4,44 W/m^2K
Packing factor	1
Eficiencia de la célula	0,11
Coeficiente de temperatura	0,45%/ºC

3.7 Lugares objeto de estudio

3.7.1 Clasificación Köppen para la Península Ibérica

Para determinar los distintos tipos de clima de la Península Ibérica, y por lo tanto de los lugares que se han estudiado en el proyecto, se ha utilizado la clasificación climática de Köppen. Esta clasificación se realizó hace más de cien años, pero es fiable y utilizada en todo el mundo.

La clasificación Köppen define distintos tipos de clima en ase a los valores medios mensuales de precipitación y temperatura [22].

La clasificación muestra los siguientes tipos de clima presentes en la Península Ibérica y Baleares:

i- Climas secos – Tipo B [22]

Delimita los climas áridos. Köppen distingue dos tipos de clima B:

- El subtipo BS (estepa) y el subtipo BW (desierto), en función de la precipitación anual .

Köppen distingue también las variedades cálida (BSh y BSk) y fría (BWh y BWk) según la temperatura media anual esté por encima o por debajo de 18ºC.

- BWh (desierto cálido) y BWk (desierto frío) se localizan en zonas al sureste de la Península Ibérica como son Almería, Murcia y Alicante.
- BSh (estepa cálida) y BSk (estepa fría) se extiende por el sureste de la Península Ibérica, el Valle del Ebro, la meseta sur, Extremadura y Baleares.

ii- Climas templados – Tipo C [22]

La temperatura media en estas zonas en los meses más fríos está en 18ºC. Se distinguen los subtipos Cs y Cf siendo Cs el período de verano más seco y si no hay estación seca Cf. Hay una tercera variante para temperaturas medias del mes más caluroso en función de si es mayor o menor de 22ºC.

- Csa (templado con verano seco y caluroso) es la variedad de clima más común en España, siendo de este tipo el 40% de la península. Se extiende por gran parte de la zona sur y la zona mediterránea, exceptuando las zonas áridas mencionadas anteriormente.
- Csb (templado con verano seco y templado) abarca la mayor parte de la zona noroeste de la Península y zonas montañosas del interior.
- Cfa(templado sin estación seca con verano caluroso). Abarca las zonas altas del noroeste de la Península que rodean los Pirineos y el Sistema Ibérico.
- Cfb (templado sin estación seca con verano templado) principalmente en la región cantábrica, en el Sistema Ibérico, parte de la meseta norte y los Pirineos bajos.

iii- Climas polares – Tipo E [22]

La temperatura media del mes más cálido en este tipo es inferior a 0ºC. Se distinguen dos subtipos:

- ET (tundra: temperatura media del mes más cálido es superior a 0ºC). Se da en pequeñas zonas de alta montaña en los Pirineos Centrales.

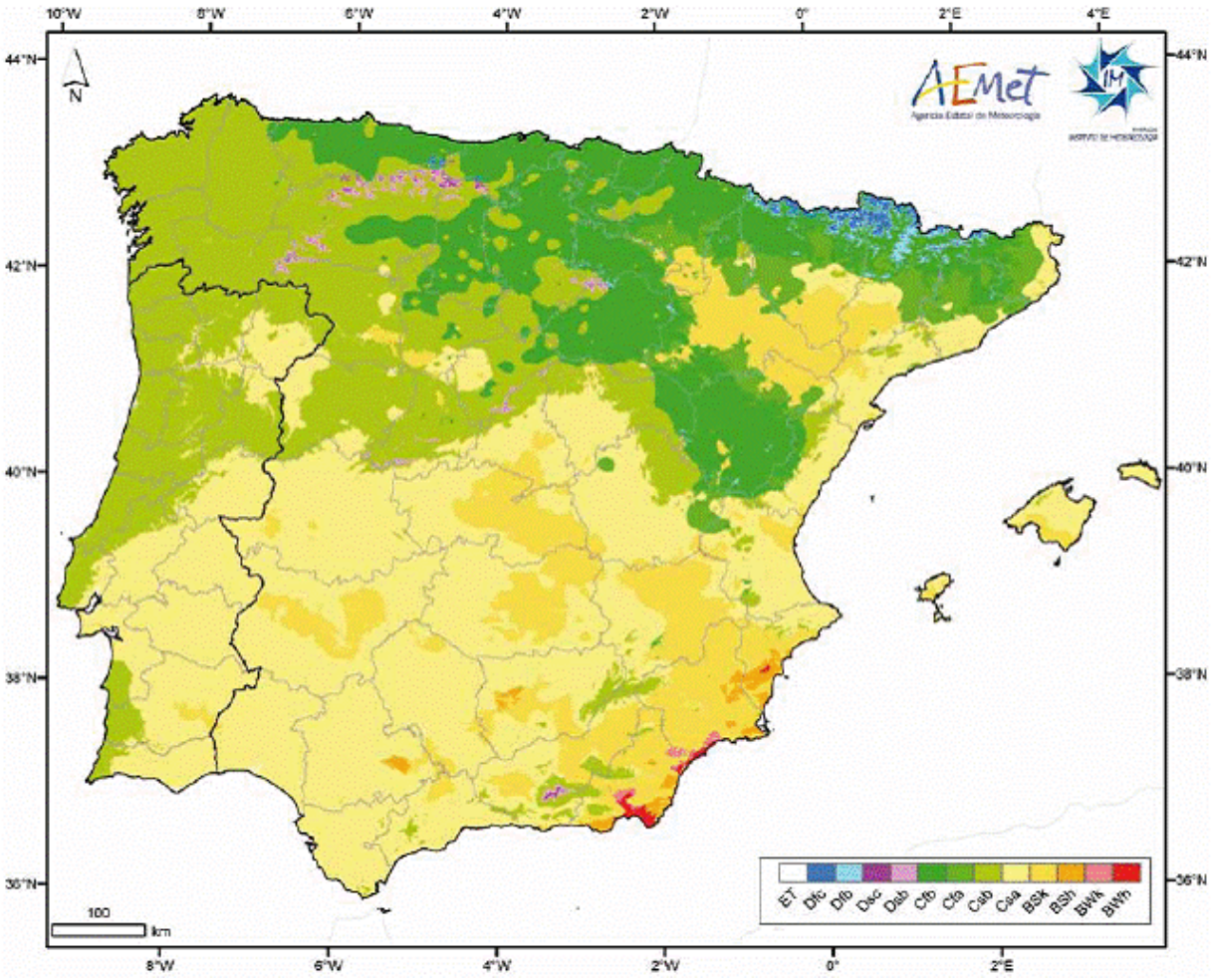


Figura 3-5 Clasificación Köppen

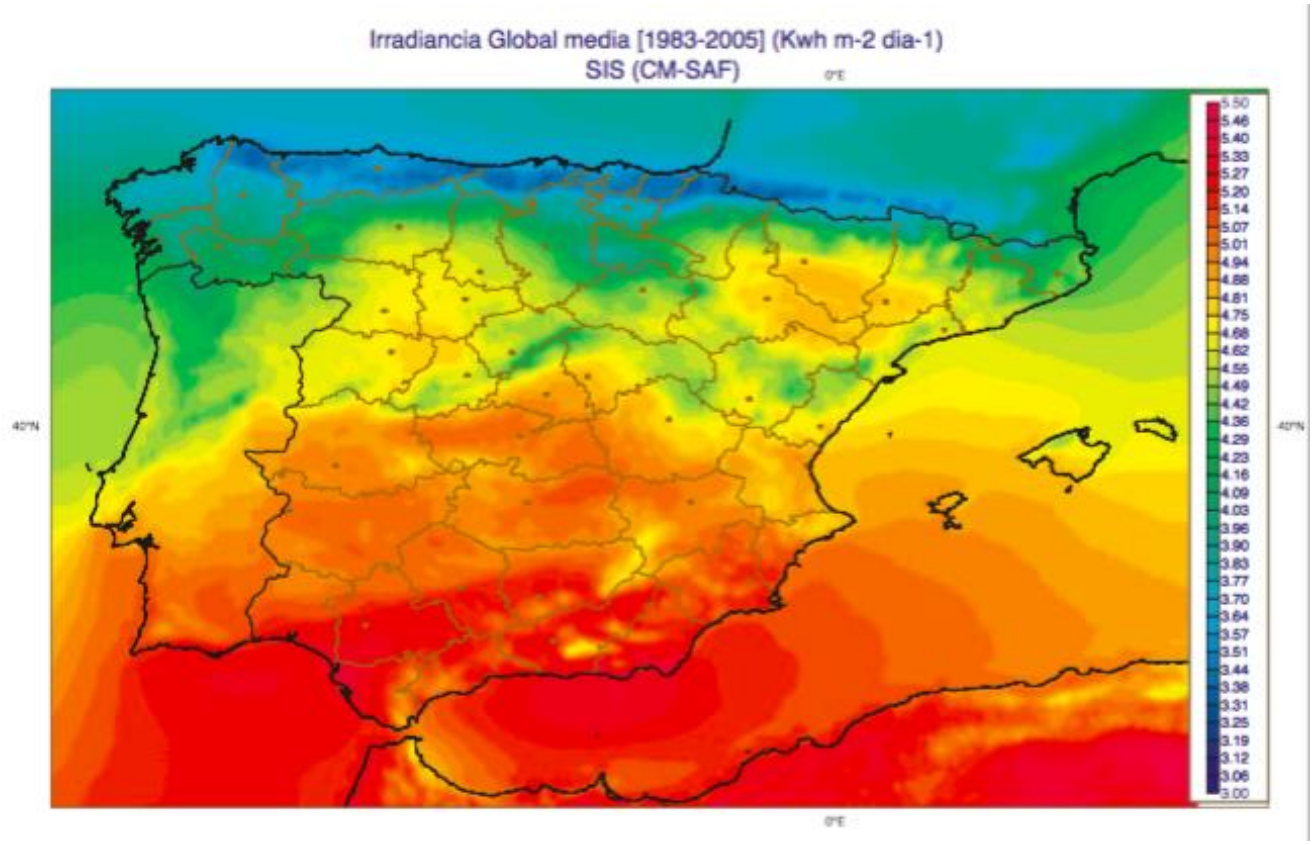


Figura 3-6 Irradiancia Global Media (1983-2005) (kWh/m^2 por día) [23]

En la figura 3-6 se puede apreciar el registro de irradiancia solar de la Península Ibérica. Como se puede distinguir, según la escala de colores, en la zona sur de la península la radiación solar es considerablemente mayor que en la zona norte. Por lo tanto, en Almería la temperatura media anual será mucho mayor que en el resto de zonas peninsulares consideradas, Pontevedra, Burgos y León. En principio esto propiciaría la generación de energía por parte del panel solar PV/T bajo estudio, pero hay que tener en cuenta otros aspectos como pueden ser la temperatura de la célula fotovoltaica, el viento o las precipitaciones.

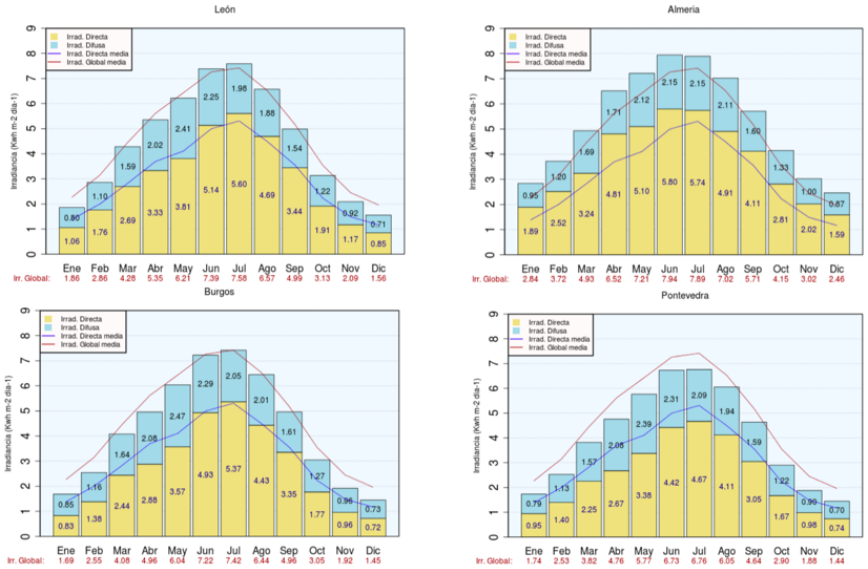


Figura 3-7 Irradiancia global, directa y difusa de las ciudades bajo estudio [23]

3.8 Resultados de la simulación

La simulación en TRNSYS se ha realizado para todo el año, tomando datos cada hora del día, es decir, se han registrado datos de 8760 horas que son las horas que contiene un año. Los resultados numéricos obtenidos en la simulación son la radiación incidente media por metro cuadrado, la generación eléctrica y la generación de energía térmica. Se obtuvieron datos de todas las horas del año. En las tablas posteriores se muestra la media mensual de los datos registrados.

3.8.1 Almería

Almería es la ciudad europea con más horas de sol al año y menos precipitaciones. Destaca por tener cielos despejados durante todo el año y por la intensidad constante de luz durante el día. Es por ello, que al activar la simulación se obtienen valores elevados de radiación incidente sobre la placa, y por lo tanto de generación eléctrica y térmica. Como se puede apreciar en la tabla 3-14, los meses con mayor radiación incidente son abril, junio y julio, por lo tanto será en esos meses cuando el panel solar PV/T ofrezca mayor cantidad de energía eléctrica y térmica.

La tabla 3-14 representa la radiación que incide sobre la placa a lo largo de todo el año, así como la potencia generada por el panel en cada mes y la generación de energía térmica.

Tabla 3-14 Datos Almería

ALMERÍA	RADIACION INCIDENTE	GENERACIÓN ELÉCTRICA	GENERACIÓN TÉRMICA
	kJ/hm²	kWh	kWh
Enero	714,33	242,58	1083,01
Febrero	801,19	242,96	1106,31
Marzo	870,32	289,62	1324,16
Abril	918,20	294,73	1347,95
Mayo	857,12	286,49	1303,05
Junio	912,31	299,53	1385,99
Julio	916,19	298,07	1390,67
Agosto	900,72	290,57	1367,38
Septiembre	843,72	258,09	1202,44
Octubre	730,89	235,73	1085,39
Noviembre	716,79	233,30	1061,84
Diciembre	612,35	194,18	856,34

La tercera columna representa la potencia eléctrica obtenida en Almería en cada mes. En la cuarta columna se muestra la energía térmica que se ha obtenido a través del fluido.

Como era de esperar, en los meses de junio, julio y agosto se obtiene la mayor generación de energía eléctrica.

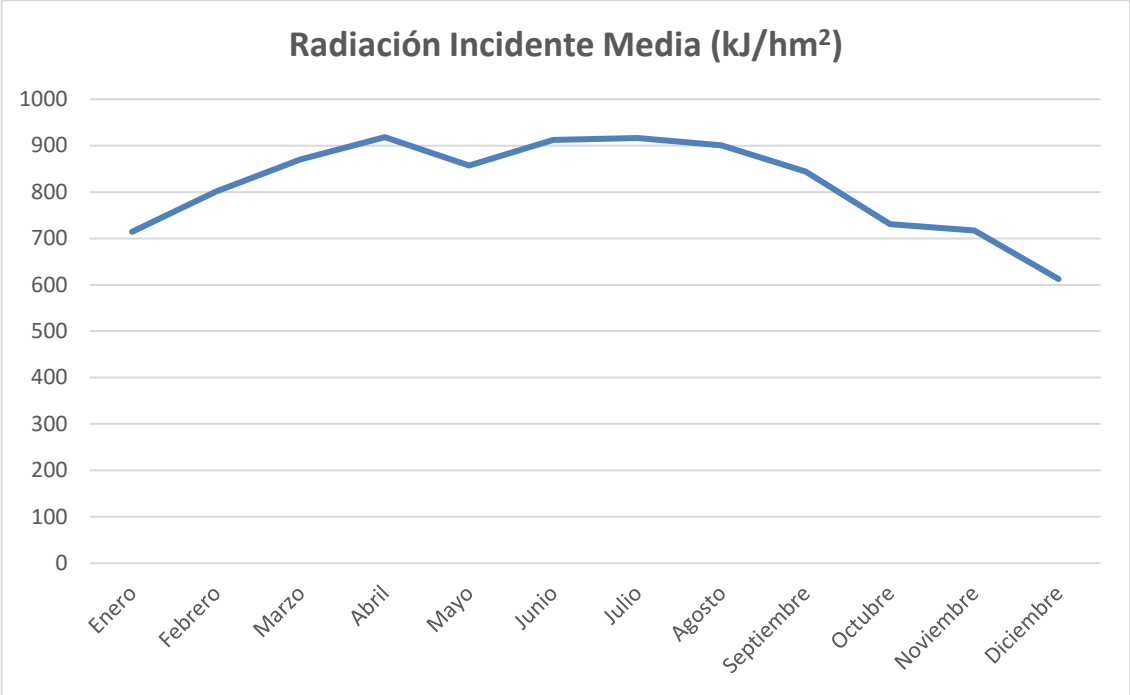


Figura 3-8 Radiación incidente media en Almería

Los resultados obtenidos de generación energética varían en función de la radiación incidente en el panel (figura 3-8). EL pico producción eléctrica se obtiene en el mes de junio, con un valor medio mensual de 299,53 kWh, y el de energía térmica en el mes de julio con un valor de 1390,67 kWh. Hay que tener en cuenta que la eficiencia de la célula varía en función de la temperatura a la que esté. En Almería, durante la temporada cálida su eficiencia disminuye en un 5% con respecto a la que tendría a temperaturas más moderadas.

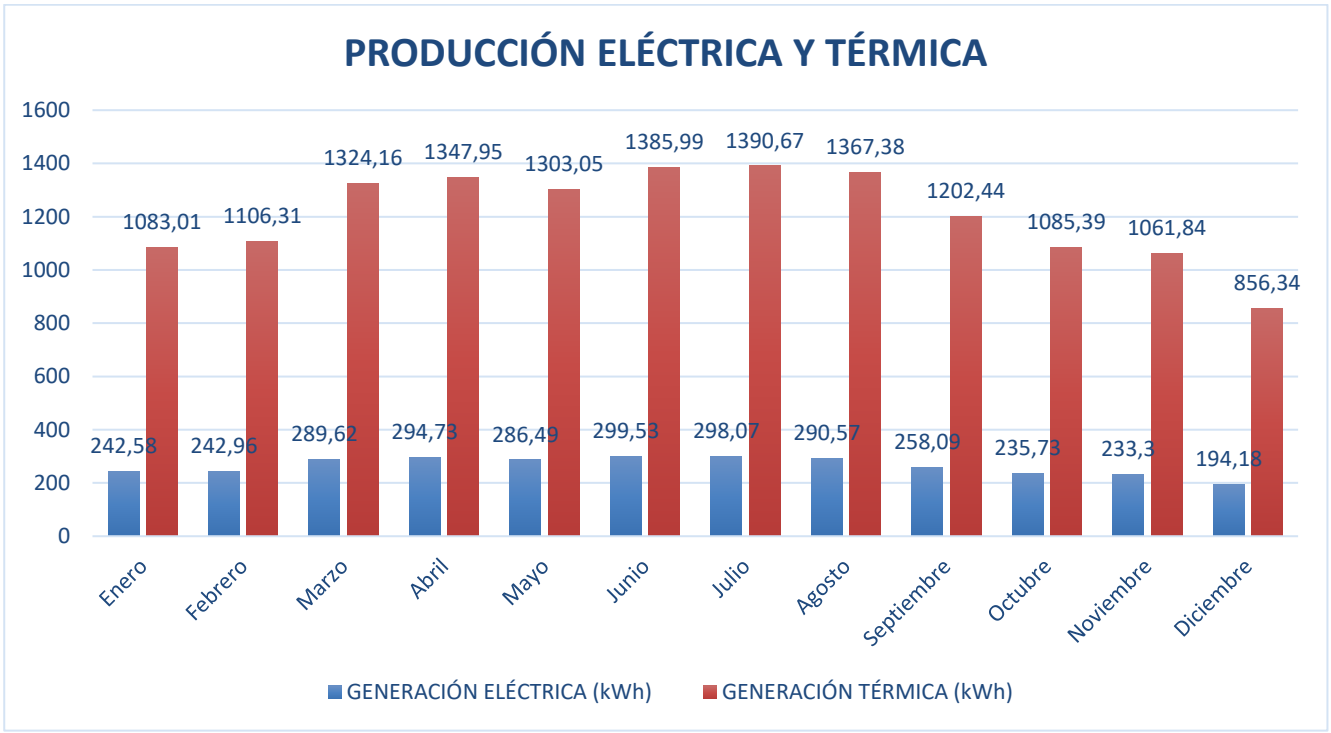


Figura 3-9 Producción energética en Almería

3.8.2 Burgos

En la tabla siguiente se indican los datos obtenidos de la simulación en TRNSYS para Burgos. Las condiciones climáticas de Burgos son favorables para obtener un buen rendimiento del panel, lo cual se ve reflejado en la generación eléctrica y térmica obtenida. En esta localización, se obtienen valores más elevados de producción en los meses de junio, julio y agosto, consiguiéndose el pico de generación eléctrica y térmica en el mes de julio. Los datos de radiación incidente se obtuvieron de METEONORM.

Tabla 3-15 Datos obtenidos en Burgos

BURGOS	RADIACION INCIDENTE	GENERACIÓN ELÉCTRICA	GENERACIÓN TÉRMICA
	kJ/hm²	kWh	kWh
Enero	426,92	149,53	624,31
Febrero	514.62	157,05	680,88
Marzo	741,20	254,66	1134,71
Abril	829,70	272,84	1225,79
Mayo	849,74	286,97	1291,59
Junio	917,53	303,53	1403,20
Julio	998,95	320,20	1515,57
Agosto	948,59	307,78	1459,96
Septiembre	881,65	280,06	1305,41
Octubre	671,75	216,09	960,64
Noviembre	470,23	152,20	654,78
Diciembre	371,58	128,58	530,71

A continuación se muestra una gráfica de la radiación incidente media por metro cuadrado en Burgos. Evidentemente los máximos de radiación solar coinciden con los meses de mayor producción energética.

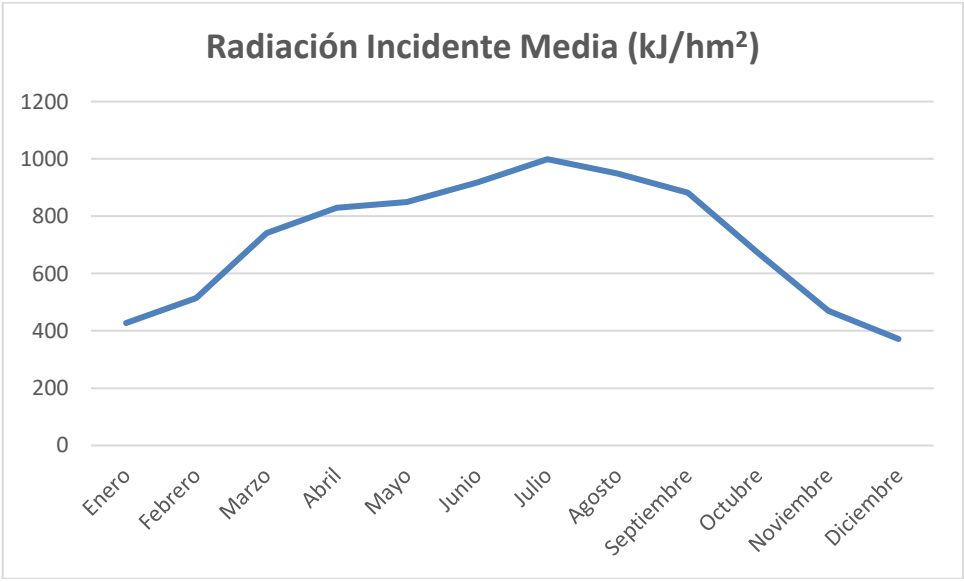


Figura 3-10 Radiación incidente media en Burgos

La instalación real fue diseñada para obtener la máxima producción energética posible, precisamente en la localidad de Burgos. Es por ello que se obtienen los datos tan favorables expuestos en la figura

siguiente. Se puede observar que durante los meses de verano (junio, julio y agosto) la producción de energía se dispara. Esto es debido a que la radiación incidente aumenta considerablemente y que la refrigeración de las células fotovoltaicas provoca la disminución de la temperatura de estas, propiciando la generación de energía. De no existir esta refrigeración, propia de los sistemas PV/T, la generación eléctrica y térmica sería aproximadamente un 8% menor.

En los meses de invierno, sin embargo, la producción energética es mucho menor debido a la escasez de radiación solar por metro cuadrado captada por el panel.

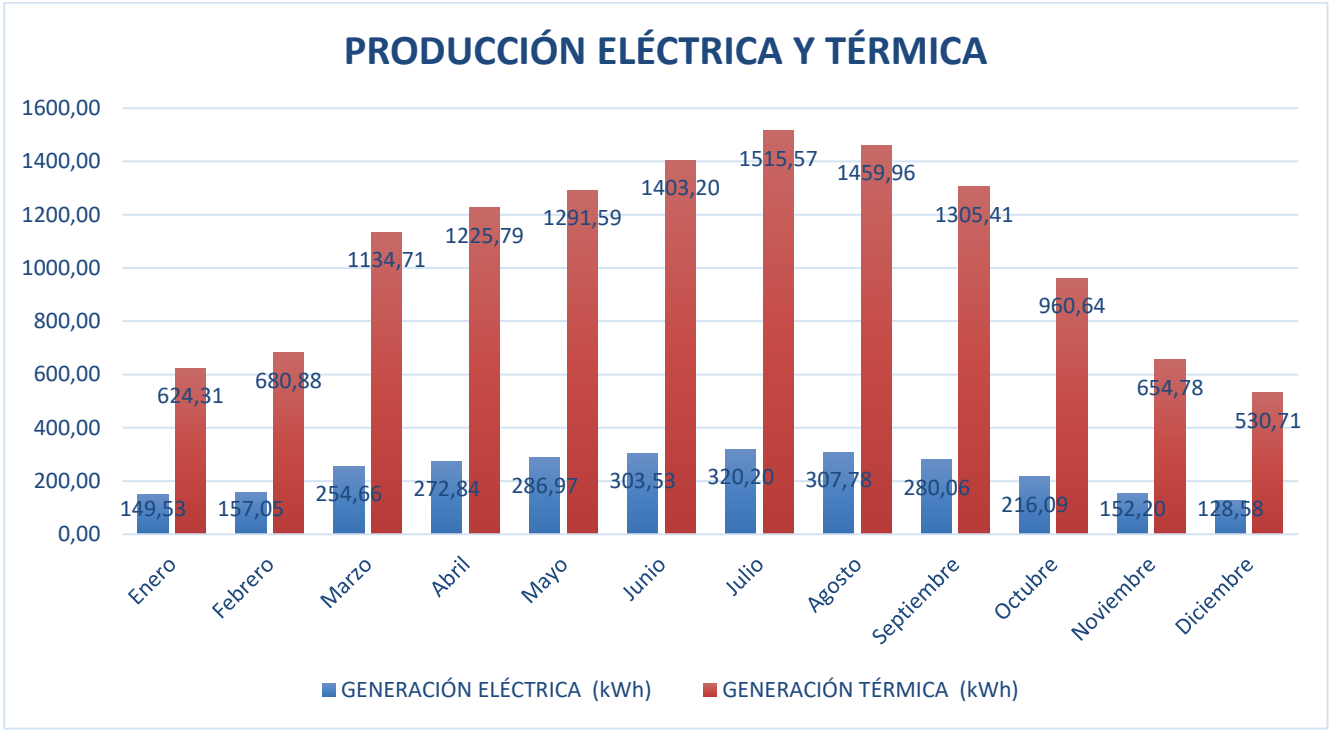


Figura 3-11 Producción energética en Burgos

3.8.3 León

El clima de León destaca por su elevada amplitud térmica, la presencia de inviernos muy fríos y largos y las temperaturas moderadas que se registran durante los meses veraniegos. La tabla siguiente muestra los datos obtenidos de TRNSYS para León.

Tabla 3-16 Datos obtenidos en León

LEON	RADIACION INCIDENTE	GENERACIÓN ELÉCTRICA (kWh)	GENERACIÓN TÉRMICA (kWh)
	kJ/hm²	kWh	kWh
Enero	570,65	202,75	876,54
Febrero	692,00	218,99	962,90
Marzo	847,22	282,25	1264,92
Abril	912,71	296,28	1338,84
Mayo	907,41	300,82	1362,42
Junio	957,55	309,83	1440,17
Julio	1042,84	333,41	1584,95
Agosto	999,14	321,60	1534,78
Septiembre	959,28	295,28	1387,56
Octubre	663,55	227,10	1013,28
Noviembre	564,59	175,41	767,33
Diciembre	454,00	153,78	642,98

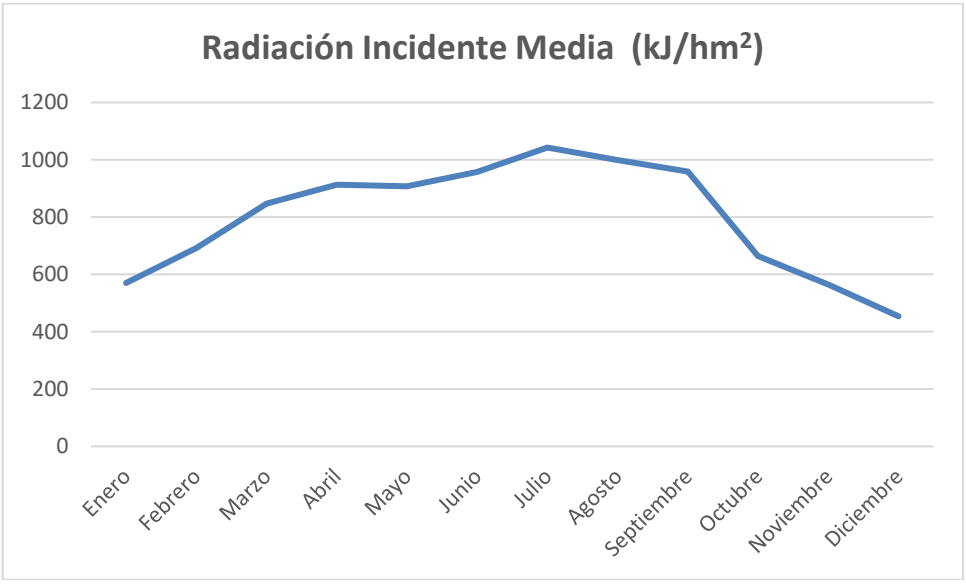


Figura 3-12 Radiación incidente media en León

En León, al igual que en Burgos, lo resultados obtenidos durante el verano son elevados puesto que las células fotovoltaicas están trabajando a una temperatura adecuada. Se puede apreciar que durante el mes de julio se obtiene el pico de producción tanto eléctrica como térmica.

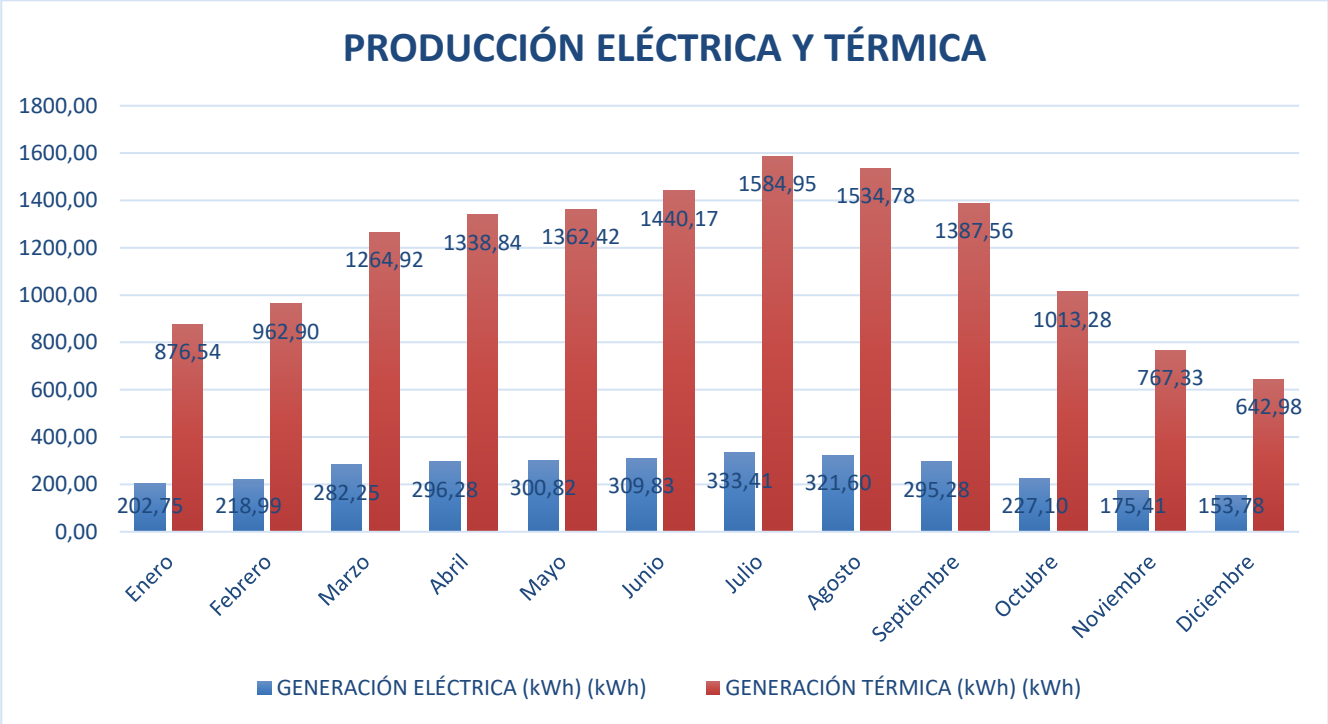


Figura 3-13 Producción energética en León

3.8.4 Pontevedra

El clima de Pontevedra es templado y lluvioso. Por su ubicación a orillas de la ría de Pontevedra, presenta ciertas particularidades. Influyen considerablemente los vientos provenientes del Atlántico y los macizos montañosos que rodean la ciudad. Las temperaturas generalmente son moderadas a lo largo de todo el año, obteniendo una media anual de 15ºC, y el registro de amplitudes térmicas es muy reducido debido a la influencia marítima. Los meses en los cuales se registran mayor radiación solar, y por lo tanto más calor son los de junio, julio y agosto, registrándose una temperatura media de 19 – 20ºC. En invierno la radiación solar disminuye al menos un tercio de la registrada en los meses de verano, y con ella la temperatura, siendo la media de 8ºC.

En la tabla 3-17 se muestran los datos obtenidos en la simulación.

Tabla 3-17 Datos obtenidos en Pontevedra

PONTEVEDRA	RADIACION INCIDENTE (kJ/hm²)	GENERACIÓN ELÉCTRICA (kWh)	GENERACIÓN TÉRMICA (kWh)
	kJ/hm²	kWh	kWh
Enero	470,07	164,5687798	710,3596513
Febrero	537,33	170,69441	734,4653466
Marzo	655,93	223,1235386	979,4939587
Abril	764,77	249,8812722	1113,886388
Mayo	784,73	270,4184791	1200,920642
Junio	895,78	295,7259989	1351,697979
Julio	902,22	292,3314289	1350,532221
Agosto	891,52	287,0468988	1331,479076
Septiembre	849,30	267,2241908	1243,82467
Octubre	598,17	205,6145212	908,0797031
Noviembre	500,03	162,2687174	706,2575377
Diciembre	371,81	121,2831278	513,7341606

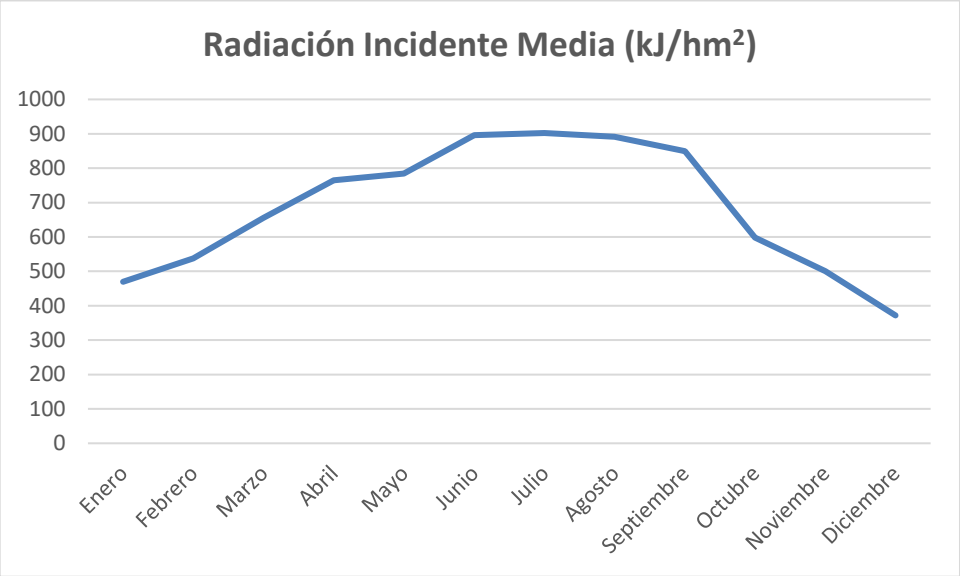


Figura 3-14 Radiación incidente media en Pontevedra

En Pontevedra nubosidad es abundante durante los meses invernales y en otoño. Es por ello que se puede observar la gran diferencia de generación energética entre los meses de verano y primavera comparados con enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre. Se obtienen los picos de generación eléctrica y térmica durante el mes de junio con un valor de 295,73 kWh y 1351,70 kWh respectivamente.

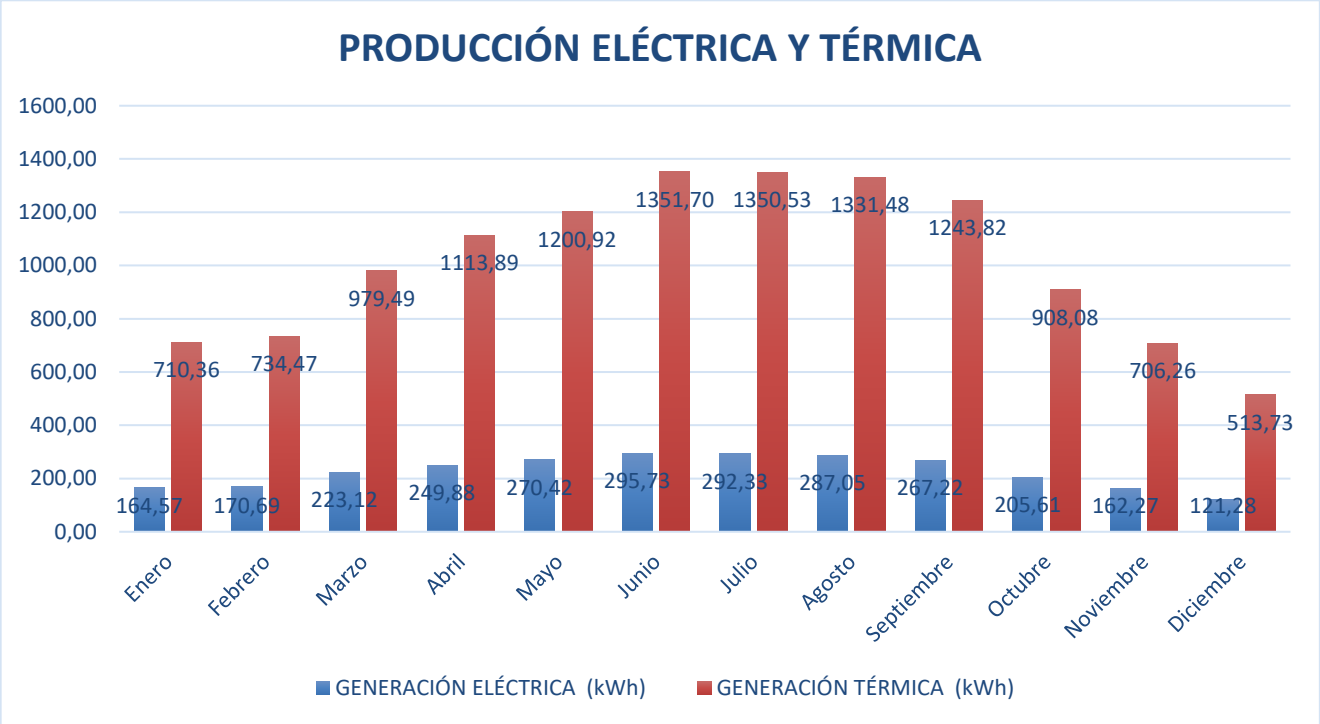


Figura 3-15 Producción energética en Pontevedra

3.8.5 Bagdad

El clima de Bagdad es desértico considerado BWh en la escala de Köppen. La temperatura media anual se encuentra a 22,6ºC. Julio es el mes más caluroso con una temperatura media de 34,2ºC y enero el más frío con una media de 10ºC. En la tabla 3-18 se detallan los datos obtenidos de TRNSYS en Bagdad.

Tabla 3-18 Datos obtenidos en Bagdad

BAGDAD	RADIACION INCIDENTE	GENERACIÓN ELÉCTRICA	GENERACIÓN TÉRMICA
	kJ/h.m²	kWh	kWh
Enero	539,78	189,00	807,60
Febrero	663,64	204,35	902,17
Marzo	746,90	249,86	1115,28
Abril	678,50	225,44	998,03
Mayo	732,28	243,40	1113,15
Junio	815,38	261,05	1230,58
Julio	760,29	245,13	1162,21
Agosto	772,49	244,94	1169,05
Septiembre	802,52	251,29	1200,55
Octubre	657,51	215,60	980,76
Noviembre	577,11	196,96	866,70
Diciembre	522,55	166,09	716,46

Como se aprecia en la gráfica siguiente, los niveles de radiación solar varían con patrones poco habituales.

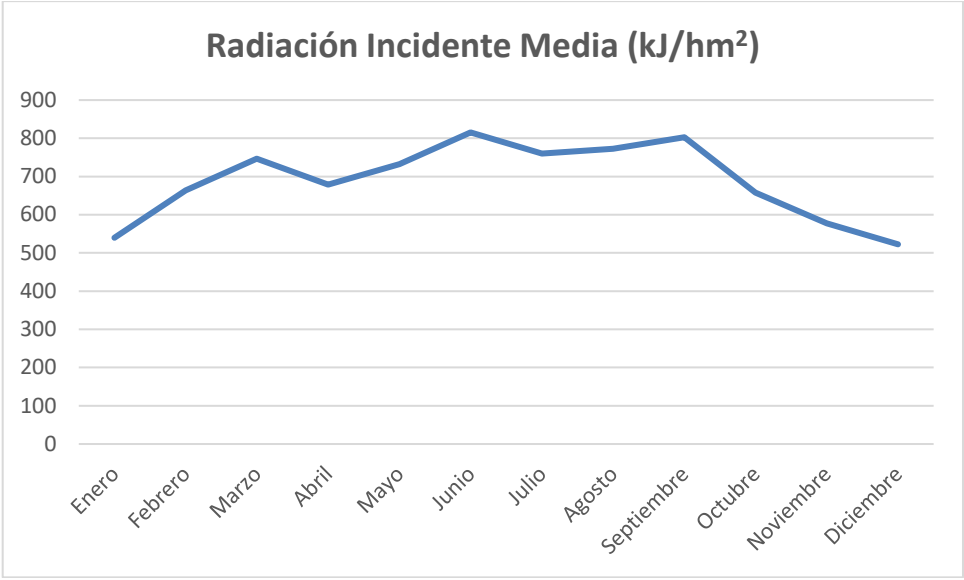


Figura 3-16 Radiación incidente media en Bagdad

La diferencia de producción energética entre los distintos no es muy elevada puesto que la radiación solar y la temperatura no varían tanto en verano e invierno. En Junio es cuando la producción eléctrica y térmica es mayor. En julio y agosto esto no es así ya que la eficiencia de la célula fotovoltaica disminuye con la temperatura. En Bagdad disminuye aproximadamente un 7% su eficiencia con respecto a la producción energética a 30ºC.

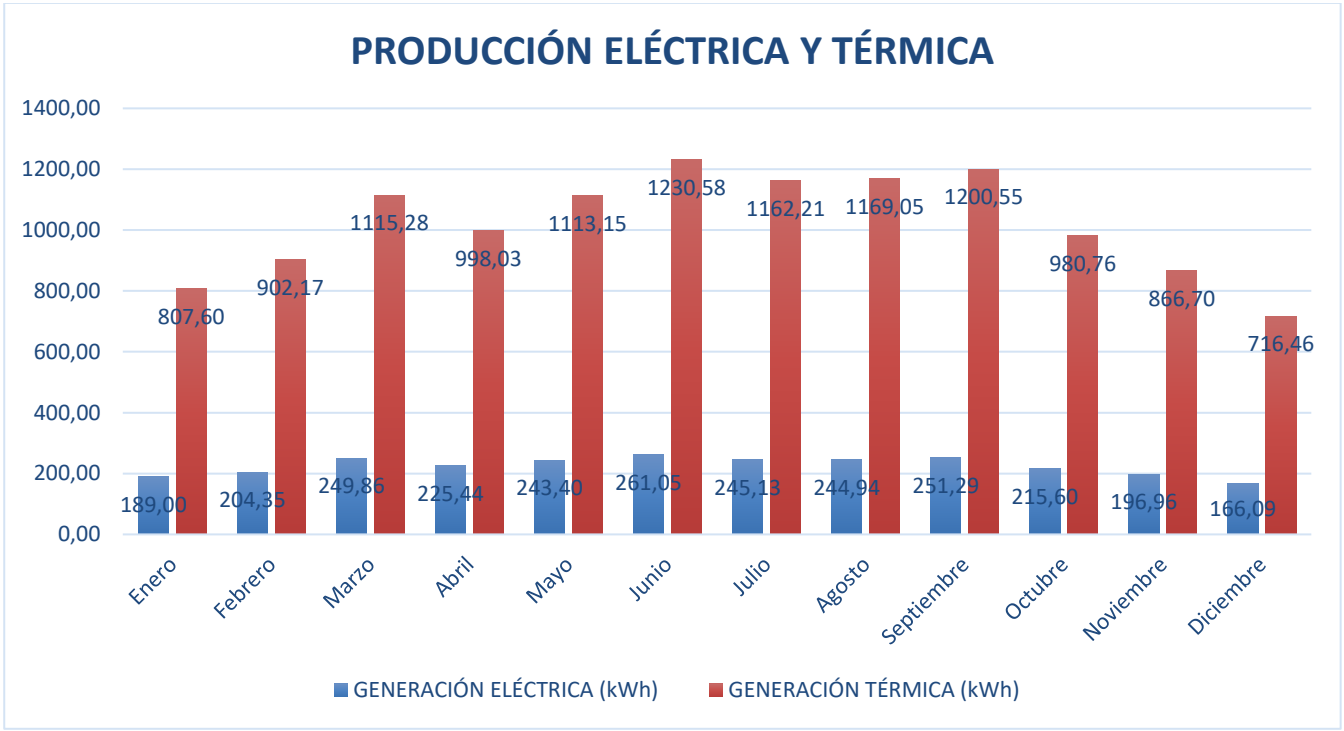


Figura 3-17 Producción energética en Bagdad

3.9 Comparación de los resultados

3.9.1 Producción eléctrica

En la siguiente figura se observa la cantidad mensual de energía eléctrica que produce el panel PV/T en cada uno de los lugares propuestos. Inicialmente, la lógica lleva a pensar que la producción de energía en Almería y Bagdad será mayor que en el resto de ciudades propuestas. Sin embargo, esto no es así en todos los meses, como se puede apreciar en la figura siguiente:

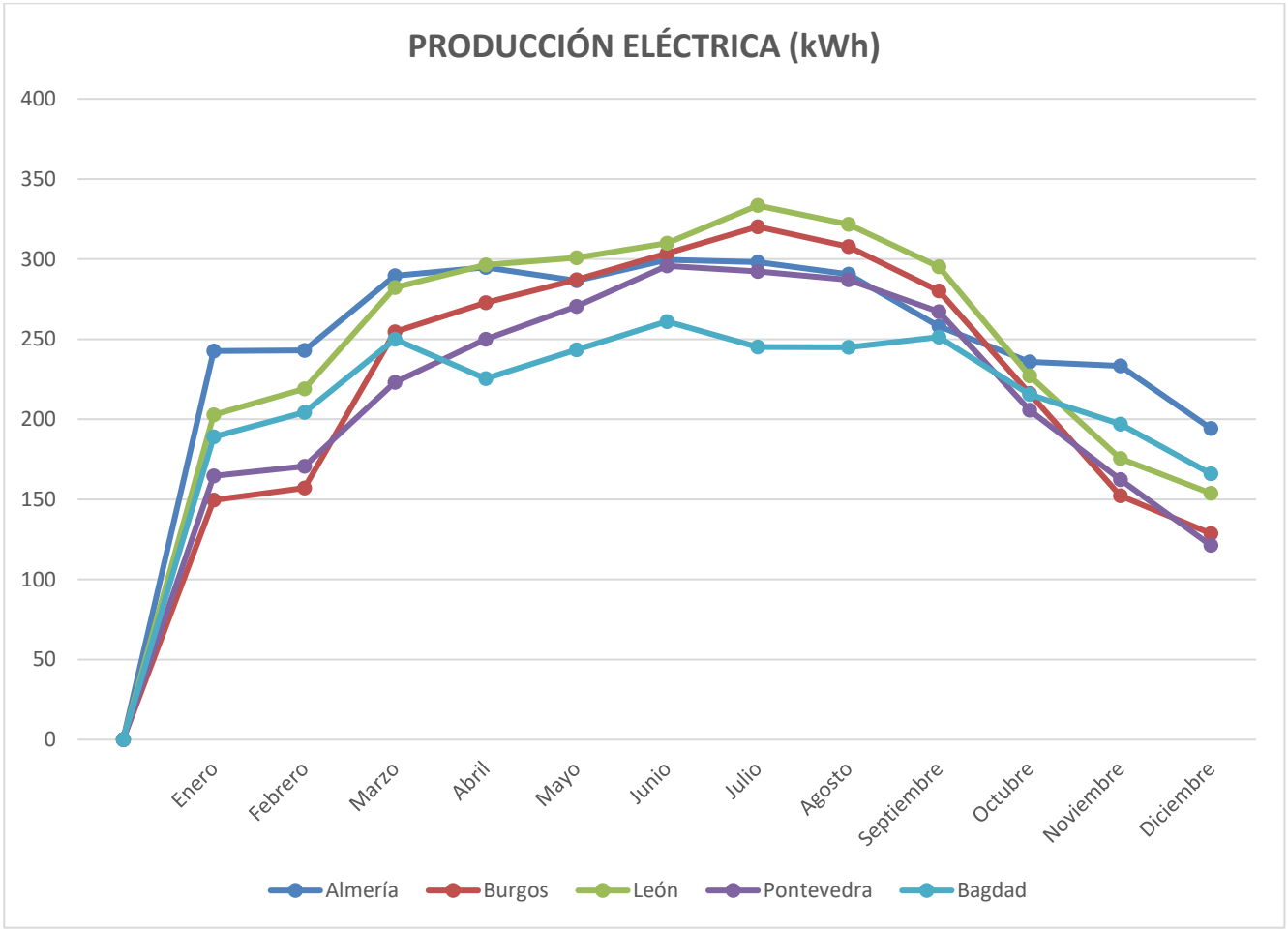


Figura 3-18 Producción eléctrica de todos los lugares propuestos

En la figura 3-18 se observa que la producción eléctrica en Bagdad y Almería tiende a ser mayor durante los meses de enero y febrero. Sin embargo, esta tendencia cambia en los meses desde marzo hasta noviembre, lo cual resulta chocante. Esto tiene una razón lógica. La temperatura de las células fotovoltaicas en estos dos lugares es demasiado elevada durante los meses de mayor radiación solar incidente, por o tanto el rendimiento del panel disminuye considerablemente. Este efecto se puede apreciar en la siguiente figura:

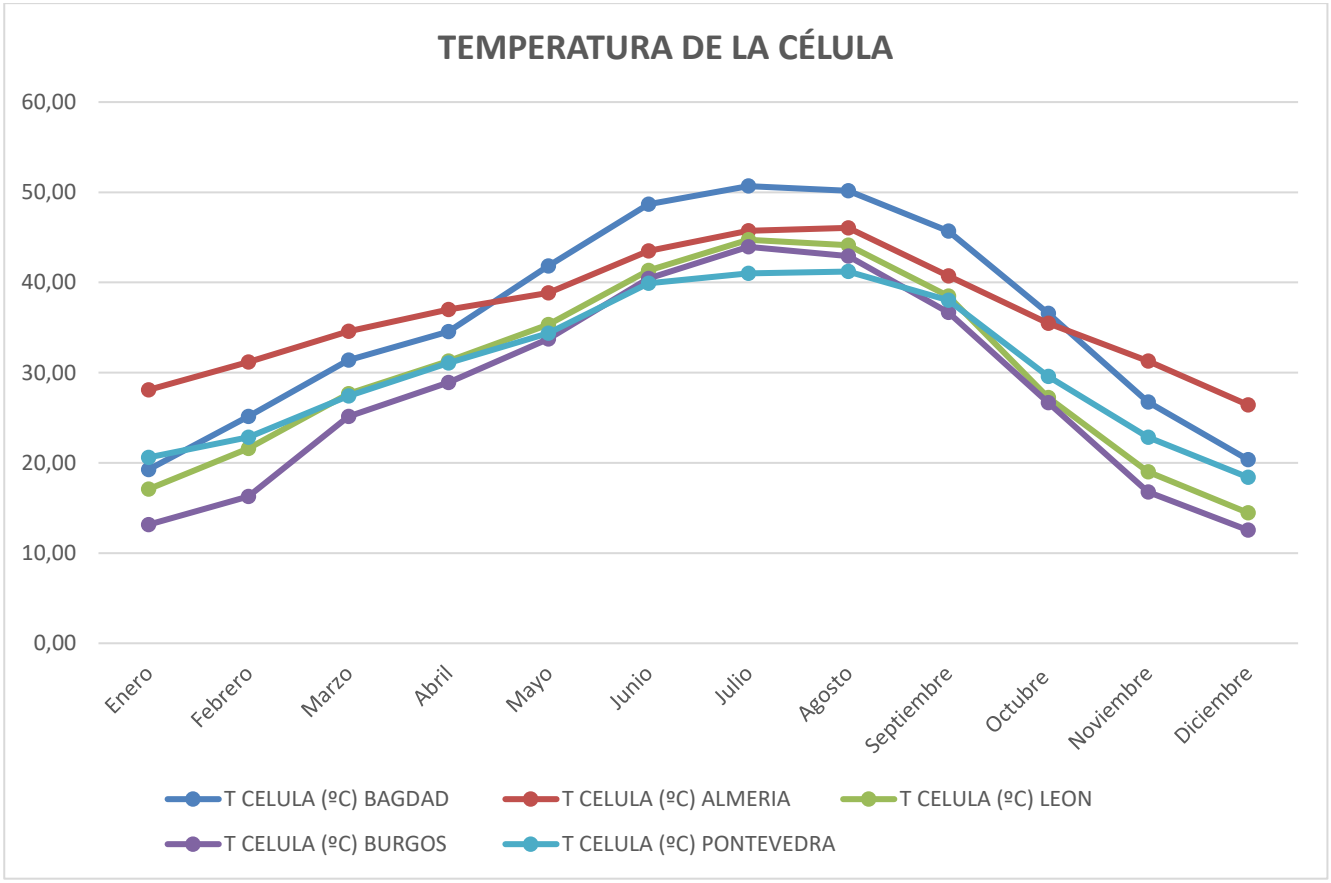


Figura 3-19 Temperatura de la célula fotovoltaica

Se observa que en julio y agosto, la temperatura de la célula alcanza temperaturas muy elevadas, llegando en Bagdad a picos de hasta 50ºC y en Almería de 47 ºC, mientras que en Pontevedra apenas supera un pico de temperatura de 40ºC y en León y Burgos alcanzándose los 45ºC.

La temperatura de la célula tiene un efecto considerable sobre el valor de tensión en circuito abierto. Esto se puede ver en la siguiente figura sobre la curva I-V. Por lo tanto, al aumentar la temperatura, la tensión de circuito abierto disminuye alguno milivoltios por cada grado centígrado que aumenta la temperatura (para el silicio 2,3mV/ºC).

Debido a esta variación de Voc, a medida que aumenta la temperatura, la eficiencia de la célula disminuye aproximadamente entre un 0,4 y 0,5% por ºC. [24]

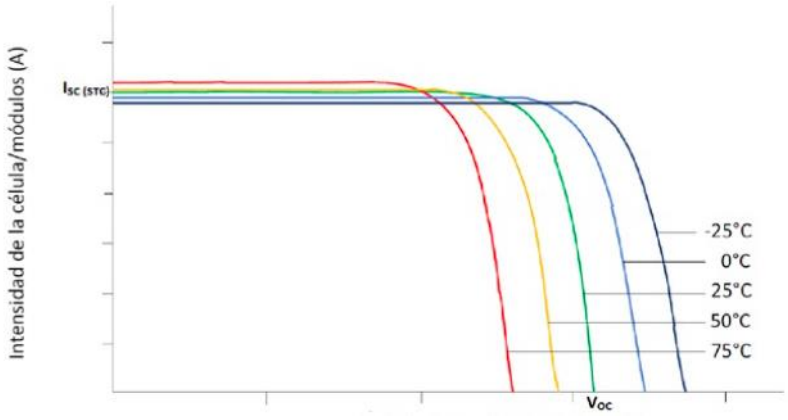


Figura 3-20 Voltaje de la célula/módulos (V) [24]

El voltaje del circuito abierto de una célula depende únicamente de la temperatura de esta, y su temperatura de trabajo depende de la irradiancia y de la temperatura ambiente.

Por lo tanto, a temperatura de aproximadamente 45ºC, la eficiencia de las células fotovoltaicas disminuirá en un 4 – 5% con respecto a temperaturas de 10ºC menos.

3.10 Comparación de los datos con los obtenidos en la instalación real

A continuación se muestra una tabla en la que se pueden comparar los resultados obtenidos en la simulación para un día de agosto, y los que se recogieron el 11 de agosto de 2011 en la instalación real en Burgos, en concreto a las 12:00, las 13:00, las 14:00 y las 15:00. En los simulación, no se puede especificar un día en concreto pues hace una media de cada día específico a cada hora desde que se tienen registros. Aún así la estimación realizada en la simulación es bastante fiable.

Tabla 3-19 Comparación de los resultados reales y simulados en Burgos

Hora	P. Térmica Real	P. Térmica Simulada	P. Eléctrica Real	P. Eléctrica Simulada
	W	W	W	W
12:00	593,53	592,71	159,25	165,62
13:00	709,39	663,49	175,37	178,60
14:00	709,39	669,73	178,82	178,63
15:00	709,39	648,28	175,56	173,68

Como se puede apreciar en la tabla anterior, los datos obtenidos se acercan mucho al valor obtenido en el modelo real, por lo tanto se puede concluir que la herramienta utilizada, TRNSYS es útil para estudiar este tipo de instalaciones.

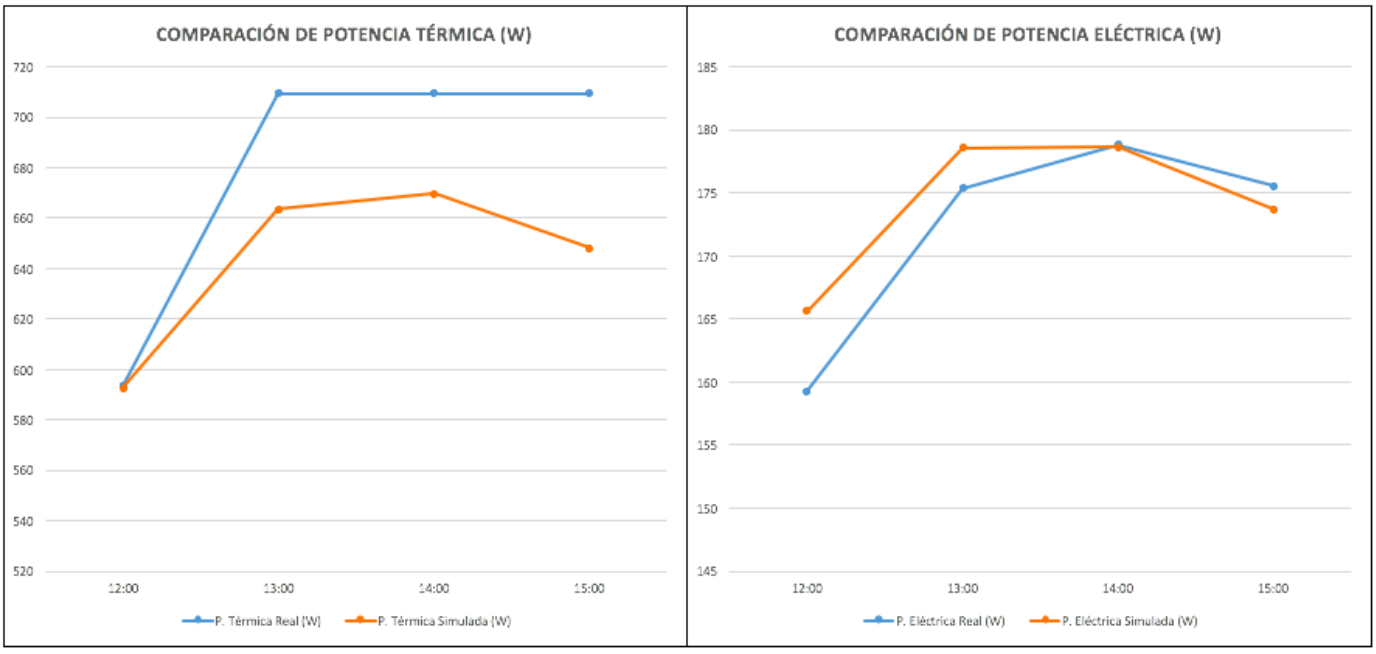


Figura 3-21 Comparación de potencia eléctrica y térmica en Burgos

En la figura 3-21 se puede ver la pequeña diferencia que hay en potencia entre los datos reales y los obtenidos en la simulación, obteniéndose una media de un 6% de diferencia entre ambas.

A continuación se exponen dos gráficos con los datos de radiación incidente media en las localidades propuestas, desde dos fuentes distintas, la primera METEONORM desde la cual se obtuvieron los datos climáticos para la realización de este trabajo, y la segunda de AEMET. Estos gráficos se muestran con el fin de explicar la inexactitud de los datos utilizados provenientes de METEONORM, pues no obtiene los datos de una estación meteorológica in situ, sino que realiza una interpolación entre las distintas estaciones de que dispone.

Figura 3-22 Comparación radiación incidente media mensual AEMET/METEONORM

En la figura se puede observar que los datos se asemejan entre ellos principalmente durante los meses de verano, junio, julio y agosto, habiendo una diferencia de aproximadamente ±15% mientras que en los meses de diciembre, enero y febrero la diferencia es mayor, de aproximadamente ±30%.

Esta evidente diferencia entre los datos de las dos fuentes se debe, principalmente, a la forma de calcularlos utilizada por METEONORM. METEONORM es una base de datos que contiene datos climatológicos de aproximadamente 1000 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el mundo. Contiene un programa de cálculo de parámetros climáticos. Su finalidad principal es la de calcular la radiación solar incidente sobre planos que están orientados arbitrariamente y en cualquier localización geográfica. La radiación solar global mensual (dato representado en la figura 3-22) se obtiene mediante la interpolación entre dos estaciones, las cuales pueden estar muy separadas entre ellas, por tanto los datos pueden llegar a ser bastante imprecisos, y este error aumenta a medida que se está más lejos de las estaciones de referencia o si existen accidentes geográficos que modifiquen el clima del lugar. [25] AEMET, en cambio, utiliza la combinación de una serie de algoritmos de probada precisión y datos climatológicos satelitales para la creación de su base de datos.

En la figura 3-23 se muestra la distribución de estaciones meteorológicas utilizada por METEONORM. En verde se muestran las estaciones que ofrecen datos de irradiancia globales, y en azul los que no.

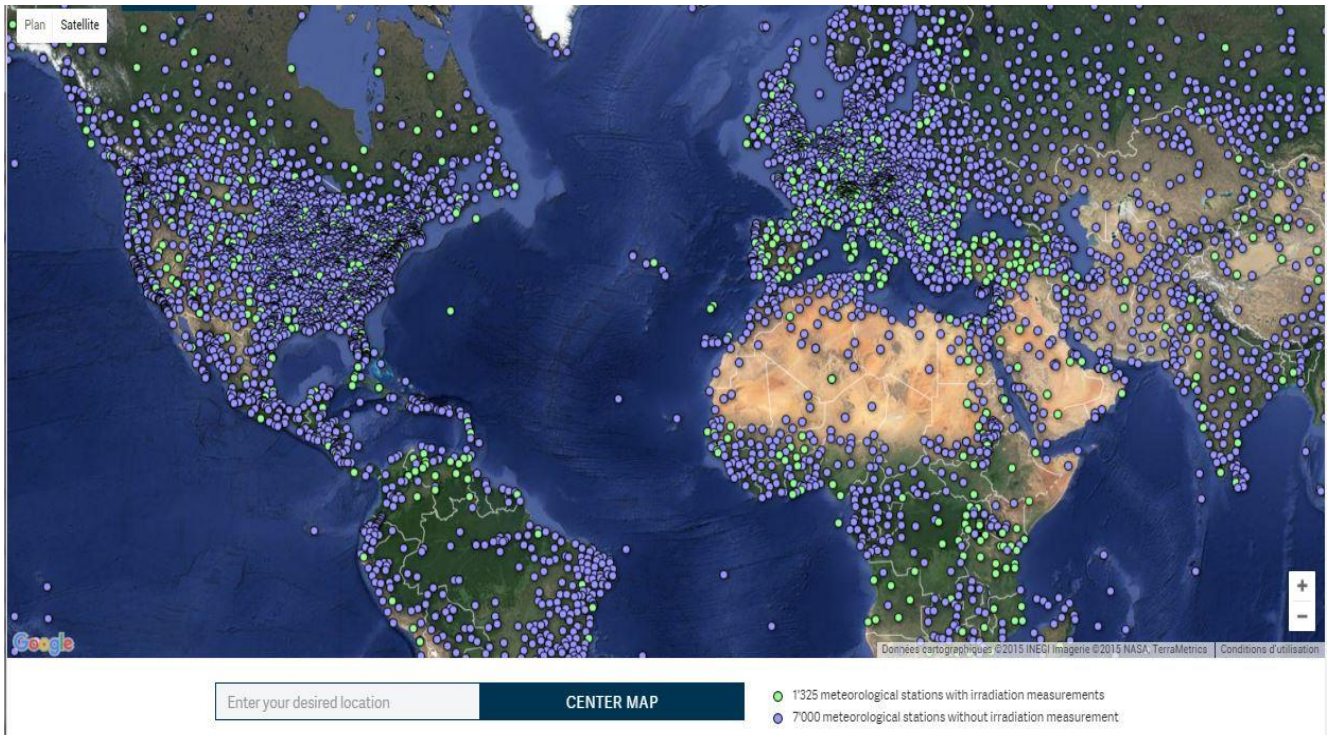


Figura 3-23 Distribución de estaciones meteorológicas de METEONORM

Como se puede apreciar en la figura 3-23, el número de estaciones meteorológicas en la zona oriental, cercana a Bagdad, son mucho menores y mucho más espaciadas que las que se encuentran en España. Es por ello que los datos obtenidos en Bagdad son de inferior valor y menos precisos que los obtenidos en las localidades peninsulares propuestas.

3.11 Estudio de viabilidad de uso de un panel PV/T en campamento en el Teleno

El campamento de IM llevado a cabo por la Compañía de alumnos de la ENM en el Teleno tiene una duración de una semana. Está situado al pie del monte Teleno, en la provincia de León. El campamento tiene lugar durante el mes de marzo, por lo que se utilizarán los datos de este mes ofrecidos por la simulación. La demanda energética del campamento se expuso en el punto 4.4. En la siguiente tabla se indica la demanda energética del campamento y la cantidad de energía que es capaz de proporcionar el panel en ese periodo de tiempo:

Tabla 3-20 Datos registrados

Consumo eléctrico	Consumo térmico	Generación eléctrica	Generación térmica
kWh/semana	kWh/semana	kWh/semana	kWh/semana
26,97	1123,38	70,56	316,23

Como se aprecia en la tabla anterior, la cantidad de energía térmica generada por el panel en una sola semana no es suficiente para satisfacer la demanda existente. Por lo tanto, sería necesario instalar un total de cuatro paneles solares para conseguir la cantidad de energía necesaria, lo cual no es factible puesto que el coste inicial de cada instalación es de 13330,00 €. El tiempo de amortización superaría con creces el límite de 25 años de vida útil que tiene el panel.

3.12 Posibilidad de instalación de un sistema de paneles PV/T en una base permanente en Bagdad

Según el perfil de uso y consumo de cada uno de los equipos individuales y colectivos estudiados en el punto 4.4, el consumo diario total de una base avanzada permanente, para un supuesto despliegue en la capital iraquí de Bagdad es el que se muestra en la tabla 3-21.

Tabla 3-21 Consumo total base permanente

	CONSUMO (kWh/día)
Total equipos individuales	3,98
Total equipos colectivos	1992
TOTAL	1995,98

Un único panel PV/T, con las condiciones climáticas de Bagdad, es capaz de proporcionar una cantidad media de energía de 34,06 kWh. Una cantidad minúscula en comparación con la cantidad total que debe proporcionar. Por lo tanto, para satisfacer la demanda energética diaria de un campamento permanente se necesitaría instalar al menos 61 paneles solares de las características del panel objeto de estudio en el proyecto.

3.13 Amortización de la instalación para campamentos no permanentes

Para calcular si la instalación de paneles PV/T en campamentos de Infantería de Marina sería rentable, se ha calculado el tiempo en que se recuperará la inversión realizada en la instalación y su mantenimiento hasta obtener un ahorro significativo con respecto al sistema utilizado actualmente (generador). Así mismo, al tratarse de un sistema PV/T, se produce ACS para el campamento, por lo que se estudiará la rentabilidad de la instalación desde un punto de visto térmico, con respecto al modo de funcionamiento que tiene actualmente mediante bombonas de propano.

Para el estudio de la amortización, se determinará el Valor Actual Neto (VAN), el cual consiste en un balance de gastos e ingresos en el que se tiene en cuenta la inflación y los intereses de un hipotético

préstamo para hacer frente a la inversión. El estudio se realizará en dos partes. La primera se realizará desde un punto de vista eléctrico, y la segundo desde el punto de vista térmico para la producción de ACS y para cocinar.

$$VAN = -I_0 + \sum_n \frac{Ahorros}{(1+i)^n} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+i)} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + \ ... + \frac{F_n}{(1+i)^n}$$

Donde:

- I_0 es la inversión inicial. $I_0 = 13330{,}50€$
- Ahorros es la diferencia negativa de gasto en los últimos 25 años gracias a la instalación.
- n es el número de años para amortizar la inversión.
- i es el "real discount rate", que tiene en cuenta la inflación y por lo tanto permite actualizar el valor actual de los costes. i=2,5%
- F es el flujo de caja, es decir, el ahorro (A).

Para calcular en cuántos años se amortizaría la inversión, bastaría con despejar n y se obtendrían el número de años para amortizarlo. Esto no se puede realizar en este caso, por lo que se realizará una iteración hasta que el valor obtenido sea positivo.

Para un estudio adecuado de los parámetros económicos, es necesario definir lo que se considera como coste y como ahorro:

- Costes: Incluyen la inversión inicial de la instalación (pág. 42), y los costes de mantenimiento y operación que se contabilizan anualmente.
- Ahorros: Es la diferencia de coste entre la instalación, mantenimiento y operación del generador actual utilizado en un campamento de Infantería de Marina, y aquel procedente de la instalación de paneles PV/T y su operación para obtener las mismas prestaciones.

El "real discount rate" o i se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$i = \frac{(1+i_n)}{(1+i_f)} - 1$$

Donde:

- i_n es el interés correspondiente al préstamo destinado a hacer frente a los gastos. En el caso bajo estudio se consideró como 0.
- i_f es el valor de inflación del país.

Para calcular el tiempo que se tardaría en recuperar el gasto realizado, es necesario conocer el ahorro anual que supone la utilización de la energía solar. Se ha considerado que se realizan maniobras de una semana dos veces al mes, es decir, se utilizaría el panel solar durante dos semanas al mes. Los datos utilizados para el cálculo son los siguientes:

Tabla 3-22 Demanda eléctrica campamento IM

Mes	Días	Demanda Energética (kWh/semana)	Demanda Energética (kWh/mes)	Energía Solar (kWh/mes)
Enero	31	31,17	62,34	101.38
Febrero	28	31,17	62,34	109,49
Marzo	31	31,17	62,34	141,125
Abril	30	31,17	62,34	148,14
Mayo	31	31,17	62,34	150,41
Junio	30	31,17	62,34	154,90
Julio	31	31,17	62,34	166,71
Agosto	31	31,17	62,34	160,80
Septiembre	30	31,17	62,34	147,64
Octubre	31	31,17	62,34	113,55
Noviembre	30	31,17	62,34	87,705
Diciembre	31	31,17	62,34	76,89
Total al año				1558,74

Para calcular el VAN es necesario tener en cuenta el valor de ahorro anual, tanto de energía eléctrica como de energía térmica:

$$A = cQ_{ahorrada}$$

Donde:

- Q ahorrada es la energía ahorrada por la instalación en un año
- C es el coste del calor: $c = c' \frac{1}{\frac{PCI}{PCS}\eta}$

Siendo:

- c' el coste unitario del combustible
- $\frac{PCI}{PCS}$ el cociente del poder calorífico inferior entre el superior del combustible.
- η el rendimiento de la conversión de energía útil.

Tabla 3-23 Precio de los combustibles más comunes para el año 2017 [26]

Con impuestos (*)		
Tipo	€/l	c€/kWh
Gasolina 95	1,116	12,51
Gasóleo A	0,978	9,84
Gasóleo C	0,521	4,85
Gas Licuado Petróleo (motor)	0,570	8,64
	€/t	c€/kWh
Fuelóleo	278,49	2,61

Como puede apreciarse en la tabla 3-23, el precio de la Gasolina 95 (combustible que utiliza el generador del campamento) es de 9,84 c€/kWh actualmente en España. Destacar que este valor variará considerablemente en lugar donde pueden existir despliegues de Infantería de Marina como pueden ser Irak o Afganistán.

El poder calorífico $\frac{PCI}{PCS}$ ronda el valor de 0,9.
El generador utilizado actualmente tiene un rendimiento del 85%.
Por lo tanto, el coste será:

$$C=12,88 \text{ c€/kWh}$$

Por tanto, teniendo en cuenta únicamente la energía eléctrica, se obtiene un ahorro anual de:

$$A_e=200,50 \text{ €/año}$$

Para el cálculo del ahorro teniendo en cuenta la energía térmica generada, se calculó la cantidad de gas propano que se utiliza en una semana de campamento y se realizó una estimación para todo el año. Para realizar los cálculos se consideró de nuevo que se realizan maniobras durante dos semanas al mes. En los campamentos habituales realizados por unidades de Infantería de Marina, se utilizan bombonas de 11 kg de gas propano.

Tabla 3-24 Precio de una bombona de gas propano

DENOMINACIÓN	PRECIO (Euros)	PRECIO INFORMATIVO (Pts)
BOMBONA DOMESTICA BUTANO (12.5 KG.)	12,89	2145
BOMBONA DOMESTICA PROPANO (11 KG.)	11,34	1887
BOMBONA INDUSTRIAL PROPANO (35 KG.)	57,50	9567

Para satisfacer las necesidades de energía térmica de un campamento típico de IM (periodo de una semana) se necesitan 106 kg de gas propano, es decir, 1419,34 kWh puesto que 1 kg de gas propano equivale a 13,39 kWh. Por lo tanto se puede calcular la demanda térmica para todo un año:

Tabla 3-25 Demanda térmica de campamento IM

Mes	Días	Demanda Térmica (kWh/semana)	Demanda Térmica (kWh/mes)	Energía Térmica (kWh/mes)
Enero	31	1123,38	2246,76	438,27
Febrero	28	1123,38	2246,76	481,45
Marzo	31	1123,38	2246,76	632,46
Abril	30	1123,38	2246,76	669,42
Mayo	31	1123,38	2246,76	681,21
Junio	30	1123,38	2246,76	720,08
Julio	31	1123,38	2246,76	792,48
Agosto	31	1123,38	2246,76	767,39
Septiembre	30	1123,38	2246,76	693,78
Octubre	31	1123,38	2246,76	506,64
Noviembre	30	1123,38	2246,76	383,66
Diciembre	31	1123,38	2246,76	321,49
Total al año				7088,33

Como se puede apreciar en la tabla 3-25, la cantidad de energía térmica proporcionada por una única placa solar no sería suficiente para satisfacer la demanda térmica mensual, por lo tanto sería necesario instalar tres paneles PV/T más, lo cual incrementaría considerablemente la inversión inicial a realizar.

El coste unitario del gas propano es de 7,70 c€/kWh.
El coste de mantenimiento anual es de 36€, es mínimo comparado con la inversión inicial por lo que no se ha tenido en cuenta. [27]
El ahorro anual en energía térmica por cada panel solar será por lo tanto:

$$A_t = 545{,}74\ €$$

El ahorro total por tanto sería la suma del ahorro en energía eléctrica y el ahorro en energía térmica:

$$A_{tot} = A_e + A_t = 746{,}24$$

Sin embargo, al no poder satisfacer la demanda energética con un único panel PV/T, este valor será cuatriplicado, pero también lo será el de la inversión inicial, de forma que quedaría:

- $I_0 = 53322€$
- $A = 2984{,}96€$
- $i = 2{,}5\%$

A continuación se procede a calcular el valor actual neto VAN de forma iterativa hasta obtener el valor de "n", es decir, el número de años en que se amortizaría la inversión. Si no es amortizable en menos de 25 años, entonces no sería factible utilizar este tipo de instalaciones en campamentos de IM.

$$VAN = -I_0 + \sum_n \frac{Ahorros}{(1+i)^n} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+i)} + \frac{F_2}{(1+i)^2} + \ ... + \frac{F_n}{(1+i)^n}$$

Por último, en la tabla siguiente se representa el ahorro que se establece cada año. En la columna de beneficio acumulado llega un año en el que el valor obtenido es positivo. Este año es en el que se amortizaría la inversión.

Tabla 3-26 Beneficio anual acumulado cuatro paneles

Año	Beneficio acumulado
0	-53322,00
1	-50409,84
2	-47568,72
3	-44796,88
4	-42092,66
5	-39454,39
6	-36880,47
7	-34369,32
8	-31919,43
9	-29529,29
10	-27197,44
11	-24922,47
12	-22702,98
13	-20537,63
14	-18425,09
15	-16364,08
16	-14353,34
17	-12391,64
18	-10477,78
19	-8610,61
20	-6788,97
21	-5011,77
22	-3277,91
23	-1586,34
24	63,97
25	1674,03

El periodo de amortización obtenido para este caso es de 24 años, a partir del cual solo se obtienen beneficios. La vida útil de este panel es de 25 años, por lo que es cuestionable la rentabilidad de la inversión.

Se estudió la posibilidad de satisfacer únicamente una parte de la demanda energética del campamento, instalando dos paneles en lugar de cuatro, pero el tiempo de amortización de la inversión sigue siendo de 24 años.

Tabla 3-27 Beneficio anual acumulado dos paneles

Año	Beneficio acumulado
0	-2661,00
1	-25204,92
2	-23784,36
3	-22398,44
4	-21046,33
5	-19727,19
6	-18440,23
7	-17184,66
8	-15959,71
9	-14764,64
10	-13598,72
11	-12461,23
12	-11351,49
13	-10268,82
14	-9212,55
15	-8182,04
16	-7176,67
17	-6195,82
18	-5238,89
19	-4305,30
20	-3394,49
21	-2505,88
22	-1638,96
23	-793,17
24	31,98
25	837,01

4 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones

El sistema combinado PV/T para la generación de energía es capaz de proporcionar tanto electricidad como agua caliente en un único modelo integrado y más eficiente. Se describió una simulación TRNSYS basada en un modelo físico para determinar los parámetros de entrada. Una vez introducidos los parámetros e inputs en los distintos elementos de la simulación se procedió a ejecutar la simulación. Esta simulación se realizó con datos de Almería, León, Burgos, Pontevedra y Bagdad. Se realizó una comparación de la generación eléctrica y térmica producida por el panel PV/T en cada una de las localizaciones propuestas, concluyéndose que el lugar más adecuado para instalar el sistema propuesto es en León. Esto generó gran sorpresa puesto que inicialmente se esperaba que se obtuviese mayor producción energética en Almería o Bagdad. Del estudio del sistema se dedujo que el rendimiento de la instalación se reducía en un 7% en Bagdad y un 5% en Almería durante los meses más calurosos con respecto a una temperatura de referencia de 25ºC, principalmente debido a las elevadas temperaturas que alcanzaban las células. Por otro lado, la instalación real fue modelada de forma que se obtuviesen las mejores prestaciones en Burgos y por ende en León, por lo tanto el resultado obtenido tiene sentido.

En cuanto a los resultados obtenidos en la simulación con respecto a la instalación real en Burgos, se concluyó que TRNSYS es una herramienta fiable y útil para el estudio del funcionamiento de estos sistemas. Se observó una diferencia media en los resultados de un 6%. La comparación se realizó solo para cuatro horas de un día en concreto, por lo que la conclusión extraída no será constante a lo largo del tiempo.

Los datos de radiación solar incidente media por mes se obtuvieron de METEONORM, lo que puede ser una fuente de error, debido al método que utiliza para calcular los datos climáticos. Este sistema realiza una simple interpolación entre las estaciones meteorológicas con las que cuenta, sin tener en cuenta factores geográficos. Por lo tanto, los resultados obtenidos son una estimación de lo que ocurriría realmente. En la zona cercana a Bagdad, el número de estaciones meteorológicas es mucho más reducido que en España. Por lo tanto los datos de radiación incidente de Bagdad utilizados son menos precisos que los utilizados para las localidades de la Península Ibérica.

Posteriormente se estudió la posibilidad de instalar un sistema de estas características en campamentos de Infantería de Marina mediante la realización de un estudio económico. El número de paneles solares que habría que instalar en un campamento no permanente, como puede ser el realizado por la Compañía de Alumnos de la ENM en el Teleno, resultó ser demasiado elevado, pues se necesitaban un total de cuatro paneles para satisfacer tanto la demanda eléctrica como térmica. Hay que tener en cuenta que el estudio se realizó suponiendo un uso de dos semanas mensuales del panel, ya que actualmente es el periodo medio que se destina a maniobras en unidades de IM. Las mediciones reales

se realizaron únicamente en un periodo de una semana, por lo tanto los cálculos son estimados. La inversión inicial a realizar era demasiado elevada para obtener algún beneficio a medio plazo. El tiempo de amortización se calculó que sería de 24 años, lo cual no sería adecuado ya que la vida útil de este tipo de sistemas es de aproximadamente 25 años y por tanto los beneficios obtenidos de la utilización de esta tecnología serían mínimos.

En cuanto a la instalación de paneles solares PV/T en bases avanzadas permanentes, se estimó que habría que colocar 61 paneles para satisfacer las necesidades energéticas diarias. Destacar que en bases permanentes existe demanda de agua caliente sanitaria para uso en duchas, y no sólo para cocinar, como era el caso del campamento en el Teleno, por lo tanto la demanda térmica es mayor.

Por último, recalcar que los sistemas PV/T son una tecnología innovadora que mejora las prestaciones de los paneles PV convencionales, pero excesivamente cara en la actualidad. El precio oscila entre los 5000 y los 6000€ más que el de una instalación PV convencional, que actualmente cuesta en torno a los 8000€. [28]

4.2 Líneas futuras

A continuación se proponen posibles líneas futuras para mejorar el rendimiento de los paneles solares PV/T:

1. Estudiar formas de aprovechar la luz reflejada al suelo en las inmediaciones del panel solar, mediante la colocación de reflectores en las zonas circundantes a la instalación de forma que aumente la cantidad de radiación solar captada por el panel, sirviéndose de modelos matemáticos para evitar un sobrecalentamiento de la superficie de la placa.

2. Investigar en formas auxiliares de refrigeración de la superficie externa del panel, mediante la implementación de un sistema que inyecte un fluido sobre la superficie de la placa, de forma que limpie el polvo que pueda existir y disminuya la temperatura superficial de la placa de forma que aumente el rendimiento de la placa.

3. Implementación de sistemas que varíen su posición en función de la posición del Sol, de modo que capte la mayor radiación solar en todo momento.

4. Estudiar combinaciones distintas de colector, caudal de fluido calorportador y bombas, de forma que se maximicen las prestaciones de la instalación.

5. Diseñar un panel híbrido específico para Irak y zonas áridas en general, en el que las dimensiones de las células y demás características se adapten a las condiciones climáticas para obtener la mayor eficiencia.

6. Llevar a cabo el desarrollo del trabajo con mediciones más precisas de consumo, cambiando los métodos y obteniendo datos en tiempo real de la instalación real. A su vez utilizar datos climáticos reales en lugar de utilizar los proporcionados por METEONORM que se obtienen mediante interpolaciones que no son del todo precisas.

5 BIBLIOGRAFÍA

[1] J. P. R. Z. Blessy Joy, «Investigations on serpentine tube type solar photovoltaic/thermal collector with different heat transfer fluids: Experiment on numerical aanalysis,» 2016.

[2] M. M. Vallina, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, Madrid: Paraninfo, 2010.

[3] M. V. García, «elblogverde.com,» 22 06 2008. [En línea]. Available: http://elblogverde.com/efecto-invernadero-y-calentamiento-global/.

[4] IEA, «International Energy Agency,» 2015. [En línea]. Available: https://www.iea.org.

[5] A. Smets, Dirección, *EnergyX: Sustainable energy: Design a renewable future.* [Película]. 2016.

[6] A. Friedman, «http://www.astronoo.com/es/articulos/protuberancias-solares.html,» 30 3 2010. [En línea]. Available: http://www.astronoo.com/es/articulos/protuberancias-solares.html.

[7] P. R. Martínez, Energía Solar Térmica: Técnicas para su aprovechamiento, marcombo, 2010.

[8] Universidad de Jaén, «Tecnologías de las células solares,» 14 02 2002. [En línea]. Available: https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/images/tipos_cell.gif.

[9] H. Cotal, «III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics,» *Energy & Enviromental Science,* 03 06 2008.

[10] 3. G. S. P. -. T. film, «Top DIY solar panels research,» 2016. [En línea]. Available: http://topdiysolarpanels.com/3rd-generation-of-solar-panels-thin-film/.

[11] C. M. Rasero, *Máster profesional en Ingeniería y Gestión Mediambiental,* 2011.

[12] c. s. d. b. c. Perovskita, «fotoplat,» 09 09 2016. [En línea]. Available: http://fotoplat.org/2016/09/perovskita-celulas-solares-de-bajo-coste/.

[13] N. R. E. L. NREL, *Eficiencia de las distintas tecnologías usadas en las células solares,* 2015.

[14] T. 192, «ingemecanica,» 2014. [En línea]. Available: http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn192.html.

[15] M. R. Patel, Wind and Solar Power Systems, 2006.

[16] A. Soria, «Transformaciones Energéticas,» Madrid.

[17] J. L. Mendoza, «Control supervisorio difuso para un sistema híbrido de generación de energía,» 2004.

[18] M. Kaya, «Thermal and Electrical Performance Evaluation of PV/T Collectors in UAE,» Stockholm, 2013.

[19] C. A. Tristán, «Clasificación de los Paneles Solares Híbridos (PVT),» Burgos, 2016.

[20] Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecanica, «Analysis and application of combined photovoltaic/thermal (PV/T) flat-plate collectors for low-income residences in brazil,» Santa Catarina, 2016.

[21] M. d. P. G. Vera, «Validación de tecnología híbrida solar de placa plana para el suministro energético en edificios residenciales.,» 2013.

[22] AEMET, «AEMET,» 2016. [En línea]. Available: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=6325O&k=and.

[23] Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), «Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF del clima de EUMETSAT,» 2005.

[24] E. Collado, «Energias Renovables,» 13 julio 2015. [En línea]. Available: http://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/los-efectos-de-la-temperatura-en-la-20150713.

[25] E. Y. Alfredo Rapallini, «La utilización del programa METEONORM para generar la base de datos meteorológicos que requiere la adaptación del ENERGY-10 para Argentina,» Buenos Aires, 2000.

[26] I. d. p. e. C. y. carburantes, «IDAE,» 2016. [En línea]. Available: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Combustibles_y_carburantes_marzo_2016_317ab135.pdf.

[27] P. S. Ventureira, «Panel Solar Híbrido,» Burgos, 2012.

[28] M. A. Maehlum, «Energy Informative,» 23 Marzo 2015. [En línea]. Available: http://energyinformative.org/solar-panels-cost/.

[29] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: http://www.lamoncloa.gob.es. [Último acceso: 13 enero 2015].

[30] J. Rodríguez y V. Fernández, Cómo redactar el estado del arte de un trabajo, Editorial Genios, 2010.

[31] P. Martínez y A. García, Cómo escribir una buena memoria de TFG, Publicaciones del 2000, 2013.

[32] A. Pérez, Cómo escribir una bibliografía, Nuevas publicaciones.

[33]

ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS EN EL MODELO DE TRNSYS

A1- TIME DEPENDENT FORCING FUNCTION – TYPE14H

i- Parámetros

Nombre	Valor
Initial value of time	0
Initial value of time	0
Time at point	0
Value at point	1
Time at point	24
Value at point	1
Time at point	24

Tabla A1 Parámetros del type 14h

A2 – BOMBA – TYPE114

i- Parámetros

Nombre	Valor
Rated flow rate (kg/h)	853.2
Fluid specific heat (kJ/kgK)	3.723
Rated power (kJ/h)	2684.0
Motor heat loss fraction	0.0

Tabla A2 Parámetros del type 114

ii- Inputs

Nombre	Valor
Overall pump efficiency	0.6
Motor efficiency	0.9

Tabla A2-2 Inputs del type 114

A3 – COLECTOR PV/T – TYPE50A

i- Parámetros

Nombre	Valor
Collector área (m^2)	1.44
Collector fin efficiency	0.53
Fluid termal capacitance (kJ/kgK)	3.723
Collector plate absorptance	0.92
Collector loss coefficient	16
Cover transmittance	0.89
Temperature coefficient of solar cell efficiency	0.0032
Reference temperatura for cell efficiency (ºC)	25
Packing factor	1

Tabla A3 Parámetros del type50a

ii- Inputs

Nombre	Valor
Inlet fluid temperatura (ºC)	25
Fluid mass flow rate (kg/s)	0.237
Ambient temperatura (ºC)	20
Cell efficiency	0.11

Tabla A3-3 Inputs type50a

A4 – INTERCAMBIADOR DE CALOR – TYPE4G

i- Parámetros

Nombre	Valor
Specific heat of source side fluid (kJ/kgK)	3.723
Specific heat of load side fluid (kJ/kgK)	3.723
Number of shell passes	1

Tabla A4 Parámetros type4g

ii- Inputs

Nombre	Valor
Source side inlet temperature (ºC)	50
Source side flow rate (kg/h)	100
Load side inlet temp (ºC)	20
Overall heat transfer coefficient of exchanger (kJ/hK)	10

Tabla A4-1 Inputs type4g

ANEXO II: DISPOSICIÓN DE LOS PANELES EN EL TELENO

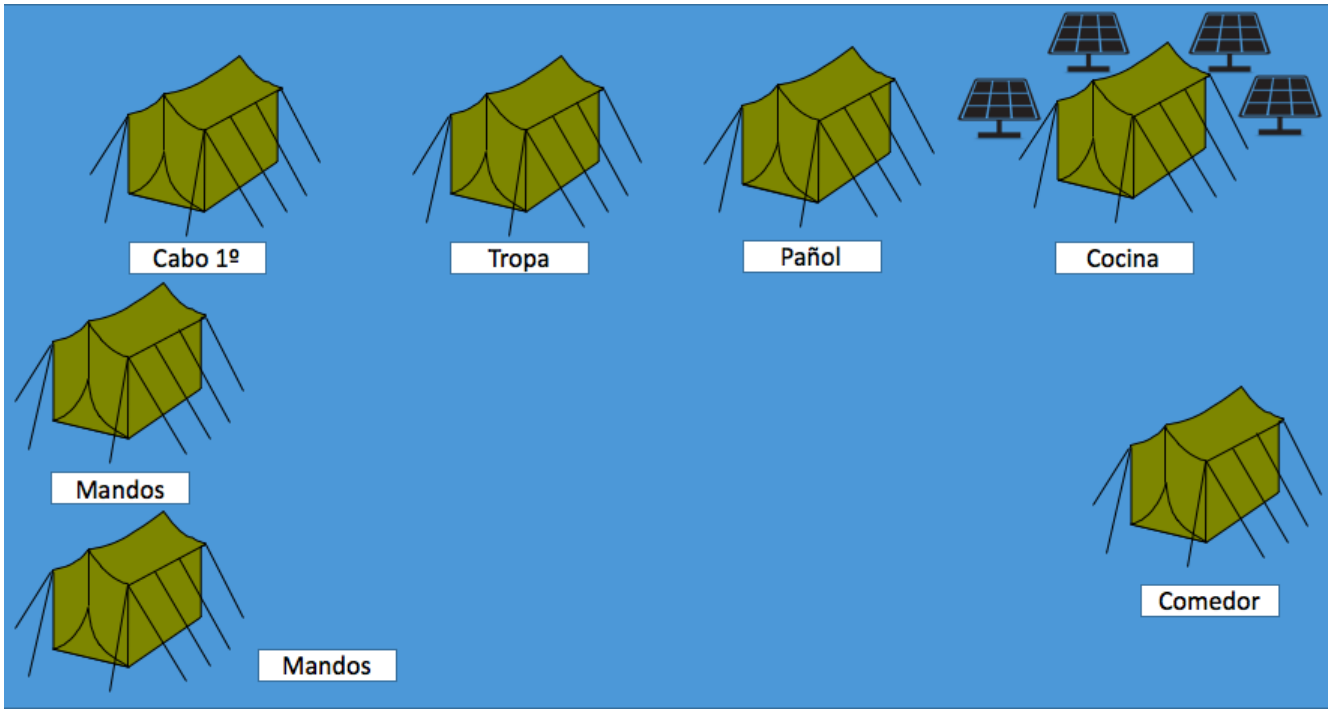


Figura 0-1 Diagrama grid del Teleno

Los paneles se colocarían a distancias menores de tres metros de la cocina, pues la demanda de energía térmica total del campamento es de la cocina.