

Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA PARA PROCESOS
INDUSTRIALES MEDIANTE ENERGÍA SOLAR
FOTOVOLTAICA**

Autor: Juan Pérez Peláez

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

**Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA PARA PROCESOS INDUSTRIALES MEDIANTE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Autor:
Juan Pérez Peláez

Tutor:
Francisco Javier Pino Lucena
Profesor Contratado Doctor

Grupo de Termotecnia. Departamento de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster: PRODUCCIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA PARA PROCESOS INDUSTRIALES MEDIANTE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Autor: Juan Pérez Peláez

Tutor: Francisco Javier Pino Lucena

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Me gustaría agradecer la realización de este Trabajo Fin de Máster a todos aquellos que me han apoyado a lo largo de estos dos años que he vivido y he estudiado en Sevilla, haciendo de esta etapa de mi vida una de mis mejores experiencias.

Por supuesto quiero agradecer por todo el apoyo incondicional y por estar siempre presente a mi familia, principalmente a mis padres, mi hermana y a mi novia.

Dentro del ámbito académico, agradecer a mi tutor Francisco Javier Pino Lucena, que me ha ido guiando en todos aquellos momentos que he tenido dificultades para avanzar.

Por último, agradecer a mis compañeros del Máster Universitario de Ingeniería Industrial, amigos y resto de mi familia, por hacer que todo sea más fácil.

Juan Pérez Peláez

Sevilla, 2019

Con este trabajo se ha intentado integrar la energía solar fotovoltaica en el sector industrial, ya que en ella tienen lugar numerosos procesos térmicos que implican temperaturas fácilmente alcanzables con la tecnología actual. El motivo que ha llevado a la realización de este estudio ha sido la caída de los precios de los módulos fotovoltaicos, debido al gran desarrollo que está teniendo esta tecnología en la actualidad, lo que sugiere un futuro prometedor para este tipo de tecnología.

El estudio desarrollado en este Trabajo Fin de Máster aborda el diseño de una instalación solar fotovoltaica que debe ser capaz de suministrar energía térmica a una instalación convencional de gas natural, con el objetivo de reducir el consumo de combustible de una industria convencional que utiliza gas natural como combustible.

A continuación, se explica como se ha desarrollado este estudio:

- Se ha comprobado la elevada importancia que tiene la simulación de los sistemas solares fotovoltaicos, puesto que nos permite determinar el comportamiento del sistema y analizar la influencia de la variación de cualquiera de sus parámetros. En particular se ha descrito TRNSYS, herramienta de simulación de naturaleza modular, que permite analizar el comportamiento de estos sistemas a partir de modelos de cada uno de los componentes de la instalación.
- Para cuantificar el comportamiento de estos sistemas se ha definido un caso base correspondiente a una instalación industrial de producción de vapor a la que se le ha adherido una instalación de energía solar fotovoltaica con una caldera eléctrica de vapor en paralelo a la caldera de vapor de la instalación convencional. A partir del análisis de este caso base, se ha desarrollado un análisis de sensibilidad, estudiando la influencia de la localidad geográfica.

This work has tried to integrate photovoltaic solar energy in the industrial sector, since it held numerous thermal processes involving temperatures easily attainable with current technology. The reason that led to the realization of this study has been the fall in the prices of photovoltaic modules, due to the great development that this technology is currently experiencing, which suggests a promising future for this type of technology.

The study developed in this Master's Thesis addresses the design of a solar photovoltaic installation that must be capable of supplying thermal energy to a conventional natural gas installation, with the aim of reducing the fuel consumption of a conventional industry that uses natural gas as fuel.

This study has been developed as follows:

- The high importance of the simulation of photovoltaic solar systems has been proved, since it allows us to determine the behavior of the system and analyze the influence of the variation of any of its parameters. In particular, TRNSYS has been described, a simulation tool of a modular nature that allows analyzing the behavior of these systems based on models of each of the components of the installation.
- To quantify the behavior of these systems, a base case corresponding to an industrial installation for steam production has been defined, to which a photovoltaic solar energy installation has been added with an electric steam boiler in parallel to the steam boiler of the conventional installation. Based on the analysis of this base case, a sensitivity analysis has been developed, studying the influence of the geographical location.

Agradecimientos	v
Resumen	vi
Abstract	viii
Índice	x
Índice de tablas	xii
Índice de ilustraciones	xiii
1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Presentación	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Metodología	3
2 Introducción a la energía solar fotovoltaica	4
2.1 Antecedentes	4
2.2 Desarrollo de la energía solar fotovoltaica	7
2.2.1 Análisis de la situación del sector a nivel mundial	7
2.2.2 Análisis de la situación del sector a nivel europeo	9
2.2.3 Análisis de la situación del sector en España	10
3 Fundamentos técnicos de una instalación solar fotovoltaica	15
3.1 Radiación solar	15
3.1.1 Generación de la radiación solar	17
3.1.2 Distribución espectral de la radiación solar	18
3.2 El efecto fotovoltaico	18
3.2.1 Células fotovoltaicas	21
3.3 Panel o módulo fotovoltaico	25
3.3.1 Características físicas del módulo	26
3.3.2 Asociación de módulos fotovoltaicos	27
3.3.3 Problema del punto caliente	28
3.3.4 Orientación e inclinación	29
3.4 Sistemas de generación	30
3.4.1 Sistemas fotovoltaicos aislados	30
3.4.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red	32
3.5 Ventajas e inconvenientes de las instalaciones fotovoltaicas	32
4 Simulación de sistemas solares fotovoltaicos	35
4.1 Introducción	35
4.2 Herramientas de simulación	35
4.2.1 TRNSYS	36
5 Estudio de un sistema solar fotovoltaico de generación de vapor	39
5.1 Introducción	39
5.2 Descripción del caso base	39
5.3 Simulación del caso base	41
5.3.1 Determinación de la inclinación óptima	43
5.3.2 Determinación del área de captación	44
5.3.3 Análisis de la instalación	46
5.4 Análisis de sensibilidad	49

6	Presupuesto	50
7	Estudio de viabilidad	52
7.1	Influencia de la localidad	56
8	Resumen y conclusiones	57
9	Referencias	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Potencia acumulada en los principales países del mundo [8]	8
Tabla 2: Países europeos con mayor potencia fotovoltaica instalada [8]	10
Tabla 3: Prediseño de la instalación solar fotovoltaica	41
Tabla 4: Componentes utilizados en la simulación	43
Tabla 5: Valores anuales en función de la localidad	49
Tabla 6: Presupuesto	50
Tabla 7: kg anuales de vapor producidos	53
Tabla 8: Porcentaje de pérdida de energía	54
Tabla 9: VAN de la instalación	55
Tabla 10: VAN instalación ideal	56
Tabla 11: Valores del VAN en función de la localidad	56

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2-1: Espejo de Arquímedes [2]	4
Figura 2-2: Movimiento del sol en el hemisferio norte [3]	5
Figura 2-3: Satélite recubierto de paneles fotovoltaicos [5]	6
Figura 2-4: Paneles de calentamiento de agua [6]	6
Figura 2-5: Crecimiento de la potencia fotovoltaica instalada [8]	7
Figura 2-6: Gráfico representativo de la potencia fotovoltaica agregada por países [8]	8
Figura 2-7: Horas de sol anuales [8]	11
Figura 2-8: Irradiación solar media anual por provincia [8]	11
Figura 2-9: Potencia fotovoltaica total instalada [8]	12
Figura 2-10: Participación de las CCAA en la potencia total instalada [8]	12
Figura 2-11: Número de instalaciones registradas por CCAA [8]	13
Figura 2-12: Evolución histórica de la potencia instalada [8]	14
Figura 3-1: Tipos de radiación solar [9]	16
Figura 3-2: Movimiento del Sol [10]	17
Figura 3-3: Irradiación solar [11]	17
Figura 3-4: Átomo eléctricamente neutro [12]	19
Figura 3-5: Red cristalina de silicio [13]	19
Figura 3-6: Efecto de la radiación solar sobre un semiconductor (Silicio) [13]	20
Figura 3-7: Unión p-n [14]	21
Figura 3-8: Célula fotovoltaica [15]	22
Figura 3-9: Sistema de concentración [16]	22
Figura 3-10: Células bifaciales [17]	23
Figura 3-11: Calculadora con energía solar	23
Figura 3-12: Módulos con células de silicio policristalino	24
Figura 3-13: Módulos con celdas de silicio monocristalino	24
Figura 3-14: Sección de un módulo fotovoltaico [21]	27
Figura 3-15: Curva IV de un módulo conectado en serie	27
Figura 3-16: Curva IV de un módulo conectado en paralelo	28
Figura 3-17: Esquema de funcionamiento de los diodos by-pass	29
Figura 3-18: Orientación e inclinación del módulo fotovoltaico	30
Figura 3-19: Esquema sistemas conectados a una carga	30
Figura 3-20: Alumbrado público [22]	31
Figura 3-21: Sistema con regulador y batería	31
Figura 3-22: Sistema para corriente continua y alterna	31

Figura 3-23: Instalación conectada a red [7]	32
Figura 4-1: Esquema de un sistema solar fotovoltaico en TRNSYS	37
Figura 5-1: Demanda de vapor	39
Figura 5-2: Esquema de la instalación	40
Figura 5-3: Caldera eléctrica de vapor	41
Figura 5-4: Esquema de la simulación en TRNSYS	42
Figura 5-5: Radiación solar captada anual	42
Figura 5-6: Inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos	43
Figura 5-7: Demanda cubierta por la instalación inicial	44
Figura 5-8: Influencia de la superficie de captación	45
Figura 5-9: Variación del coste de los módulos en función del área	45
Figura 5-10: Demanda cubierta por la instalación del caso base	46
Figura 5-11: Valores mensuales de energía	46
Figura 5-12: Valores diarios de energía (Alta radiación)	47
Figura 5-13: Valores diarios de energía (Baja radiación)	47
Figura 5-14: Comportamiento del sistema en un día de alta radiación	48
Figura 5-15: Comportamiento del sistema en un día de baja radiación	48
Figura 5-16: Dependencia de la irradiación con la demanda cubierta	49
Figura 6-1: Inversión en los componentes de la instalación	51
Figura 7-1: Porcentaje de ahorro	54

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

A medida que las sociedades van desarrollándose, consumen cada vez mayores cantidades de energía, al tiempo que se diversifican las distintas fuentes. Actualmente, la electricidad constituye, junto con el petróleo y el gas natural, la forma de energía más utilizada, gracias a su enorme versatilidad.

Las centrales de energía convencionales permiten obtener grandes cantidades de electricidad a un precio relativamente bajo, sin embargo, plantean problemas medioambientales de difícil solución. Por ello, cada vez están más presentes las denominadas fuentes de energía no convencionales o alternativas, que, si bien producen menos cantidad de electricidad, son también mucho menos perjudiciales para el medio ambiente.

Las ventajas más reseñables de las energías alternativas son las siguientes:

- **Las energías alternativas son renovables**

Esto significa que la disponibilidad es infinita, nunca se agotarán. Otras fuentes tradicionales de energía, como el carbón, el petróleo y el gas son limitados y cada día que pasan las reservas mundiales se agotan irremediablemente. Las energías renovables contribuirían y contribuyen a reducir nuestra dependencia sobre los combustibles fósiles, y con ello, de la dependencia del abastecimiento desde terceros países.

- **Beneficios medioambientales**

Las energías alternativas son limpias y no conllevan apenas la emisión de gases de efecto invernadero. No se agotan recursos naturales y tienen mínimos impactos sobre el medio ambiente, sin productos de deshecho, emisiones de CO₂ y otros tóxicos, como ocurre con las fuentes tradicionales de energía. Los beneficios medioambientales de las energías renovables son muchos, y sobretodo contribuirán a mejorar los niveles de contaminación atmosférica.

- **Son fuentes fiables de energía**

La dependencia de los combustibles fósiles se ha ido incrementando de forma exponencial en los últimos años. España depende de políticas de los países productores de petróleo y gas, y no son raros los conflictos, guerras y subida de precios por disputas por esos recursos naturales. Si se mejorará la implantación de centrales productoras de energías limpias, se tendría una producción segura de energía sin depender de factores externos.

- **Beneficios económicos**

La energía renovable cada vez es más competitiva frente a otras fuentes de energía convencionales. Además, se crean miles de puestos de trabajo tanto en fabricación, como en instalación, mantenimiento y comercialización, que contribuyen en gran manera a la economía del país.

- **Estabilización de los precios de la energía**

Como gran parte de la energía producida proviene de fuentes no renovables que continúan su escalada de precios, el coste final de la energía para el consumidor experimenta subidas periódicas. Con una producción estable y asentada basada en energías renovables, el precio no sufriría tantos altibajos.

Una vez vistas las principales ventajas de las energías renovables, se verán los inconvenientes, aunque muchas de las desventajas de pasar a usar energías limpias pueden arreglarse a base de tiempo y sobretodo gracias a los nuevos avances tecnológicos que las hagan más eficientes.

- **Fiabilidad del suministro**

En el sentido de que la mayoría de las fuentes de energías renovables sufren altibajos en función del tiempo meteorológico (sol, viento, lluvia...). Si no se dan las condiciones adecuadas, no se produce energía. Por ello, es difícil asegurar una generación de energía constante o, por ejemplo, asegurar la cobertura de los picos de demanda energética.

- **Gran inversión**

Las inversiones iniciales para obtener energía procedente de fuentes renovables son altas. Además, requieren una gran planificación previa con proyectos que cuiden múltiples aspectos, lo que hace que cualquier planteamiento de construcción de nuevas plantas conlleve un gran coste.

- **Ocupación de grandes superficies**

Las plantas solares, los campos eólicos, requieren de extensas superficies para su construcción. Es cierto que también se pueden obtener en instalaciones más domésticas, pero para que la producción sea rentable para el país, se requiere la construcción de esas grandes plantas productoras.

1.2 Presentación

El estudio desarrollado en este Trabajo Fin de Máster aborda el diseño de una instalación solar fotovoltaica que debe ser capaz de suministrar energía térmica a una instalación convencional, con el objetivo de reducir el consumo de combustible de esta industria. que utiliza gas natural como combustible.

El uso de energía fotovoltaica para la producción de energía térmica (en este caso vapor), prácticamente no se ha utilizado, por motivos fundamentalmente económicos. Sin embargo, el

fuerte desarrollo tecnológico, la caída del precio de los paneles fotovoltaicos y una mayor eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos, plantean el estudio de la producción de energía térmica para procesos industriales mediante energía solar fotovoltaica.

1.3 Objetivos

Los objetivos principales que se plantean al abordar el diseño de una instalación fotovoltaica aislada como es el caso son:

- Determinar los elementos integrantes de una instalación solar fotovoltaica aislada de la red de suministro.
- Conocer los parámetros típicos que afectan al diseño de los componentes de la instalación solar fotovoltaica.
- Aprender la metodología del dimensionado de sistemas solares fotovoltaicos.
- Calcular los distintos componentes de un sistema fotovoltaico aislados.

Como objetivos secundarios se incluyen:

- Fomentar el uso de las energías renovables.
- Hacer un recorrido sobre la legislación y su actual situación.
- Analizar y valorar la influencia del uso de energías renovables en la reducción de la contaminación ambiental.

1.4 Metodología

La finalidad del proyecto es la de realizar una instalación fotovoltaica que integre todos los componentes de este tipo de instalaciones y además se pueda construir con elementos reales. Para alcanzar los objetivos se han seguido los siguientes pasos:

- Buscar información relacionada tanto a través de la bibliografía existente como información relacionada con internet.
- Analizar cada una de las partes que forman un sistema fotovoltaico, así como los cálculos necesarios para determinar los elementos que formarán parte de la instalación.
- Diseñar diferentes instalaciones ubicadas en lugares con diferentes características.
- Elegir los elementos de la instalación comprobando en sus hojas de características que los principales parámetros se ajustan al diseño.
- Analizar los resultados finales.

2 INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.1 Antecedentes

La energía solar ha sido utilizada desde tiempos remotos por la humanidad, como son los casos de Arquímedes, en el 212 A.C., utilizó espejos para quemar varias naves romanas concentrando el calor del sol sobre ellas y Leonardo da Vinci que diseñó también un espejo parabólico para concentrar el calor del sol, el cual no lo concluyó [1].

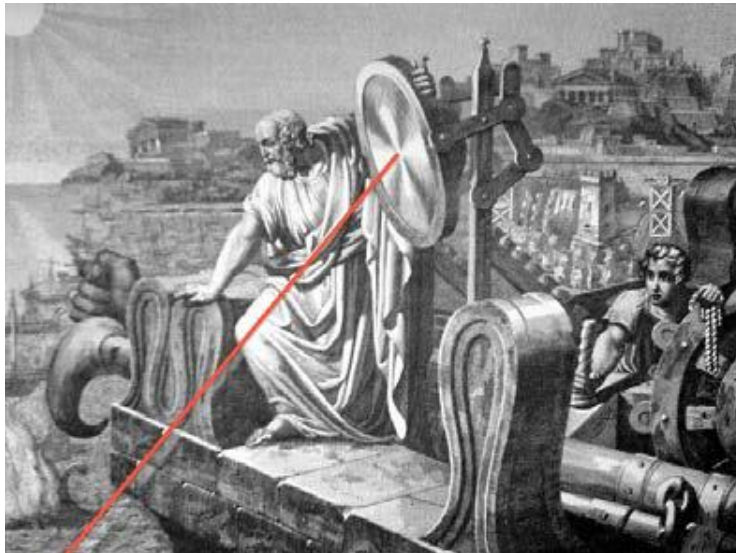


Figura 2-1: Espejo de Arquímedes [2]

En la Arquitectura es donde, en el siglo XIX, se han logrado los mejores resultados de la utilización de la energía solar al orientar las fachadas convenientemente para que el sol ingrese en edificio y caliente su interior sobre todo en los días de invierno soleados [1]. Por ejemplo, en viviendas orientadas en el hemisferio norte, si se quiere que el sol ingrese por las ventanas de la vivienda, éstas deberían estar orientadas hacia el sur, sureste o suroeste. En la siguiente imagen se puede observar el movimiento del Sol con respecto a la posición de un punto en el hemisferio norte.

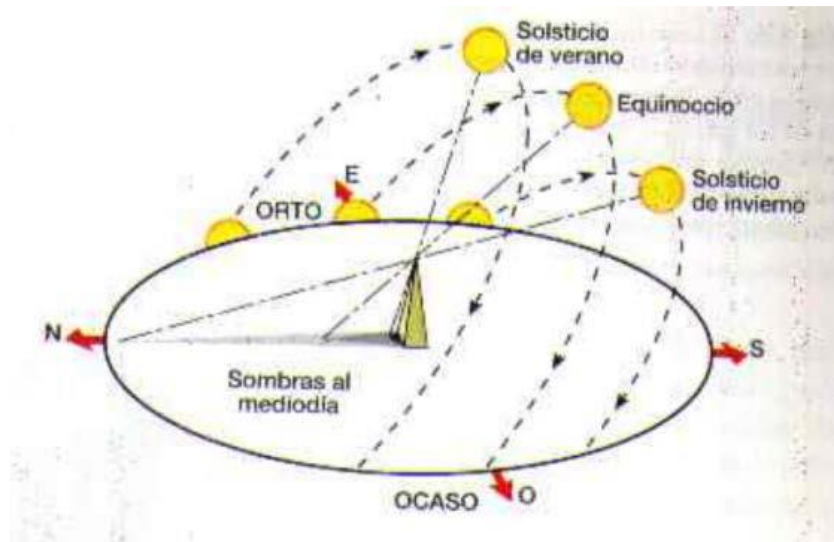


Figura 2-2: Movimiento del sol en el hemisferio norte [3]

Hertz, en 1887 observó que la chispa saltaba más fácilmente entre dos esferas de diferente potencial cuando sus superficies eran fuertemente iluminadas por la luz de otra descarga, y posteriormente comprobó que, de una lámina de zinc cargada negativamente y unida a un electroscopio, perdía rápidamente su carga al ser iluminada por un arco voltaico. De todo esto Hertz dedujo que, bajo la acción de la luz, el zinc y en general todos los metales emiten cargas negativas [4].

En 1902 Einstein generalizó la hipótesis hecha por Plank de la teoría de los fotones, la cual decía que las células fotoeléctricas son dispositivos basados en la acción de radiaciones luminosas sobre ciertas superficies metálicas y su efecto puede ser de tres tipos [4]:

- **Efecto foto emisivo o foto externo:** Provoca en el metal un arranque de electrones con liberación de los mismos.
- **Efecto foto conductivo o foto interno:** Modifica la conductividad eléctrica del metal.
- **Efecto fotovoltaico o foto interno:** Crea una fuerza electromotriz en el metal.

La primera célula capaz de convertir la luz del sol en energía eléctrica fue desarrollada en 1954 por Chapin, Fuller y Perarson. Desde entonces estos dispositivos han sido mejorados y perfeccionados, se han utilizado principalmente para la alimentación de satélites artificiales, para fotosensibilizar algunos equipos electrónicos y para alimentar pequeñas cargas en lugares de difícil acceso [4].



Figura 2-3: Satélite recubierto de paneles fotovoltaicos [5]

En la década de 1970, motivados por el incremento en el costo del petróleo, se empezó a considerar la idea de utilizar la energía solar como una alternativa para el menor consumo energético. En principio se fabricaron pequeños captadores solares para se utilizaban para calentar el agua y únicamente para uso doméstico [1].



Figura 2-4: Paneles de calentamiento de agua [6]

A consecuencia del estancamiento del precio de los combustibles convencionales, los intereses de las grandes compañías que monopolizan la producción y el consumo de la energía, han contribuido a frenar el aprovechamiento de la energía solar. Su utilización ha sido hasta la fecha tímidamente fomentada por gobiernos [1].

En la actualidad, en el que las gravísimas consecuencias de la contaminación, unidas al deseo de autocontrol de la energía que se consume, han hecho que se manifieste un creciente deseo de utilizar energías limpias y renovables, entre las cuales la energía solar ocupa un lugar destacado [1].

2.2 Desarrollo de la energía solar fotovoltaica

2.2.1 Análisis de la situación del sector a nivel mundial

La energía fotovoltaica se encuentra en su momento de mayor crecimiento a nivel mundial, potenciado principalmente por el desarrollo de esta tecnología en algunos países de Asia, como China, India o Japón. Este último año se ha superado la barrera de los 400 GW acumulados, mientras que el año anterior ya fue un hito memorable el que se alcanzaran los 300 GW. En este sentido, es claro que la fotovoltaica se ha consolidado como un sector maduro y altamente atractivo para todo tipo de empresas y de fondos de inversión.

En lo que respecta a la potencia total instalada, cabe destacar que, entre China, Estados Unidos, Japón y Alemania, esto es, los cuatro países con mayor potencia instalada en el mundo, cubren casi el 70% de la potencia instalada total. China, es el primer país del mundo en términos de potencia instalada, con 131 GW, con más del doble de potencia instalada que el segundo, Estados Unidos, con 51 MW.



Figura 2-5: Crecimiento de la potencia fotovoltaica instalada [8]

La distribución de la potencia mundial acumulada se presenta de manera desigual en los 5 continentes. Europa destaca por la cantidad de pequeños y medianos mercados repartidos por todo su territorio, que conviven, como se ha visto, con algunas de las grandes potencias, lo que la sitúa en su conjunto como una gran área fotovoltaica.

Tabla 1: Potencia acumulada en los principales países del mundo [8]

2017		
Países	Acumulada (GW)	Acumulada (%)
China	131,00	33%
Estados Unidos	51,00	13%
Japón	49,00	12%
Alemania	42,00	10%
Italia	19,70	5%
India	18,30	5%
Reino Unido	12,70	3%
Francia	8,00	2%
Australia	7,20	2%
España	4,70	1%
Resto del mundo	58,00	14%
Total mundial	402,5	100%

Asimismo, el continente asiático dispone de mercado en otros países más allá de las grandes potencias, como es el caso de Corea del Sur (5,6 GW), Tailandia (2,7 GW), y de manera más incipiente en Pakistán (1,8 GW), Taiwán (1,8 GW) o Filipinas (1,4 GW).

En el caso de América, la potencia se distribuye de manera muy desigual, concentrándose en el norte del continente, mientras que el sur esta tecnología es todavía inexistente en la mayoría de países, destacando Chile (1,8 GW) como país pionero.

La tecnología fotovoltaica se encuentra también en una fase de crecimiento en algunos países de Oriente Medio, como Israel (1,1 GW), que comienza a incorporarse al mercado fotovoltaico, y en fase más madura en Turquía, que ya acumula 3,4 GW. Por su parte, en el continente africano se va asentando el mercado sudafricano (1,8 GW) y en Oceanía destaca Australia con sus más de 5,5 GW.



Figura 2-6: Gráfico representativo de la potencia fotovoltaica agregada por países [8]

2.2.2 Análisis de la situación del sector a nivel europeo

Si bien en 2016 Europa había experimentado un ligero decrecimiento del mercado fotovoltaico, en 2017 regresó a la tendencia creciente que ya había experimentado en 2015. Así, la potencia total agregada dicho año se situó en torno a los 6,5 GW, frente a los 6 GW instalados en 2016.

Este ligero aumento del mercado europeo en 2017 vino liderado por Alemania con 1,8 GW instalados. Parte de esta potencia corresponde a las tres subastas realizadas en Alemania, con un volumen total de 600 MW en instalaciones fotovoltaicas en suelo, en línea con su nueva política para grandes instalaciones de energías renovables.

En cuanto a las instalaciones fotovoltaicas medianas en Alemania, con potencias inferiores a 750 kW, pueden seguir acogéndose a los sistemas Feed-in-Tariff por un periodo de 20 años.

Tras Alemania, le sigue Reino Unido, con 950 MW, que se convierte en la segunda potencia instaladora de 2017 a pesar de la finalización de su atractivo programa de incentivo solar en 2016, que ha provocado una reducción de este mercado respecto a años anteriores.

Francia con 875 MW, experimenta un crecimiento respecto a los casi 600 MW introducidos en 2016. Esta subida se produce en un año de cambios en el marco regulatorio de la fotovoltaica en este país, entre los que se encuentran la publicación de nuevas tarifas y condiciones para los sistemas de menos de 100 kW.

Los Países Bajos, continúan su progreso mediante la instalación 853 MW, impulsado por la reducción de costes y la seguridad de un esquema de balance neto en las instalaciones de pequeña potencia para los años venideros. El mercado de los grandes sistemas fotovoltaicos continúa también su crecimiento, sin embargo, comienza a encontrarse con factores limitantes como la integración en red y la disponibilidad de superficies adecuadas debido a la gran densidad de población del país.

Italia se mantiene en los mismos niveles de 2016 con 409 MW, de los cuales aproximadamente la mitad corresponden a sistemas residenciales (de menos de 20 kW) gracias a las deducciones fiscales.

En esta línea de estabilidad nos encontramos otros mercados europeos como Suiza (260 MW), Austria (153 MW), Hungría (136 MW), Suecia (93 MW) o Portugal (57 MW).

Bélgica, país caracterizado por su gran cantidad de pequeñas instalaciones residenciales, y España, a la espera de que sematerialicen las instalaciones resultantes de la subasta.

También presentan un ligero crecimiento Noruega, con 23 MW instalados mayoritariamente en edificios comerciales y residenciales para autoconsumo, y Finlandia, con 18 MW de fotovoltaica instalados en tejados de edificios públicos y comerciales y en viviendas privadas.

En cuanto a la potencia total acumulada, el top 5 de países europeos continúa siendo el mismo que en los últimos años, con Alemania liderando el ranking, seguida de lejos por Italia, Reino Unido, Francia y España.

Es en el séptimo puesto en el que se encuentra un cambio en la clasificación respecto al año anterior de la mano de los Países Bajos que, con un crecimiento moderado, desbanca a Grecia y la República Checa, cuyos mercados fotovoltaicos se encuentran completamente paralizados, como ocurre también en Rumanía y Bulgaria.

Tabla 2: Países europeos con mayor potencia fotovoltaica instalada [8]

2017	
Países	Acumulada (GW)
Alemania	42,00
Italia	19,70
Reino Unido	12,70
Francia	8,00
España	4,70
Bélgica	3,80
Países Bajos	2,90
Grecia	2,60
República Checa	2,20
Suiza	1,90

2.2.3 Análisis de la situación del sector en España

El sector fotovoltaico en España ha estado condicionado por las diferentes regulaciones, muy fluctuantes en cuanto a los tipos de retribución, lo que ha repercutido en un crecimiento dispar a lo largo de los años.

Asimismo, las diferentes normativas han marcado el tamaño de las instalaciones, predominando aquellas de baja potencia debido a una mayor cuantía de las tarifas.

La potencia fotovoltaica en España, no solo se reparte de manera asimétrica en el ámbito temporal, sino también en el ámbito territorial, a causa, fundamentalmente, de la disponibilidad del recurso solar en las distintas regiones del país.

Este recurso, elevado durante prácticamente todo el año en la mayor parte del territorio, viene determinado por dos parámetros esenciales, las horas de sol y la irradiación solar. Ambos parámetros resultan, de manera general, en valores más elevados en la zona sur del país y menores en la zona norte, aunque estos valores altos de temperatura se pueden ver afectadas por aspectos como la nubosidad o la orografía del terreno.

Las provincias con mayor número de horas de sol las encontramos en Andalucía, Extremadura, Castilla-La Mancha, Valencia, Baleares y Canarias, así como las ciudades autónomas Ceuta y Melilla, llegando a rebasar las 2.800 horas anuales de sol en la mayoría de las provincias.

En la cornisa cantábrica, comunidades como el País Vasco, Asturias o Cantabria, no superan las 2.000 horas de recurso solar.

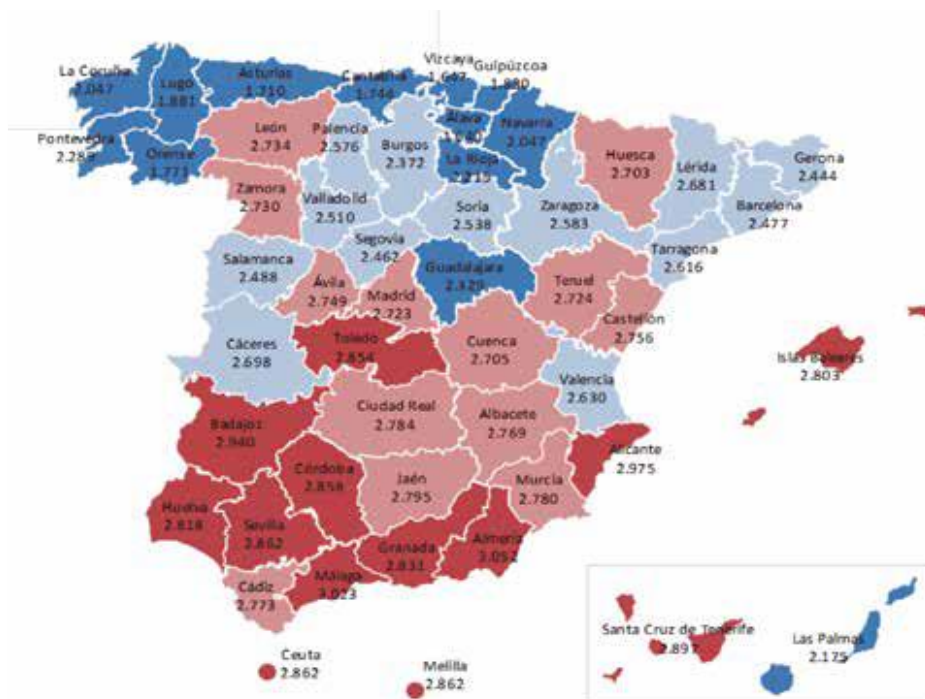


Figura 2-7: Horas de sol anuales [8]

Además de las horas de sol disponibles al año, es importante conocer la cantidad de energía que incide en término medio en cada provincia. En este caso, los mayores valores se registran en las provincias más meridionales de la península y en las Islas Canarias, donde se registran niveles de irradiación entre los 1.600 y los 2.000 kWh/m². En la franja norte, sin embargo, estos valores se sitúan entre los 1.000 y 1.500 kWh/m².



Figura 2-8: Irradiación solar media anual por provincia [8]

La potencia instalada actualmente en las diferentes comunidades autónomas concuerda con la distribución del recurso solar. A este respecto, las comunidades con mayor potencia fotovoltaica instalada son, por este orden, Castilla-La Mancha, Andalucía y Extremadura, con más de 500 MW instalados en cada una.

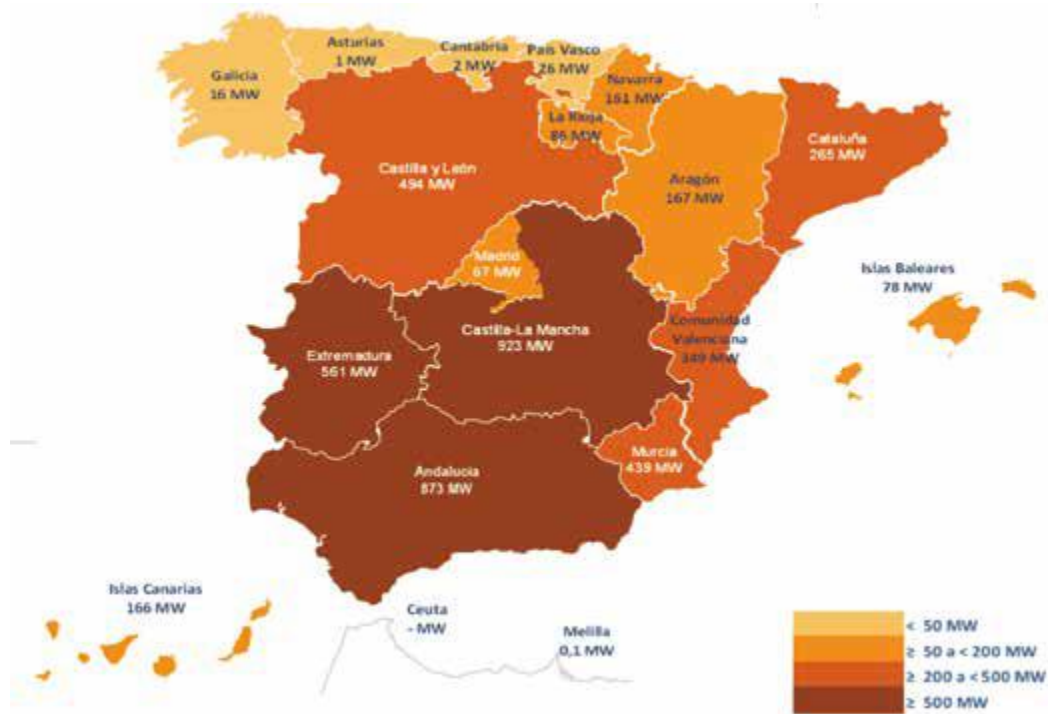


Figura 2-9: Potencia fotovoltaica total instalada [8]

Estas tres comunidades, líderes desde los comienzos de la fotovoltaica, representan, en conjunto, la mitad de la capacidad fotovoltaica nacional, quedando patente el desequilibrio entre las diferentes regiones del país.

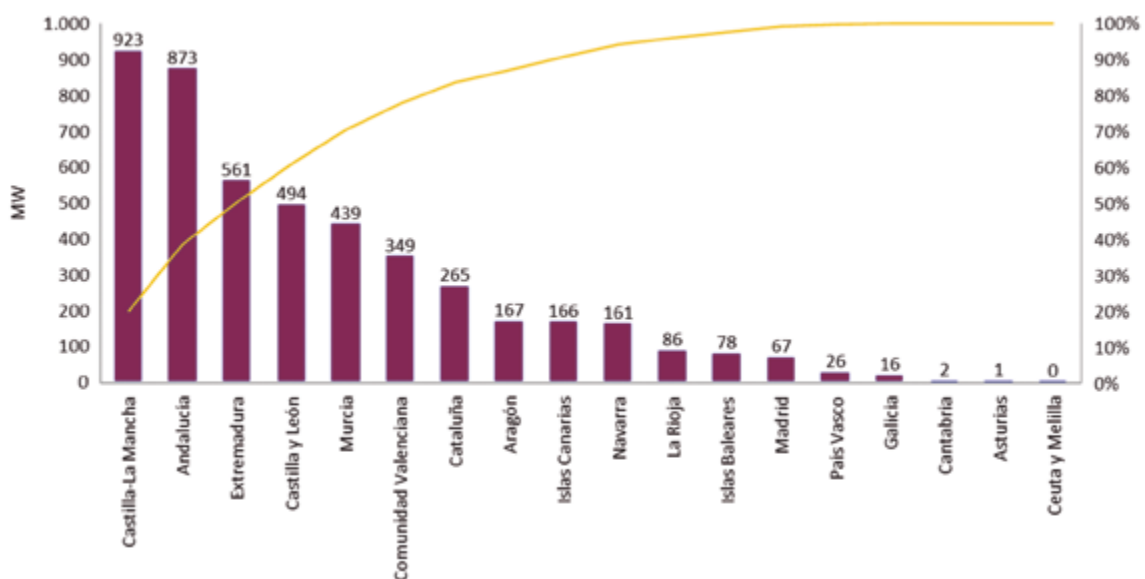


Figura 2-10: Participación de las CCAA en la potencia total instalada [8]

El total de la capacidad fotovoltaica instalada en todas las CCAA representa un 4,5% de la potencia eléctrica total del país. Esta potencia se distribuye en más de 60.000 instalaciones repartidas por todo el territorio. Dichas instalaciones son, por lo general, de un tamaño inferior a los 100 kW.

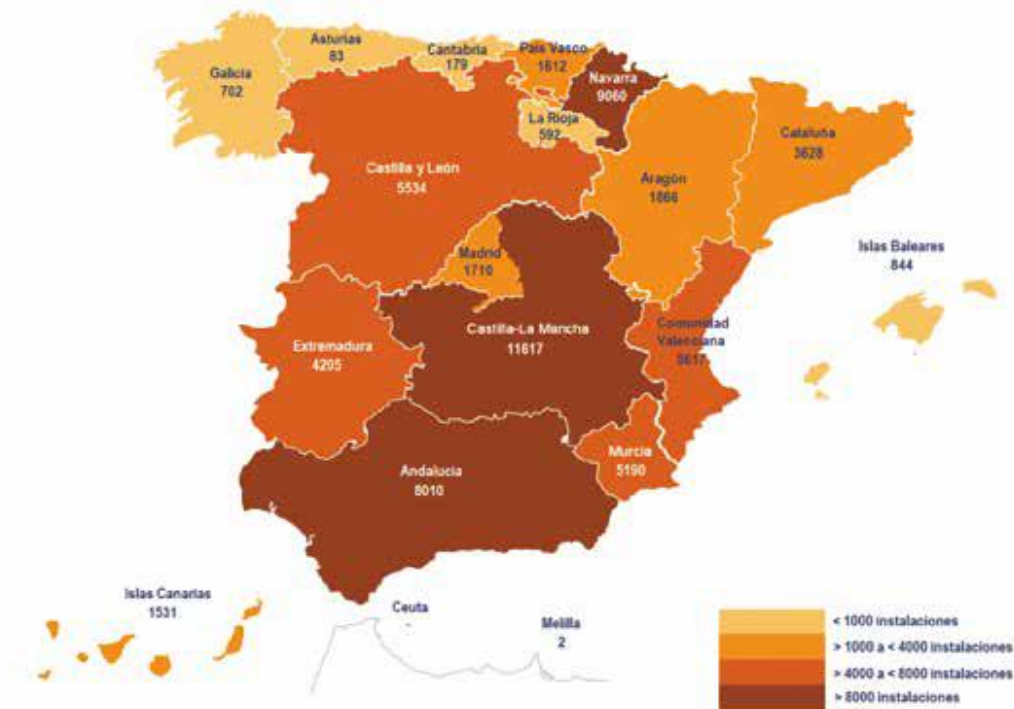


Figura 2-11: Número de instalaciones registradas por CCAA [8]

En cuanto a la evolución histórica de la potencia instalada, no ha crecido de manera uniforme a lo largo de los años, sino que se concentró principalmente en un único año, el 2008, gracias al marco regulatorio vigente en ese año, el RD 661/2007.

Esta incorporación desproporcionada de capacidad, de más de 2700 MW, contrasta con la falta de potencia instalada en 2009, originada principalmente por el retraso en las autorizaciones de las inscripciones al registro de preasignación que regulaba el RD1578/2008, no superando los 150 MW instalados en ese año.

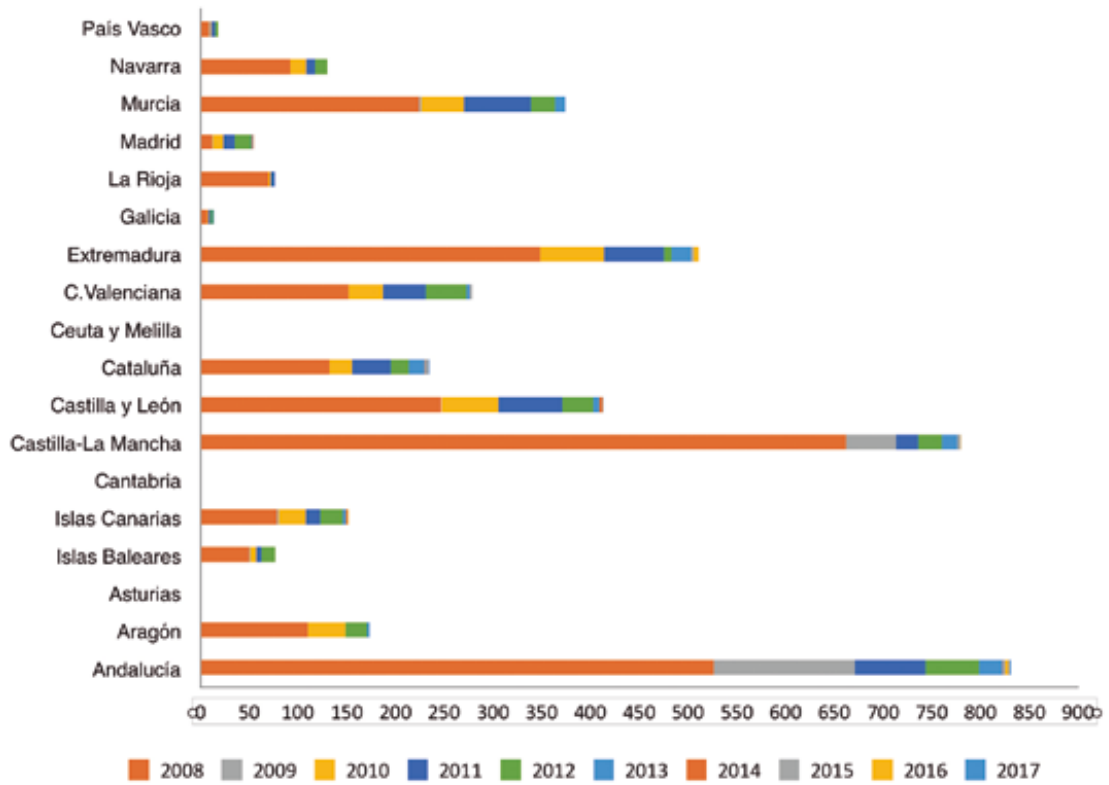


Figura 2-12: Evolución histórica de la potencia instalada [8]

3 FUNDAMENTOS TÉCNICOS DE UNA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1 Radiación solar

Conocer el comportamiento de la radiación solar es muy importante, ya que es el combustible de las células fotovoltaicas y sin ésta no se produciría el efecto fotovoltaico.

La radiación solar es un factor que depende de la posición de la Tierra y del Sol, que se mueven siguiendo leyes de la física y también depende de la atmósfera de la Tierra que posee cualidades que permanecen constantes y otras que son totalmente aleatorias.

Existen dos términos con los que se puede medir la radiación solar y estos son:

- **Irradiación:** Es la cantidad de energía recibida en un período de tiempo y su unidad de medida es el $W \cdot h/m^2$.
- **Irradiancia:** Es la potencia recibida en un instante y su unidad de medida es W/m^2 .

Es importante saber que la irradiancia que emite la superficie del Sol es de $63.500 \text{ kW}/m^2$, pero al exterior de la atmósfera de la Tierra llega solamente $1,37 \text{ kW}/m^2$, esto es aproximadamente un 3,3%.

Además, cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera terrestre se produce una pérdida de energía por fenómenos de difusión, reflexión y absorción. Por tanto, la irradiancia media que llega a la superficie de la Tierra es de $630 \text{ W}/m^2$.

En función de como incide la radiación solar sobre la superficie de la Tierra se distinguen tres tipos de radiación solar:

- **Radiación Directa:** Es la radiación que pasando por la atmósfera llega directamente desde el Sol hacia un punto en la superficie terrestre.
- **Radiación Difusa:** Es la radiación que pasando por la atmósfera y teniendo que pasar por obstáculos como las nubes, llega a la superficie de la Tierra.
- **Radiación Reflejada:** Es la radiación que pasando por la atmósfera es reflejada por el suelo o cualquier otra superficie cercana.

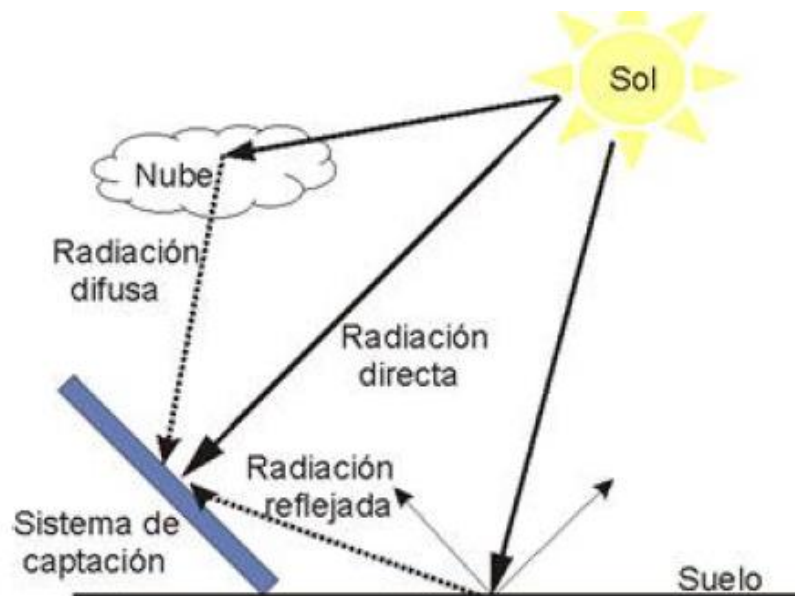


Figura 3-1: Tipos de radiación solar [9]

La cantidad de radiación solar que puede recibir un punto en la superficie terrestre depende de muchos factores:

- **Condiciones meteorológicas:** La radiación solar en un mismo punto de la Tierra puede variar si es un día soleado o nublado, en el primer caso la radiación directa puede llegar a ser el 90% del total.
- **Inclinación del sistema de captación:** Un plano horizontal recibe la mayor cantidad de radiación directa y la menor cantidad de radiación reflejada y viceversa. Se debe regular la inclinación del captador dependiendo del tipo de radiación que interese captar.
- **Superficies reflectantes:** En el caso en que las superficies cercanas al captador sean más reflectantes como la nieve, por ejemplo, se tendrá más radiación reflectante que si otro tipo de superficie, como tierra o césped.
- **Posición de la Tierra con respecto al Sol:** La mejor manera de aprovechar la radiación solar es hacer que los rayos del Sol incidan perpendicularmente a las superficies. La inclinación en el eje de rotación de la Tierra con respecto al plano de su órbita alrededor del Sol hace que un mismo punto en la superficie reciba los rayos solares a distintas inclinaciones. Por estas razones un mismo punto recibe irradiancias diferentes en función de la época del año. En la siguiente imagen se puede ver el movimiento del sol en diferentes latitudes y en diferentes épocas del año.

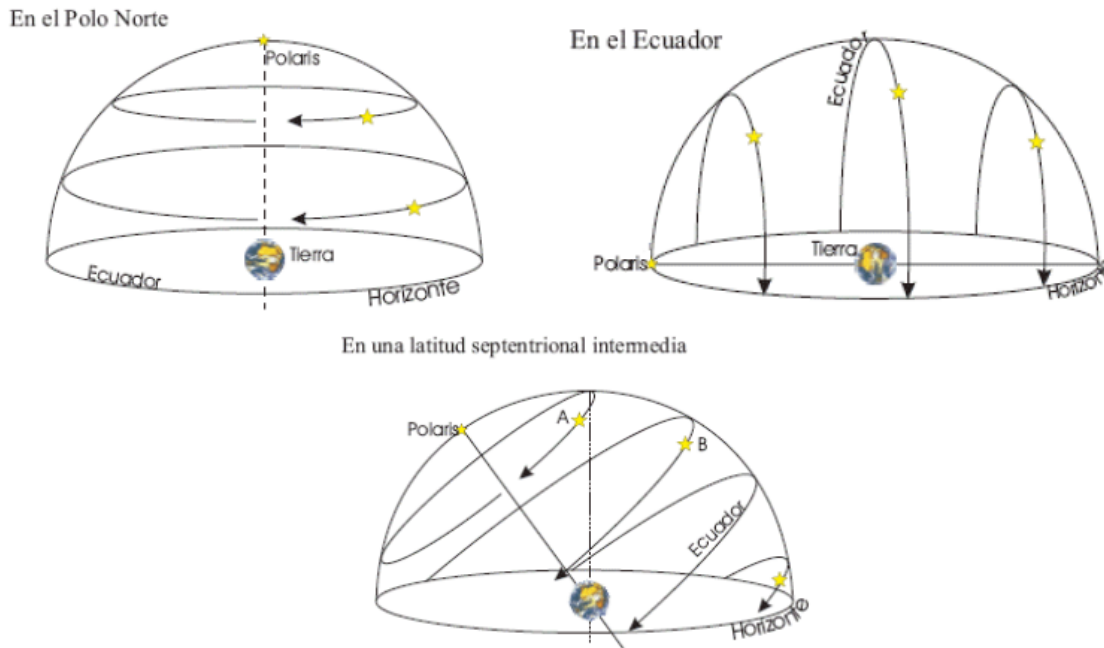


Figura 3-2: Movimiento del Sol [10]

En la siguiente figura se muestran los valores de radiación solar en [kWh/m²/día] sobre la superficie, tomando en consideración la inclinación más favorable en el mes más desfavorable.

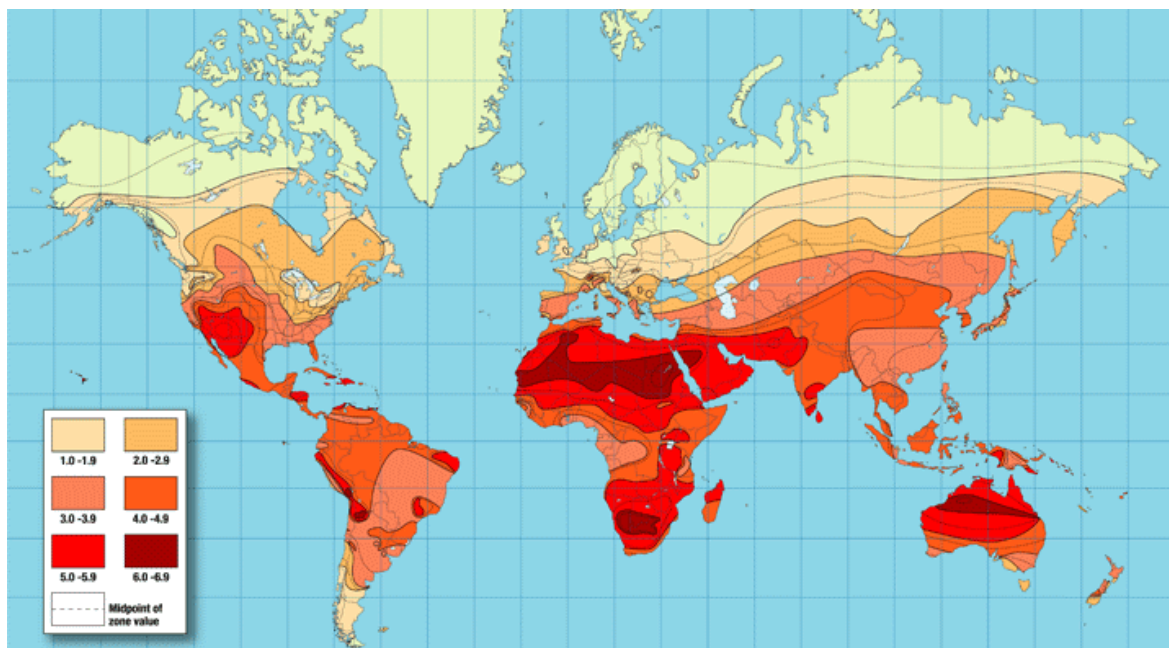


Figura 3-3: Irradiación solar [11]

En esta imagen se puede ver que las zonas que están situadas en las latitudes próximas al ecuador son las más favorecidas por la radiación solar, lo que indica que son las zonas en las que mayor provecho se puede obtener.

3.1.1 Generación de la radiación solar

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y esta catalogada como una estrella enana amarilla. Sus regiones interiores son totalmente inaccesibles a la observación directa y es allí donde

ocurren temperaturas de unos 20 millones de grados necesarios para producir las reacciones nucleares. La capa más externa que es la que produce casi toda la radiación observada se llama fotosfera y tiene una temperatura de 5780 K. Tiene solo una anchura entre 200 y 300 km. Por encima de ella está la cromosfera con una anchura de unos 15.000 km. Más exterior aún es la corona solar una parte muy tenue y caliente que se extiende varios millones de kilómetros. La superficie de la fotosfera aparece formada de un gran número de gránulos brillantes producidos por las células de convección. También aparecen fenómenos cíclicos que conforman la actividad solar como manchas solares, fáculas, protuberancias solares, etc.

Estos procesos que tienen lugar a diferentes profundidades, van acompañados siempre de una emisión de energía que se superpone a la principal emisión de la fotosfera y que hace que el Sol se aleje ligeramente en su emisión de energía del cuerpo negro a cortas longitudes de onda por la emisión de rayos X y a largas longitudes por los fenómenos nombrados, destacando que no es la emisión igual cuando el sol está en calma que activo. Además, la cromosfera y corona absorben y emiten radiación que se superpone a la principal fuente que es la fotosfera.

3.1.2 Distribución espectral de la radiación solar

La aplicación de la Ley de Planck al Sol con una temperatura superficial de unos 6000 K nos lleva a que el 99% de la radiación emitida está entre longitudes de onda 0,15 y 4 μm . Como 1 \AA = $10^{-10} \text{ m} = 10^{-6} \mu\text{m}$ resulta que el sol emite un rango de 1500 \AA hasta 4000 \AA . La luz visible se extiende desde 4000 \AA a 7000 \AA . La radiación ultravioleta u ondas cortas iría desde los 1500 \AA a los 4000 \AA y la radiación infrarroja u ondas largas desde las 0,74 a 4 μm .

La atmósfera de la Tierra constituye un importante filtro que hace inobservables radiaciones de longitud de onda inferior a las 0,29 μm por la fuerte absorción del ozono y oxígeno. Ello nos libra de la radiación ultravioleta más peligrosa para la salud.

La atmósfera es opaca a toda radiación infrarroja de longitud de onda superior a las 24 μm , ello no afecta a la radiación solar, pero sí a la energía emitida por la Tierra que llega hasta las 40 micras y que es absorbida. A este efecto se conoce como efecto invernadero. Pero la emisión solar difiere de la de un cuerpo negro sobre todo en el ultravioleta. En el infrarrojo se corresponde mejor con la temperatura de un cuerpo negro de 5780 K y en el visible. Por tanto, la radiación solar no se produce en las mismas capas y se está observando la temperatura de cada una de ellas donde se produce la energía.

3.2 El efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico se define como la transformación de la radiación solar en electricidad, mediante materiales semiconductores que tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones.

La materia está compuesta por átomos, los cuales se encuentran conformados por dos partes, los electrones y el núcleo, con carga eléctrica negativa y positiva respectivamente, formando de esta manera un conjunto estable y eléctricamente neutro.

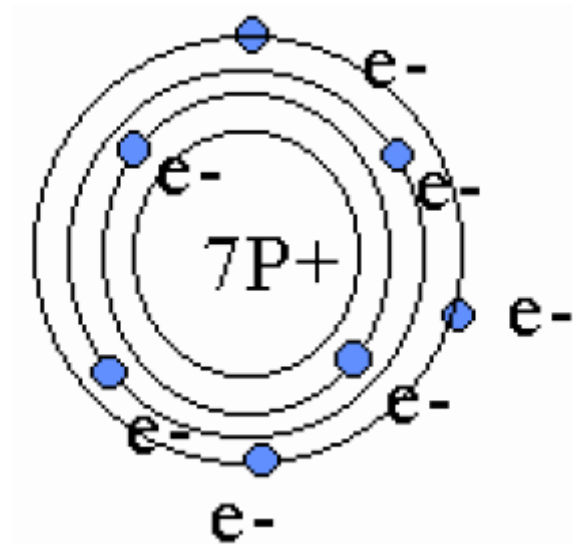


Figura 3-4: Átomo eléctricamente neutro [12]

Los electrones del último nivel se denominan electrones de valencia y son los que interactúan con otros electrones de otros átomos para formar una red cristalina.

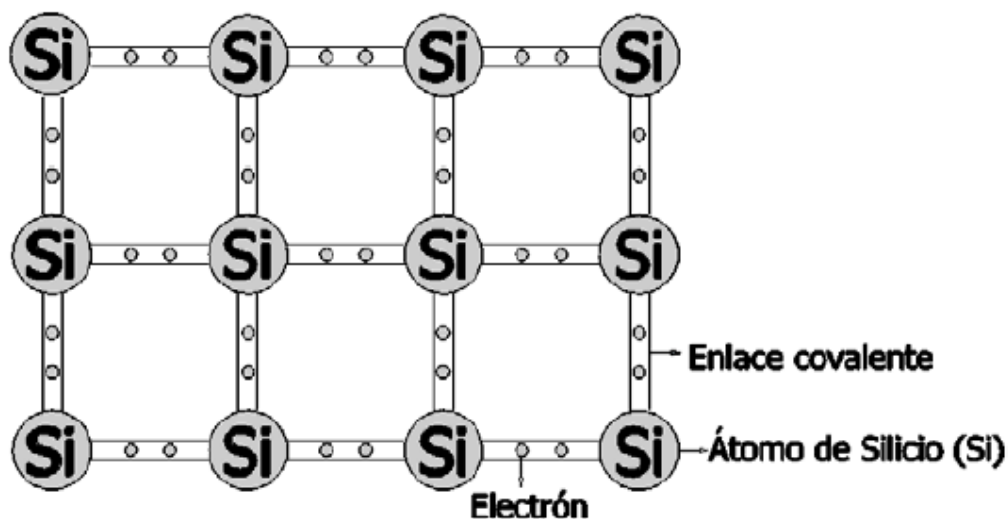


Figura 3-5: Red cristalina de silicio [13]

Eléctricamente hablando los materiales se pueden dividir en tres tipos:

- **Conductores:** Los electrones de valencia están poco ligados y pueden moverse dentro de una red cristalina con un pequeño agente externo.
- **Semiconductores:** Los electrones de valencia están más ligados al núcleo, pero con una pequeña cantidad de energía se pueden comportar como conductores.

- **Aislantes:** Tienen una configuración muy estable y sus electrones de valencia están muy ligados al núcleo, por tanto, la energía necesaria para separarlos del núcleo es muy grande.

Lewis en 1926 denominó a los átomos de luz o los pequeños agrupamientos de energía como fotones. De acuerdo con este autor, los rayos de luz son un flujo de energía o también una lluvia de fotones que atraviesa una sección determinada.

Los materiales utilizados para la fabricación de las células fotovoltaicas son los semiconductores ya que la energía que une a los electrones de valencia con el núcleo es similar a la energía de los fotones de los rayos solares. En el momento en que los fotones de la radiación solar inciden sobre un material semiconductor, los enlaces entre los electrones de valencia y su núcleo se rompen, quedando libres para circular por el semiconductor.

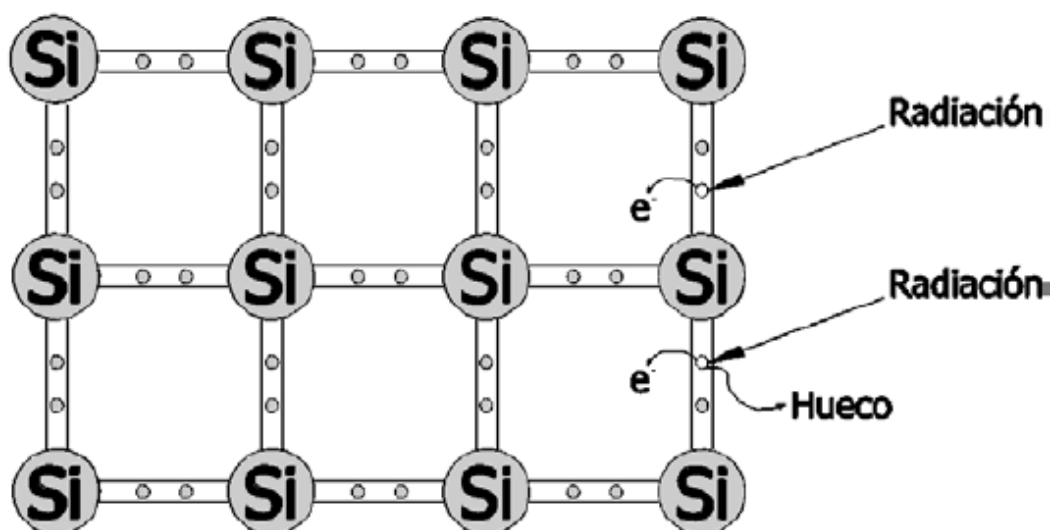


Figura 3-6: Efecto de la radiación solar sobre un semiconductor (Silicio) [13]

Al espacio dejado por el electrón liberado se le denomina hueco y dispone de carga eléctrica positiva de igual magnitud que el electrón, pero de signo contrario. En las zonas donde se ha expuesto un semiconductor a la luz solar ocurre esta generación de huecos y liberación de electrones. El problema inicialmente era que los electrones liberados pasan a ocupar los huecos dejados por otros, esto quiere decir que los huecos y los electrones circulan en la misma dirección, restableciendo el enlace roto sin producir corriente eléctrica. Para que esto no ocurra se debe generar un campo eléctrico en el interior del semiconductor, con esto, los huecos y los electrones circularán en sentidos opuestos produciendo una corriente eléctrica.

El material más utilizado para la fabricación de células fotovoltaicas es el silicio. Una célula fotovoltaica de silicio está compuesta por dos regiones, para generar un campo eléctrico dentro de ésta, lo que se hace es tratar químicamente diferente a las dos regiones. A la primera se le han sustituido algunos átomos de silicio por átomos de fósforo, que posee 5 electrones de valencia, uno más que el de silicio, quedando así un electrón libre. A la segunda en cambio se ha sustituido al silicio por átomos de boro, que posee 3 electrones de valencia, uno menos que

el silicio, quedando un hueco disponible. De esta manera se logra que los electrones fluyan desde la zona tratada con fósforo hacia la zona tratada con boro y los huecos fluyan de manera contraria produciéndose en la unión un campo eléctrico conocida como unión p-n.



Figura 3-7: Unión p-n [14]

3.2.1 Células fotovoltaicas

Son dispositivos capaces de transformar los rayos del sol en energía eléctrica y están formados de material semiconductor, normalmente de silicio. Aunque el silicio es el material más abundante en la Tierra después del oxígeno, ya que se encuentra en casi todas las rocas, para la fabricación de las células fotovoltaicas se necesita en su forma cristalina y sin imperfecciones. El proceso para llevar al silicio a su forma cristalina es complejo y costoso.

Las células fotovoltaicas están compuestas por una delgada capa de material tipo n (electrón libre) y otra de mayor espesor de material tipo p (hueco disponible), en la unión de estas capas se forma el campo eléctrico. Además, se coloca un conductor externo que conecta la capa negativa a la positiva, generándose así el flujo de electrones o corriente eléctrica desde la zona p a la zona n. La superficie de la zona n es la de la cara que se ilumina y mientras siga siendo iluminada por la luz del Sol habrá corriente eléctrica y su intensidad será proporcional a la cantidad de luz que reciba.

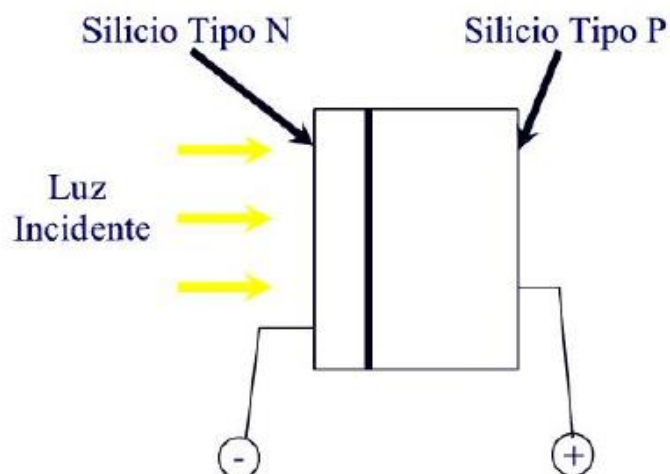


Figura 3-8: Célula fotovoltaica [15]

3.2.1.1 Tipos de células fotovoltaicas

Existen varios tipos de células fotovoltaicas en función de los materiales semiconductores con los que han sido fabricadas y son las siguientes:

- **Células de arseniuro de galio:** Son las más recomendables para la fabricación de módulos, ya que en su versión monocristalina el rendimiento llega hasta el 28%. El principal inconveniente es el elevado coste de este material. Sus principales características son su elevado coeficiente de absorción y sus bajas pérdidas de eficiencia a elevadas temperaturas, por lo que son muy utilizadas en sistemas de concentración.



Figura 3-9: Sistema de concentración [16]

- **Células de sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre:** La ventaja de este sistema es que se utiliza muy poco material en su proceso de fabricación. Por el contrario, su rendimiento es muy bajo, llegando en la práctica a valores del 5%. El mayor problema es su degradación en el transcurso del tiempo y la tecnología con la que se producen no está desarrollada así que aún se necesitan muchos estudios para mejorar esta técnica.
- **Células bifaciales:** Están fabricadas con una doble unión del tipo n+-p-p+ de tal manera que la célula puede absorber radiación por sus dos caras, aprovechando también la que

es reflejada desde el suelo. Su rendimiento es mayor que las células monofaciales, pero por el contrario sus costes de fabricación también se elevan. Por estos motivos actualmente no se utilizan.



Figura 3-10: Células bifaciales [17]

- **Células de silicio amorfo:** La gran ventaja de éstas es que el espesor de las células fotovoltaicas puede ser 50 veces más fino que el de las de silicio monocristalino. Además, presentan un alto grado de absorción y al ser compuestas por menos cantidad de material su fabricación es más económica. Sus desventajas son, que su rendimiento es menor al 10%, mucho menor que las de silicio monocristalino (15-18%), y su alto grado de degradación al entrar en contacto con el sol. Actualmente son muy utilizadas en calculadoras y relojes donde su durabilidad no es un factor determinante. En la actualidad se está investigando muchas variaciones en el proceso de fabricación para hacer de estas células más eficientes y ya se han alcanzado rendimientos de hasta 12,24% [18].



Figura 3-11: Calculadora con energía solar

- **Células de silicio policristalino:** Su proceso de fabricación es similar al del silicio monocristalino, pero no necesita un riguroso control de temperatura en su etapa de enfriamiento. Su rendimiento llega al 14%, su costo es ligeramente más económico que el del monocristalino y su ventaja es que se pueden producir directamente células de forma cuadrada sin necesidad de cortes posteriores. Anteriormente estas células no eran muy utilizadas ya que la diferencia de costo con respecto a las monocristalinas era mínima, pero estudios actuales indican que hay nuevas tecnologías que harán que las células policristalinas vuelvan a competir con las tecnologías tradicionales [19].



Figura 3-12: Módulos con células de silicio policristalino

- **Células de silicio monocristalino:** Son las células más utilizadas en la actualidad, su estructura es completamente ordenada. El proceso para llegar a la monocristalización requiere de mucho tiempo y energía, por esta razón su elevado costo. Se lo obtiene dopando silicio puro con boro y su rendimiento llega hasta el 18%. Actualmente se está investigando en procesos de bajo coste que aumenten su rendimiento mediante la utilización de nano partículas de plata, llegando a aumentarlo en un 2,3% [20].



Figura 3-13: Módulos con celdas de silicio monocristalino

3.2.1.2 Rendimiento

El rendimiento de las células fotovoltaicas está definido como el cociente entre la máxima potencia de generación eléctrica y la potencia luminosa que se aplica sobre una célula fotovoltaica. Por ejemplo, si una célula tiene un rendimiento del 10%, esto quiere decir que por cada 100 W que recibe, solamente genera 10 W.

Los factores que provocan que los rendimientos de las células fotovoltaicas sean bajos son los siguientes [4]:

- **Energía de los fotones incidentes:** Quiere decir que los fotones de luz solar no tienen la suficiente energía para romper el enlace del núcleo con el electrón y no permiten la generación del par electrón-hueco. O puede pasar también que los fotones de luz tengan demasiada energía, en este caso lo que pasa es que la energía excedente se desperdicia en forma de calor. Por este factor, se puede perder hasta un 50% de rendimiento en la generación de energía eléctrica de una célula.
- **Recombinación:** Por razones atribuibles al proceso de fabricación, una parte de los electrones liberados se vuelven a combinar con huecos cercanos sin generar corriente eléctrica. Por este factor se puede perder hasta un 15% de rendimiento.
- **Reflexión:** La luz del Sol es reflejada por la célula, aunque actualmente se está investigando en varios recubrimientos que bajan el valor de las pérdidas a un 10%.
- **Otros:** Por calentamiento del silicio se estima que se pierde un 2%. Por las sombras generadas por los contactos eléctricos por los que circulan los electrones liberados se estiman pérdidas del 10%.

Después de restar todas estas pérdidas queda como resultado el porcentaje de rendimiento de las células fotovoltaicas. En la actualidad se están realizando numerosas investigaciones para poder bajar estos porcentajes de pérdidas y lograr células más eficientes.

3.3 Panel o módulo fotovoltaico

Las características mecánicas y eléctricas de la mayoría de células solares fotovoltaicas actuales impiden su aplicación directa tal y como son fabricadas, por lo que la pieza base que se utilizará en la implementación de los sistemas solares fotovoltaicos es el módulo solar fotovoltaico.

La potencia, tensión y corriente de un modo fotovoltaico dependerá del número de células solares asociadas en serie o en paralelo, del tipo de células utilizadas en su construcción y de las condiciones de trabajo.

La radiación que alcanza a la superficie del módulo fotovoltaico y la temperatura de trabajo de las células fotovoltaicas determinan mayoritariamente los parámetros eléctricos de operación de un módulo fotovoltaico. Además de las células fotovoltaicas, en un módulo se precisan de elementos que aseguren la estanqueidad del conjunto, proporcionen buenas cualidades mecánicas al conjunto, permitan que el máximo de radiación solar alcance a la célula

fotovoltaica y permitan la conexión eléctrica y mecánica del módulo con otros módulos similares.

El tipo de corriente eléctrica que proporcionan es corriente continua, por lo que si se necesita corriente alterna o aumentar su tensión, se tendrá que añadir un inversor y/o un convertidor de potencia.

Entre un 80% y un 94% de la energía solar incidente sobre un módulo fotovoltaico se pierde en forma de calor, según la tecnología de fabricación de la célula fotovoltaica. Aproximadamente entre un 13% y un 20% de la energía solar es transformada en energía eléctrica en los módulos actuales de silicio mono y policristalino. Debido a esta baja eficiencia en la conversión de la luz solar en electricidad, es por lo que se precisan grandes superficies de módulos fotovoltaicos para conseguir potencias elevadas. La eficiencia de la conversión de una célula solar fotovoltaica se define como el cociente entre la energía eléctrica generada por el módulo y la energía solar incidente sobre el módulo.

La vida útil media a máximo rendimiento se sitúa en torno a los 25 años, período a partir del cual la potencia entregada disminuye.

3.3.1 Características físicas del módulo

Los módulos o paneles fotovoltaicos son estructuras que están compuestas por células fotovoltaicas. Por lo general contienen entre 40 y 80 células fotovoltaicas y su tamaño varía entre los 0,80 m² y los 2 m².

Generalmente se puede decir que los módulos se encuentran conformados por los siguientes componentes [4]:

- **Cubierta exterior:** Es de vidrio templado, ya que es resistente y permite el paso de la radiación solar. Su función es la de proteger a todos los componentes del panel de los fenómenos atmosféricos.
- **Capas encapsulantes:** Principalmente son de silicona, etil-vinilo-acetileno (EVA) o polivinilo butiral o de cualquier material que tenga buena transmisión de la radiación solar y que no se degrade ante los rayos ultravioletas. Su función, aparte de adherir las cubiertas, es la de amortiguar las posibles vibraciones e impactos.
- **Protección posterior:** Por lo general es de materiales acrílicos, siliconas, pero actualmente los más utilizados son: TEDLAR (fluoruro de polivinilo) o EVA. Sirve para proteger al panel de los agentes atmosféricos, principalmente de la humedad.
- **Marco de soporte:** Es de aluminio o de acero inoxidable. Sirve para dar soporte a todo el conjunto y como elemento de unión mecánica entre módulos.
- **Contactos eléctricos:** Son cables de cobre que permiten recoger a la energía que entrega el módulo y se encuentran en la parte posterior del módulo en una caja que los protege

de la humedad. También pueden estar compuestos por elementos de protección como diodos de bypass que lo protegen de las sombras parciales.

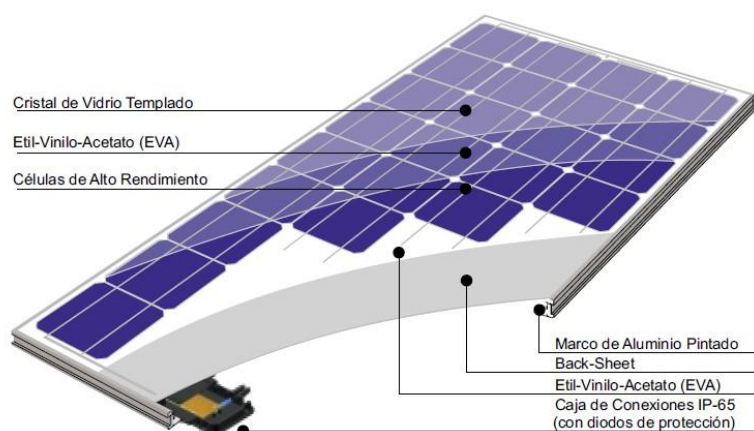


Figura 3-14: Sección de un módulo fotovoltaico [21]

Si se habla en términos de potencia, además de los factores ambientales de irradiación y temperatura, la potencia que un módulo puede entregar depende del rendimiento de sus células fotovoltaicas y de la resistencia de la carga. En definitiva, un generador fotovoltaico es la unión de varios módulos para satisfacer determinadas necesidades energéticas.

3.3.2 Asociación de módulos fotovoltaicos

Como norma general nunca se conectarán entre sí módulos de distintas características ni de distintos fabricantes. Esto se hace para optimizar la producción de energía y reducir así las pérdidas ocasionadas por dispersión de características.

Para el conexionado tenemos tres posibilidades: serie, paralelo y mixto.

- **Asociación en serie:** la conexión en serie de los módulos fotovoltaicos aumenta la tensión a la salida del grupo al sumar la tensión de cada uno de los módulos conectados en serie mientras que la corriente que circula es la misma para todos y cada uno de los paneles.

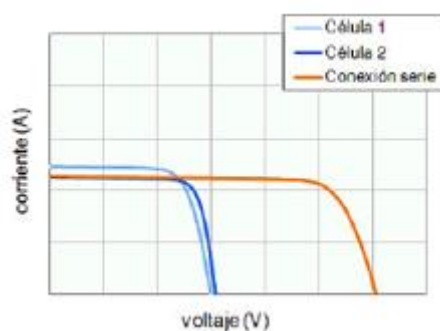


Figura 3-15: Curva IV de un módulo conectado en serie

- **Asociación en paralelo:** la conexión en paralelo de las células fotovoltaicas aumenta la corriente de salida del módulo al sumarse todas las corrientes generadas por las células conectadas en paralelo mientras que la tensión es la misma para todas las células.

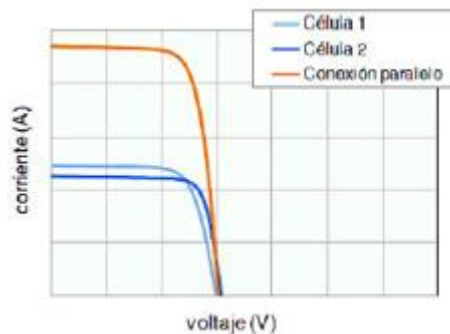


Figura 3-16: Curva IV de un módulo conectado en paralelo

- **Asociación mixta:** La tensión total y la intensidad total en módulos conectados mediante conexión mixta dependerán de los módulos conectados en serie y en paralelo.

3.3.3 Problema del punto caliente

Se dice que hay un punto caliente en un panel solar fotovoltaico cuando una de sus células (o conjunto de ellas) está averiada o bajo sombra. En estas condiciones, los reajustes de tensiones que se originan pueden invertir el sentido de la corriente en alguna rama, de modo que la célula pasa de elemento generador a consumidor. Para evitarlo, se conectan diodos de protección o bloqueo (o by-pass) en paralelo con un grupo de células conectadas en serie, éstos permiten el paso de corriente de otros grupos en una misma dirección e impidiendo el paso en sentido contrario.

En la siguiente figura se muestra un esquema de funcionamiento de los diodos de protección o by-pass.

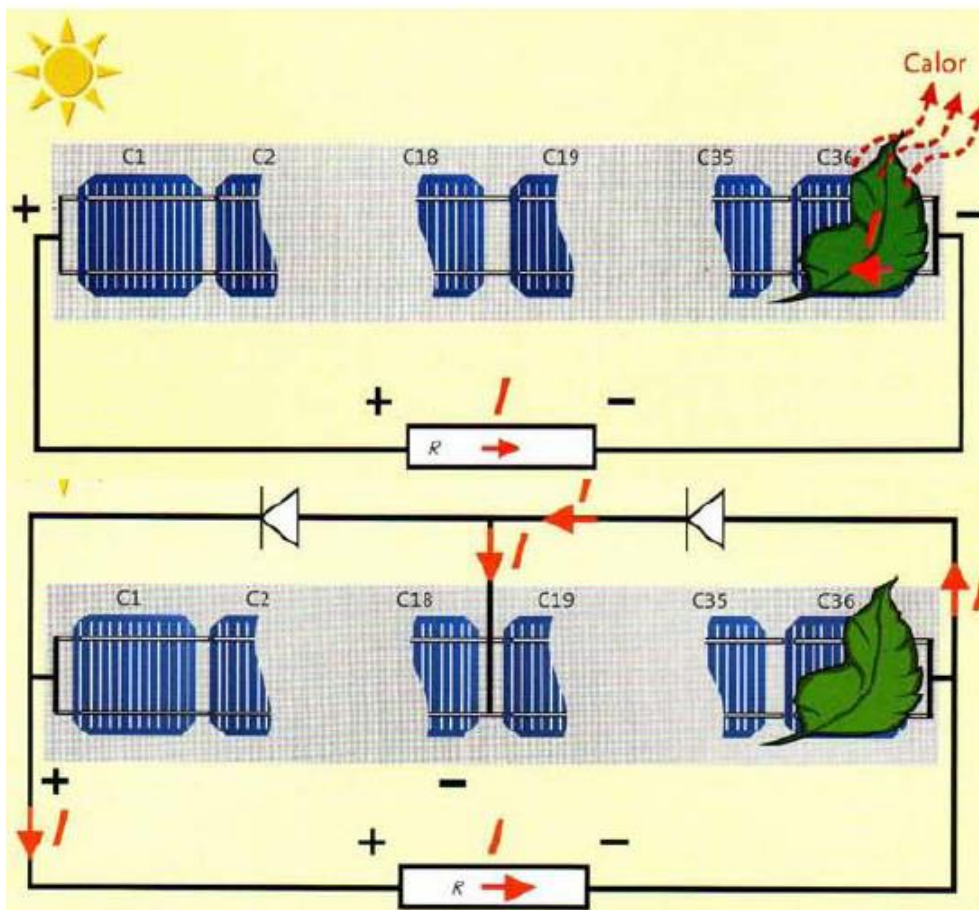


Figura 3-17: Esquema de funcionamiento de los diodos by-pass

Cualquier sistema fotovoltaico aislado debería tener diodos de bloqueo como sistema de protección de los generadores y así cumplir sus dos misiones principales:

- Prevenir que la batería se descargue sobre el módulo por la noche.
- Bloquear los flujos de corriente inversos de ramas en paralelo deterioradas sombreadas durante el día.

3.3.4 Orientación e inclinación

Para que un panel solar genere la máxima potencia, los rayos de Sol deben incidir lo más perpendicular posible sobre el panel. Para conseguir este objetivo, se tiene que variar la orientación e inclinación del panel siguiendo al Sol a lo largo del día, lo que se consigue con un seguidor solar, pero supone un sobrecoste y complica la instalación por lo que normalmente la solución más ventajosa es dejar el panel en una estructura fija.

En el supuesto que la instalación de los paneles sea sobre una estructura fija, se tendrán que tener en cuenta una serie de condicionantes para conseguir aprovechar al máximo la radiación solar, que varía según el horario y también el periodo del año.

En España, por estar en hemisferio norte, los paneles deberán orientarse dirección sur, que es la dirección hacia donde encontramos el Sol. Por otra parte, se sabe que el Sol está más alto en verano que en invierno y se pretende que los rayos de Sol lleguen perpendiculares al panel, por lo tanto, para mejorar la captación de los paneles deberán estar más tumbados en los meses de verano que en los meses de invierno.

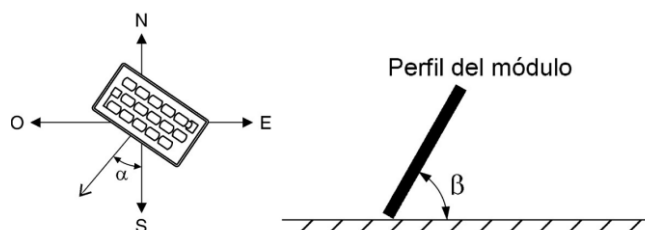


Figura 3-18: Orientación e inclinación del módulo fotovoltaico

Para determinar la inclinación óptima se debe tener en cuenta si la máxima generación es más interesante obtenerla en verano, en invierno o durante todo el año.

3.4 Sistemas de generación

3.4.1 Sistemas fotovoltaicos aislados

Los sistemas fotovoltaicos aislados son interesantes en los siguientes casos:

- Zonas donde el acceso a las redes de distribución eléctrica es difícil.
- Zonas donde la salvaguarda del medio ambiente es prioritaria.
- Cuando el coste de la instalación y mantenimiento de unas líneas de distribución de suministro no es rentable.

De acuerdo a los elementos que los componen, los sistemas fotovoltaicos se pueden dividir en tres tipos:

- **Directamente conectados a una carga:** Es el más simple de todos. El generador fotovoltaico se conecta directamente a un motor de corriente continua. Se utilizan principalmente para bombeo de agua.

Esquemáticamente este es su modelo:



Figura 3-19: Esquema sistemas conectados a una carga

- **Con regulador y batería:** Es utilizado con módulos que por lo general son de 33 o 36 células. El generador está conectado a un regulador de carga, luego a la batería y esta a

su vez a un motor de corriente continua. Este sistema es muy utilizado en alumbrado público.



Figura 3-20: Alumbrado público [22]

Esquemáticamente este es su modelo:

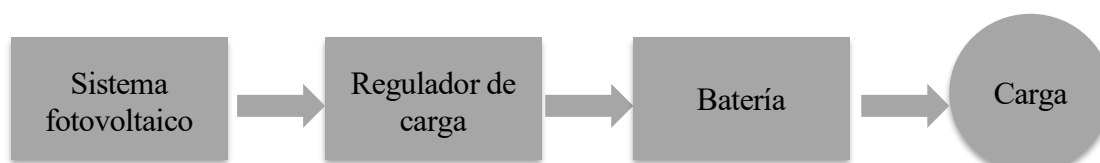


Figura 3-21: Sistema con regulador y batería

- **Con regulador, batería e inversor:** Se utiliza cuando los requerimientos de energía son en corriente alterna, aunque también puede alimentarse energía en corriente continua simultáneamente. Es el más utilizado para alimentar de energía a una vivienda. Esquemáticamente este es su modelo:

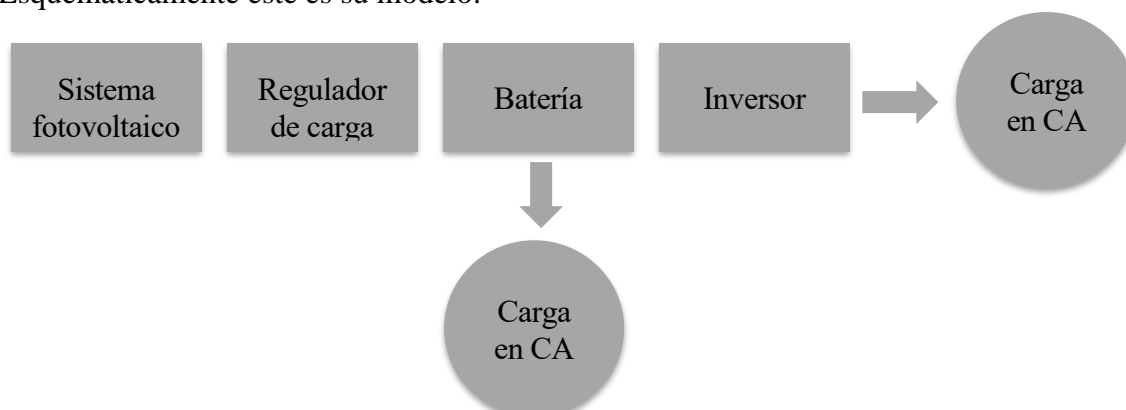


Figura 3-22: Sistema para corriente continua y alterna

El sistema fotovoltaico aislado es muy versátil y posee muchas ventajas como, por ejemplo [23]:

- Alta fiabilidad.
- Bajos costos de operación.
- Beneficios medioambientales.

- Modularidad.
- Operación diurna y nocturna.

3.4.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Este sistema permite entregar energía a la red pública. En muchos países existen leyes que regulan todos los aspectos técnicos y económicos, aunque en muchos países con economías emergentes todavía se deben implementar este tipo de legislaciones.

Las principales ventajas de este sistema son las siguientes:

- Bajos costos de mantenimiento.
- Poco riesgo de avería.
- Beneficios medioambientales.
- Recuperación de la inversión.

Esquemáticamente su modelo es el siguiente:

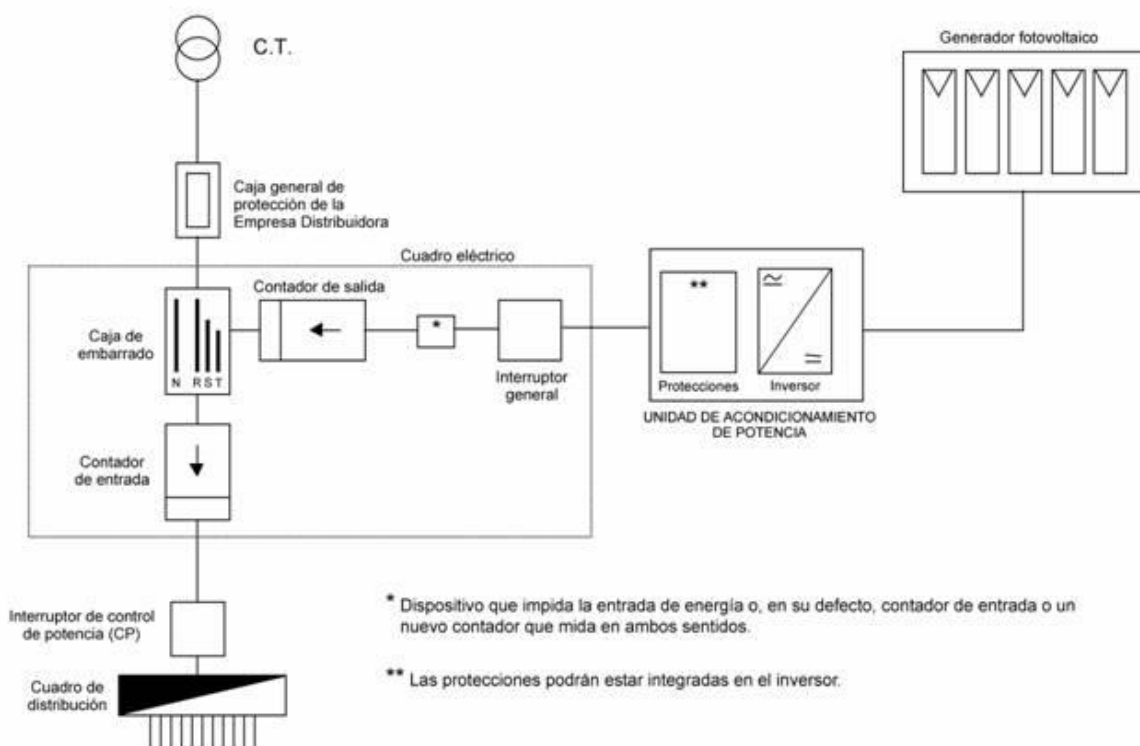


Figura 3-23: Instalación conectada a red [7]

3.5 Ventajas e inconvenientes de las instalaciones fotovoltaicas

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes más prometedoras de las energías renovables en el mundo. Comparada con las fuentes no renovables, las ventajas son claras:

- Como procede de una fuente de energía renovable, sus recursos son ilimitados.

- Su producción no produce ninguna emisión, es decir, es una energía muy respetuosa con el medio ambiente.
- Los costos de operación son muy bajos.
- El mantenimiento es sencillo y de bajo coste.
- No solo se puede integrar en las estructuras de construcciones nuevas, sino también en las ya existentes.
- No produce ruidos, es totalmente silenciosa.
- Ofrece una elevada fiabilidad y disponibilidad operativa excelente.

Además de las ventajas ambientales también se deben tener en cuenta las ventajas socio-económicas.

- Instalación simple.
- Tienen una vida larga (aproximadamente 30 años).
- Resisten condiciones climáticas extremas: granizo, viento, temperatura, humedad.
- No existe una dependencia de los países productores de combustibles.
- Puede instalarse en zonas rurales, desarrollo de tecnologías propias.
- Puede venderse el excedente de electricidad a una compañía eléctrica y además se puede aumentar la potencia mediante la incorporación de nuevos módulos fotovoltaicos.

En cuanto a los inconvenientes de este sistema de generación de energía, no es tanto el origen de dicha energía que es el Sol, que tiene reservas que exceden de nuestras necesidades, ni tampoco la materia prima de donde se extrae el silicio, que consiste en arena común muy abundante en la naturaleza: se trata de la técnica de construcción y fabricación de los módulos fotovoltaicos que es complejo y caro.

A continuación, se enumeran los principales inconvenientes de este tipo de tecnología:

- Los costos de instalación son altos, por lo que requiere de una gran inversión inicial.
- Producción variable según climatología del lugar y época del año.
- Para recolectar energía solar a gran escala se requieren grandes extensiones de terreno.
- El rendimiento obtenido se estima en solo un 15%.
- En cuanto a la energía actual, hay falta de elementos almacenadores de energía económicos y fiables.

4 SIMULACIÓN DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

4.1 Introducción

El estudio del comportamiento de instalaciones fotovoltaicas proporciona una información de gran utilidad en cuanto a la viabilidad y prediseño de instalaciones. Mediante las curvas de rendimiento, el comportamiento óptico y térmico, puede ser determinado, pero bajo unas condiciones muy específicas. Por tanto, el uso de estas curvas resulta insuficiente cuando se desea una información más precisa y lo más parecida posible a las condiciones reales de operación.

Las herramientas de simulación permiten obtener una información más realista y fiable en cuanto al comportamiento de todos los diferentes componentes que forman parte de la instalación solar fotovoltaica, las condiciones climáticas o los perfiles de carga; no sólo del sistema de captación.

Generalmente, el sistema se suele simular para períodos de un año, siendo necesaria la siguiente información:

- Parámetros del captador (coeficientes de la curva de rendimiento, modificador del ángulo de incidencia y área).
- Localización del sistema solar térmico y sus correspondientes condiciones climáticas.
- Condiciones de operación.

4.2 Herramientas de simulación

Actualmente, es fundamental la utilización de herramientas potentes y fiables para el cálculo y optimización de sistemas termoenergéticos. El avance en los últimos años de la potencia de cálculo de los ordenadores y de los métodos numéricos ha hecho posible la resolución de problemas en otra época inabordable. Los sistemas termoenergéticos se caracterizan por exhibir una dependencia no lineal con las características meteorológicas.

El análisis de sistemas altamente complejos como pueda ser un sistema de energía solar fotovoltaica puede realizarse de manera relativamente rápida con un software de simulación dinámica. La simulación dinámica es órdenes de magnitud más rápida y órdenes de magnitud más económica que la experimentación, en la que pequeños cambios en el sistema pueden significar costes de tiempo y económicos elevados.

Las herramientas de simulación están dirigidas a la realización de cálculos de mayor complejidad y amplitud, obteniéndose resultados precisos. Estos programas presentan una estructura modular y más o menos flexible, consistente en diferentes unidades que representan componentes del sistema (reales o virtuales) y que pueden ser modificados. Además, algunas herramientas permiten la programación y creación de nuevos componentes.

Existen multitud de programas de simulación para sistemas transitorios de estructura modular como son: TRNSYS, T*SOL, ColSim, INSEL, Polysun, Greenius, EXCEL-SOPRO; aunque el que se ha utilizado para la implantación del sistema solar fotovoltaico ha sido únicamente TRNSYS.

Además, cabe destacar el potente programa informático PVsyst que permite realizar el diseño, simulación y análisis de datos de una instalación fotovoltaica.

4.2.1 TRNSYS

TRNSYS (TRAnsient SYstem Simulator) es un programa de simulación para sistemas transitorios con una estructura modular. Este programa es ideal para análisis detallados de cualquier sistema cuyo comportamiento dependa del tiempo, habiéndose convertido por esto en un software de referencia para ingenieros e investigadores.

Sus aplicaciones más importantes incluyen: sistemas de energía renovable, donde destacan los sistemas solares (térmicos y fotovoltaicos), células de combustible o comportamiento energético de edificios.

TRNSYS fue inicialmente desarrollado en el Solar Energy Laboratory (SEL) de la Universidad de Wisconsin en 1975 y actualmente pertenece a la compañía americana Tess.

La naturaleza modular de esta herramienta le otorga al programa una gran flexibilidad y facilita la adición de modelos matemáticos no incluidos en la librería estándar de TRNSYS. La arquitectura basada en DLL permite a usuarios y terceros desarrolladores agregar fácilmente modelos de componentes, así como modificar estos mismos usando lenguajes de programación comunes (C, C ++, PASCAL, FORTRAN, etc.). Una DLL (Dynamic Link Library) es un conjunto de subrutinas enlazadas y compiladas en una unidad independiente de las aplicaciones que la utilicen. Dispone de una interfaz definida a través de la cual interacciona con los programas que la invocan. Esto permite que dos programas utilicen el código contenido en la librería sin necesidad de duplicar el espacio en memoria. Además, TRNSYS se puede conectar fácilmente a muchas otras aplicaciones, para preprocesamiento o posprocesamiento mediante llamadas interactivas durante la simulación (por ejemplo, Microsoft Excel, Matlab, etc.). TRNSYS reconoce un lenguaje de descripción del sistema en el cual el usuario especifica los componentes (denominados “type”) que constituyen el sistema y la manera en que están conectados.

La librería de TRNSYS incluye muchos de los componentes que se pueden encontrar normalmente en sistemas térmicos y eléctricos, así como una amplia base de datos climáticos

de todas partes del mundo y componentes para la recogida de los datos dependientes del tiempo de la simulación.

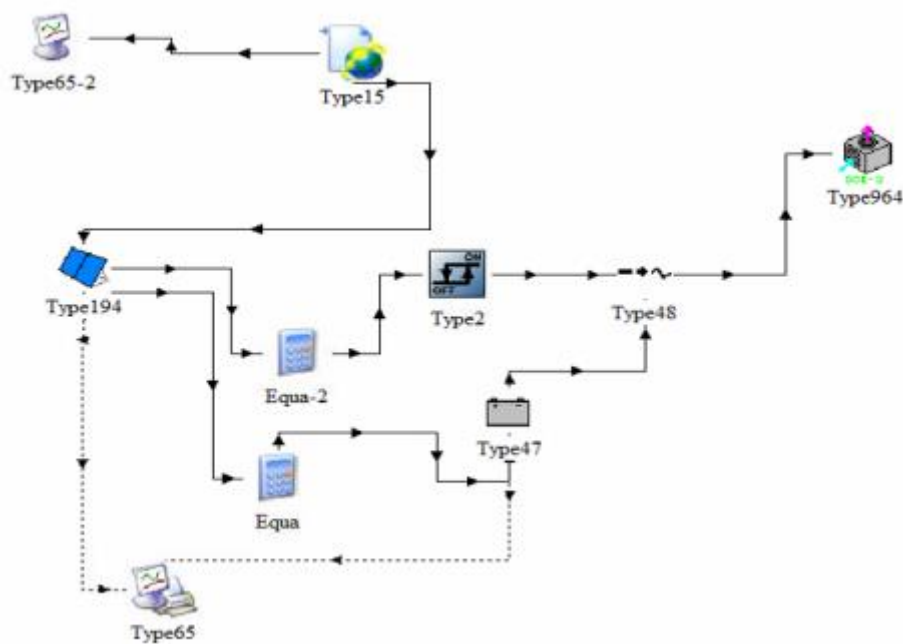


Figura 4-1: Esquema de un sistema solar fotovoltaico en TRNSYS

TRNSYS emplea un modelo de simulación cuasiestático. El programa consiste en subrutinas que modelan componentes del sistema. Los modelos matemáticos para los componentes del sistema se dan en términos de sus ecuaciones diferenciales o algebraicas. Con un programa como TRNSYS, que tiene la capacidad de interconectar componentes del sistema de cualquier manera deseada y resolver ecuaciones diferenciales, el problema de la simulación del sistema se reduce a un problema de identificar todos los componentes que forman el sistema particular y formular una descripción matemática general de cada uno.

Una vez que todos los componentes del sistema han sido identificados y se tiene una descripción matemática de cada componente disponible, es necesario construir un diagrama de flujo de información para el sistema. El objetivo del diagrama de flujo es facilitar la identificación de los componentes y el flujo de información entre ellos. Cada componente se describe como una caja negra, que requiere una serie de parámetros constantes y entradas (inputs) dependientes del tiempo y produce salidas (outputs) dependientes del tiempo. Además, una salida dada se puede usar como una entrada a cualquier otro componente.

La principal interfaz visual de este programa es TRNSYS Simulation Studio, desde donde se pueden crear proyectos arrastrando y soltando componentes (type) en el área de trabajo, conectándolos y estableciendo los parámetros de simulación globales. A la hora de realizar la simulación, esta interfaz guarda la información del proyecto en un archivo de proyecto Trnsys (*.tpf), así como un archivo de texto que contiene toda la información sobre la simulación, pero no contiene información gráfica.

Las simulaciones pueden realizarse con un paso de tiempo especificado por el usuario: desde varias horas hasta varios segundos, dependiendo del tipo de proceso que requiera ser estudiado. El paso de tiempo elegido es único para todos los componentes, es decir, no es posible definir diversos pasos de tiempo en una misma simulación.

Para calcular las prestaciones de una instalación, se suele simular ésta a lo largo de un año típico de la localidad. Este año no describe el clima de un año en concreto, sino que se trata de un año generado artificialmente de manera que describa las características medias del clima del lugar. Dicho año se divide en periodos de tiempos iguales y se resuelve el estado del sistema (temperaturas, flujos, señales de control, etc.) en cada intervalo. El paso de tiempo es la duración de estos intervalos y define la resolución temporal de la simulación.

Por ejemplo, si el paso de tiempo es de una hora, el año se divide en 8760 intervalos y el modelo se resuelve 8760 veces, una vez en cada intervalo. La simulación habrá generado series temporales de 8760 valores para cada variable. Estos resultados se procesan e integran para calcular las métricas mensuales y anuales que se recogen en el informe: demanda, consumos, eficiencias, etc [24]

5 ESTUDIO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO DE GENERACIÓN DE VAPOR

5.1 Introducción

El objetivo de esta simulación es la determinación del comportamiento de una instalación de energía solar fotovoltaica para generación de vapor en el sector industrial. En primer lugar, se estudiará un caso base, para posteriormente realizar un análisis paramétrico mediante la modificación de ciertos parámetros de la instalación. Todo esto se realizará con la ayuda de la herramienta de simulación TRNSYS.

5.2 Descripción del caso base

La finalidad de la instalación considerada es la producción de vapor para su uso industrial, cubriendo así parte de la demanda de vapor requerida por una industria o proceso industrial, con el objetivo de reducir el consumo de combustible de una industria convencional que utiliza gas natural como combustible.

Se va a diseñar la instalación comentada como caso base y posteriormente se realizará un análisis de sensibilidad, en el que se estudiará la influencia de la localidad, con el fin de obtener la mejor ubicación para este tipo de instalación, que va a depender de la radiación solar captada.

Se supone una demanda de 14 kg/h de vapor saturado desde las 8 horas a las 16 horas de cada día, a una presión absoluta de 3 bar y a una temperatura del vapor de 134 °C. En la siguiente figura se puede ver la demanda de vapor por mes necesaria en la instalación.

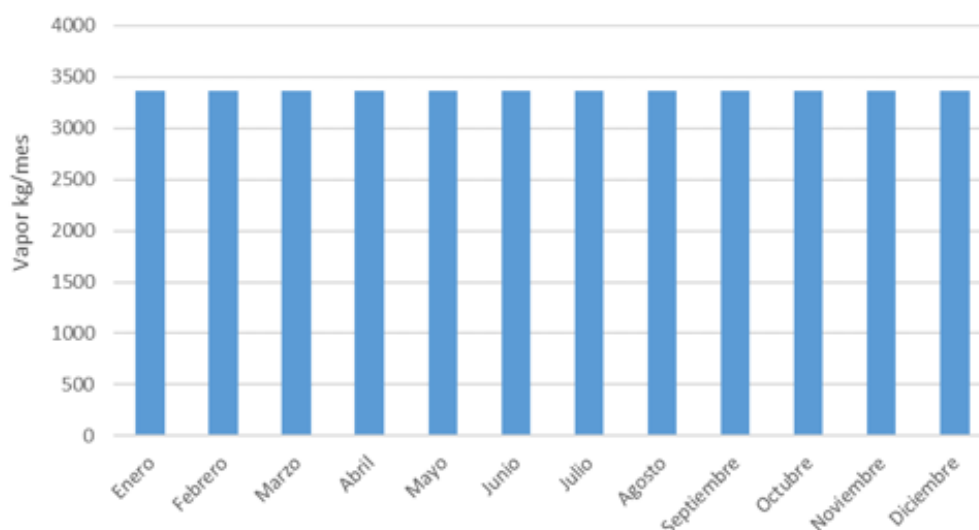


Figura 5-1: Demanda de vapor

El sistema deberá acoplarse a una instalación industrial existente en la que se supone que no existen problemas de espacio. En ella, la generación de vapor se produce de manera directa, es decir, el vapor es generado en una caldera eléctrica, alimentada con la electricidad generada por el sistema solar fotovoltaico. En la siguiente figura se representa un esquema de la instalación:

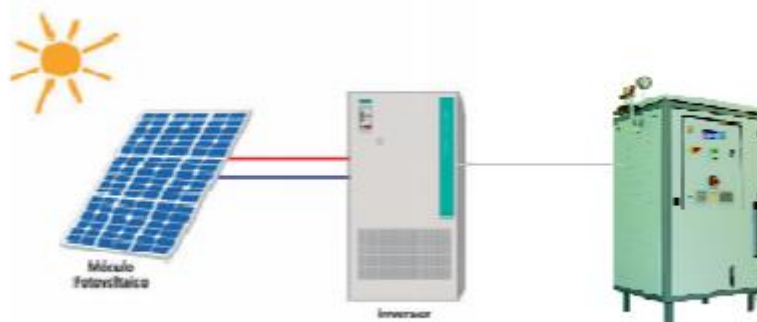


Figura 5-2: Esquema de la instalación

La instalación no dispone de almacenamiento de electricidad, por lo que únicamente se generará vapor cuando el sistema de captación disponga de energía suficiente para poner en funcionamiento la caldera eléctrica de vapor.

La instalación producirá más o menos vapor en función de la radiación solar captada. El vapor producido se incorpora a la línea de distribución de vapor convencional de la planta industrial. Mediante la producción de vapor en el sistema solar fotovoltaico se logra reducir la cantidad de vapor que es necesario generar en la caldera convencional, disminuyendo por tanto el consumo de ésta.

Como se ha comentado anteriormente, el vapor se produce en una caldera eléctrica, como la que se muestra en la figura, que es un generador de calor que emplea como fuente de alimentación la electricidad, en lugar de la tradicional quema de combustible. El vapor es generado mediante transferencia de calor a presión constante. El cuerpo de estas calderas alberga las resistencias eléctricas y todas las válvulas e instrumentos necesarios para interconexión con el proceso.



Figura 5-3: Caldera eléctrica de vapor

En cuanto a los parámetros que definen la instalación se recogen en la siguiente tabla, si bien la superficie de captación podría verse modificada si la demanda cubierta por la instalación considerada en principio fuese demasiado baja. Por tanto, los datos recogidos en la tabla constituyen un prediseño del sistema.

Tabla 3: Prediseño de la instalación solar fotovoltaica

Localidad	Sevilla	
Sistema de captación	Área de apertura total	$A_T = 65 \text{ m}^2$
	Área módulo	$A_m = 1,63 \text{ m}^2$
	Nº de módulos en serie	20
	Nº de módulos en paralelo	2
	Seguimiento	Superficie fija
	Eficiencia del módulo	$\eta = 15,35 \%$
Condiciones del vapor producido	Temperatura	$T_v = 134 \text{ }^\circ\text{C}$
	Presión absoluta	$P_v = 3 \text{ kg/cm}^2$
Caldera de vapor eléctrica	Potencia	$P = 10,5 \text{ kW}$
	Producción de vapor	14 kg vapor/h
	Eficiencia	$\varepsilon = 100 \%$

5.3 Simulación del caso base

Dada la dependencia no lineal del sistema analizado con las características meteorológicas será necesaria la simulación de éste para determinar su comportamiento termoenergético. Para ello se recurre al programa de simulación TRNSYS.

La simulación se realiza para un año completo (8760 horas), empleando un paso de tiempo de 0,1 hora con el objetivo de lograr una precisión mayor en los datos obtenidos. No obstante, al realizar la representación de dichos datos se tomará el promedio de los datos hora a hora para quitar las oscilaciones producidas por los sistemas de control. En la siguiente figura se puede ver el esquema de la instalación planteada.

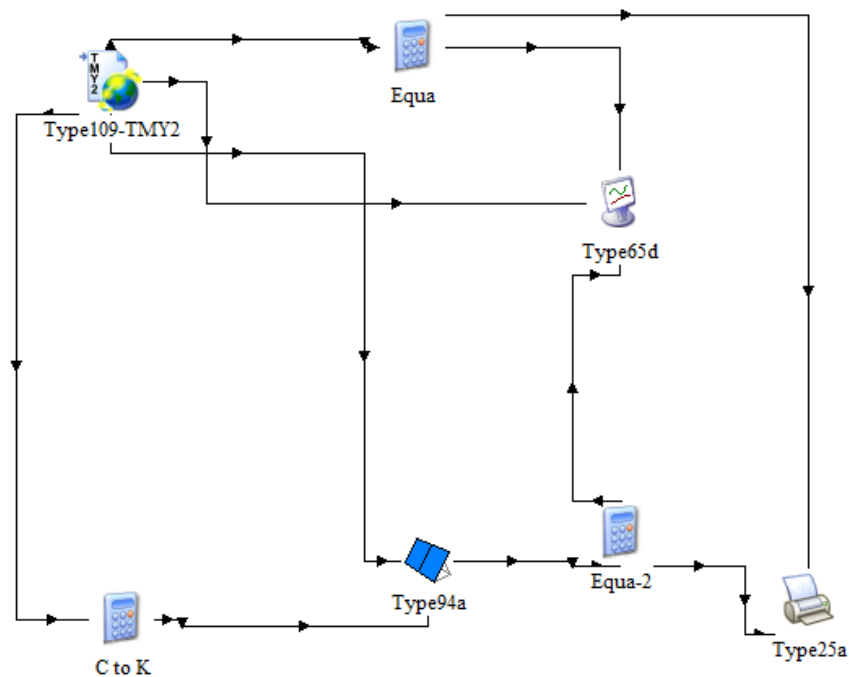


Figura 5-4: Esquema de la simulación en TRNSYS

En la figura 5-5, se muestra un registro anual de la radiación solar captada por los módulos fotovoltaicos de la instalación planteada en el caso base.

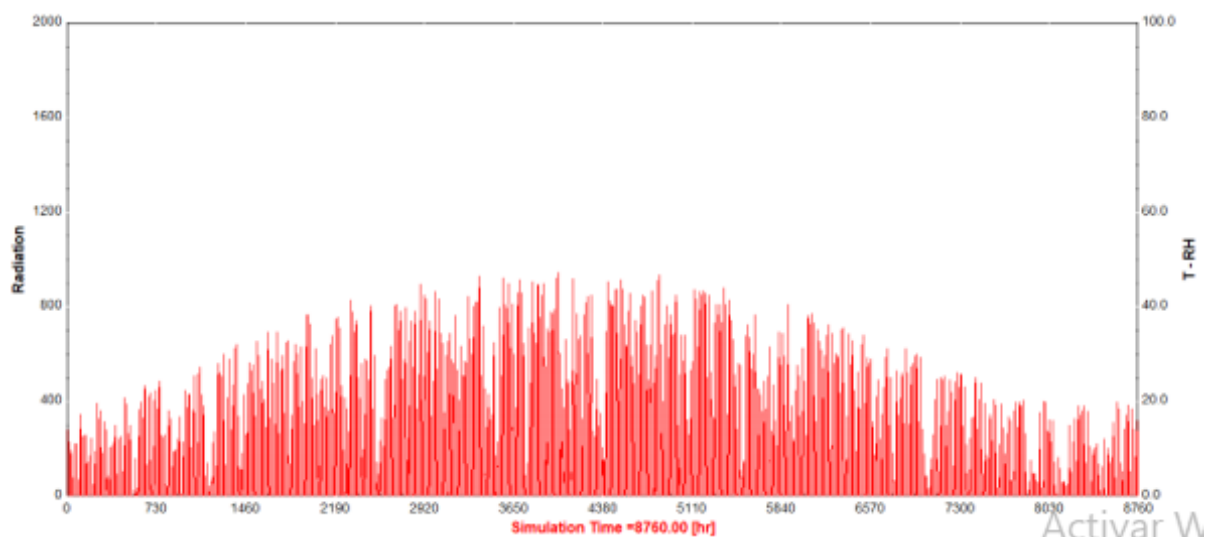


Figura 5-5: Radiación solar captada anual

Para la simulación de los módulos fotovoltaicos se ha recurrido al empleo de los coeficientes de la curva de rendimiento típicos de un panel de esta tipología y se han definido sus características en cuanto a superficie de captación, número de captadores en serie y en paralelo.

A continuación, se recogen todos los componentes de la simulación empleados junto con una breve descripción de ellos y los parámetros introducidos.

Tabla 4: Componentes utilizados en la simulación

Componente (Type)	Descripción	Parámetros introducidos
Type 109-TMY2	Proporciona los datos meteorológicos requeridos por los demás componentes de la instalación	Modo de seguimiento: 1 (Superficie fija)
Type 94a	Simula el campo de módulos fotovoltaicos	Nº de módulos en serie: 20 Nº módulos en paralelo: 2 Área del módulo: 1,628 m ²
Type 65d	Recoge los datos de forma gráfica	
Type 25a	Recoge los datos en una hoja de cálculo	
Equa	Proporciona un cambio de unidades de kJ/h a W	
C to K	Proporciona un cambio de unidades de °C a K	
Equa-2	Simula la función del inversor, pasando de corriente continua a alterna	El rendimiento del inversor empleado es del 98%

5.3.1 Determinación de la inclinación óptima

En este apartado se determinará la inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos para el caso base planteado.

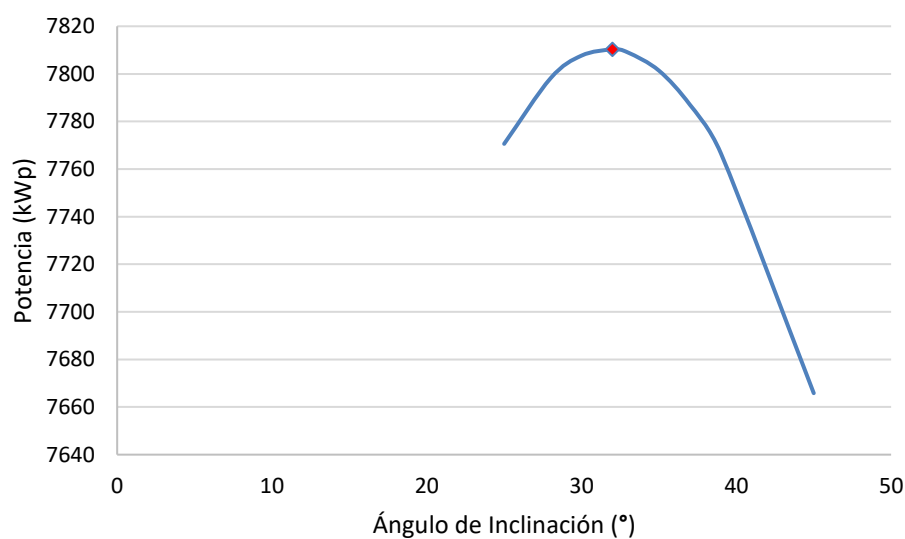


Figura 5-6: Inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos

En la figura anterior se puede ver que la inclinación óptima en Sevilla es de 32°, ya que es para esta inclinación se obtiene la mayor potencia en el módulo fotovoltaico. La potencia en kWp se ha obtenido mediante iteración en TRNSYS de la simulación del caso base.

5.3.2 Determinación del área de captación

A continuación, con la finalidad de obtener una idea del porcentaje de demanda (kg de vapor) que se cubre con la instalación supuesta, se realiza un estudio mes a mes.

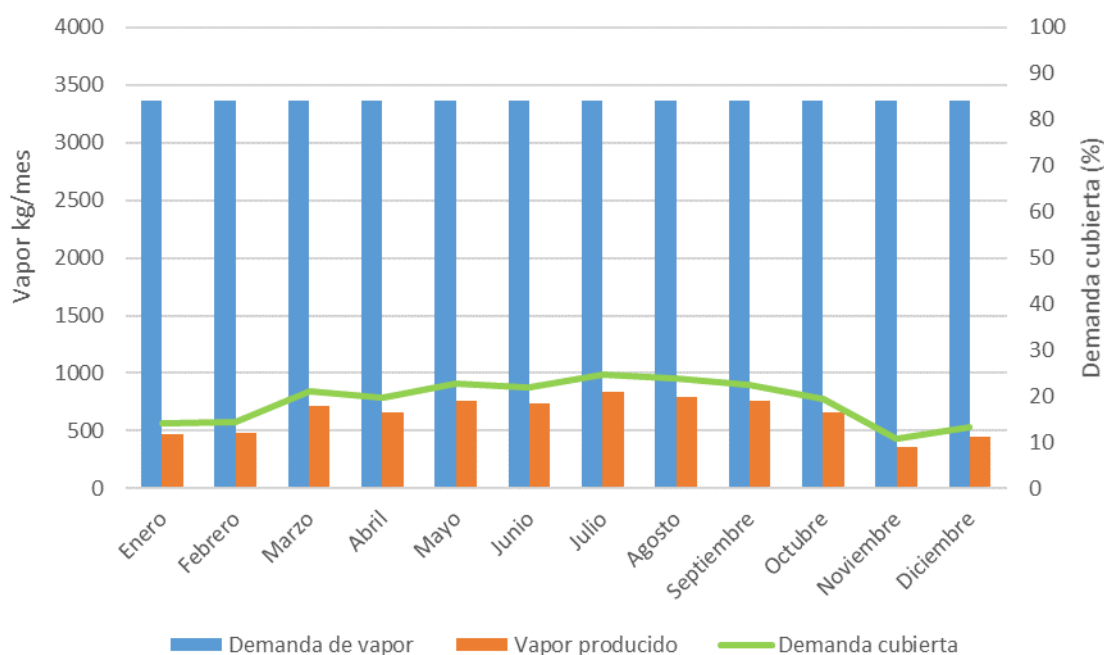


Figura 5-7: Demanda cubierta por la instalación inicial

El análisis muestra la gran diferencia entre el vapor requerido por la instalación y el vapor producido por el sistema solar fotovoltaico, por lo que el porcentaje de demanda cubierta resulta muy bajo, situándose en torno al 25% en el mejor de los casos. Por ello se decide aumentar el área de captación.

Para determinar la superficie de captación que tendrá el sistema se realiza un análisis de la demanda cubierta en función del área. Además, se estudia el exceso de vapor producido en función del área. Puesto que la instalación solar fotovoltaica no cuenta con sistema de almacenamiento, se considera que toda producción puntual de vapor por debajo de una potencia de 2 kW constituye una pérdida, ya que la caldera eléctrica de vapor utilizada en la instalación no puede funcionar por debajo de esta potencia.

En la gráfica puede observarse como a medida que aumenta el área de captación de la instalación aumenta la demanda cubierta anual, pero a partir de los 150 m² comienza a producirse vapor en exceso.

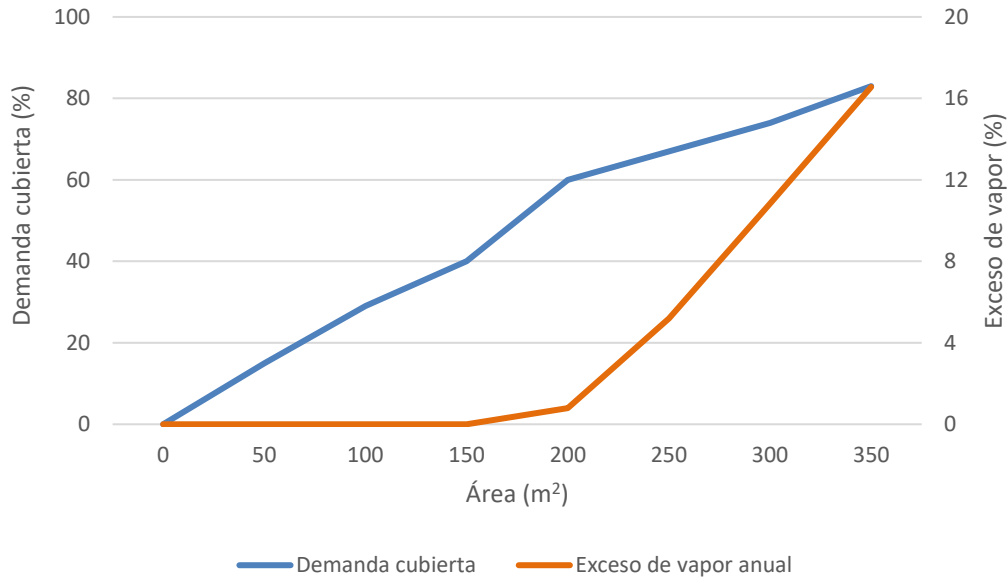


Figura 5-8: Influencia de la superficie de captación

Se opta por establecer un área de captación resultado del compromiso entre demanda cubierta y exceso de vapor. Por tanto, el área de captación seleccionada será de 150 m², lo que equivale a una potencia instalada de 25 kW, con la que se cubre un 40 % de la demanda anual de vapor.

En la siguiente gráfica puede observarse una dependencia casi lineal en cuanto al área de captación con el coste de los módulos fotovoltaicos.

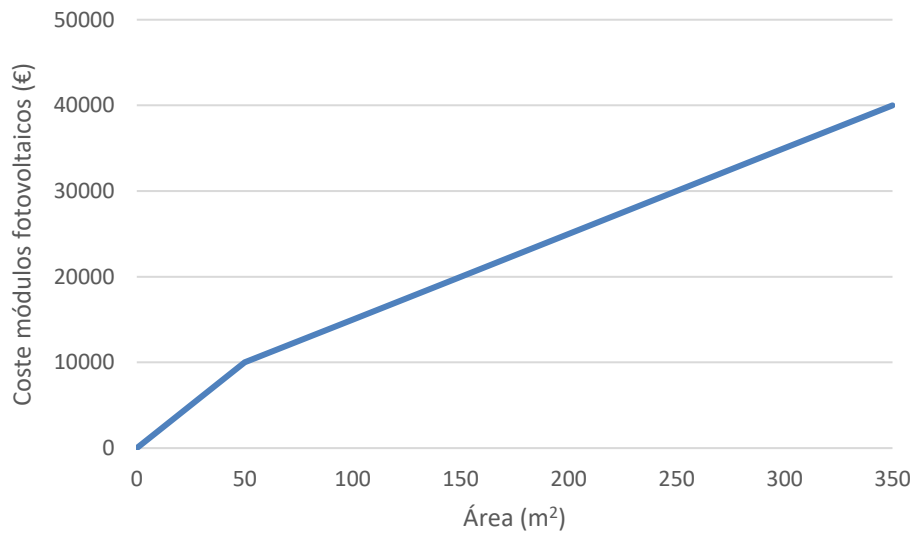


Figura 5-9: Variación del coste de los módulos en función del área

En la siguiente figura se puede ver que se alcanzan unos valores máximos en Julio del 78 % de demanda cubierta. En cuanto al exceso de vapor anual este es nulo.

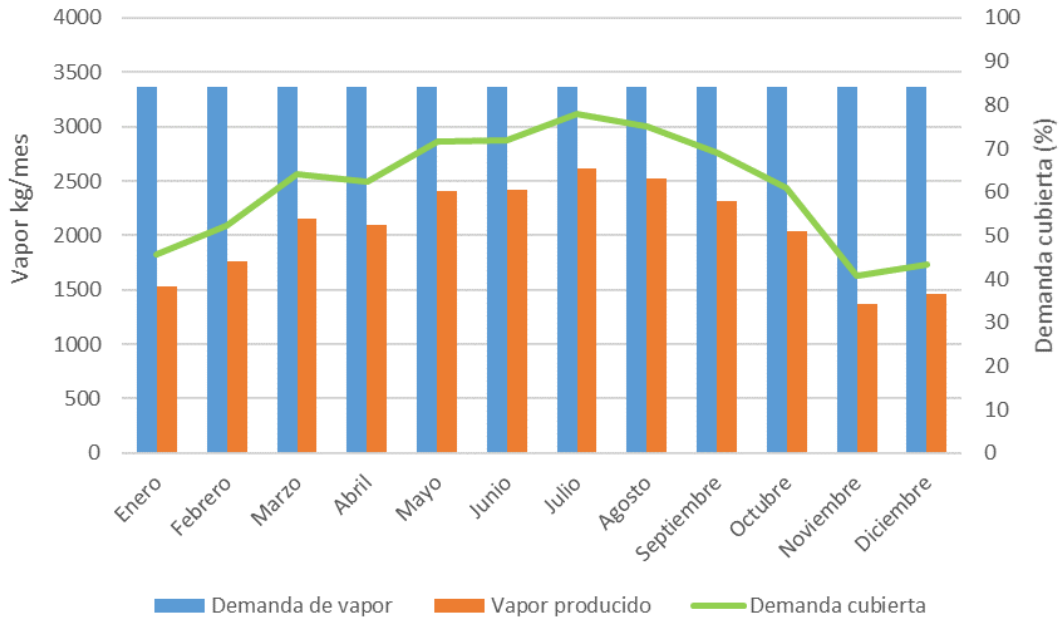


Figura 5-10: Demanda cubierta por la instalación del caso base

5.3.3 Análisis de la instalación

Concretadas las especificaciones de la instalación solar fotovoltaica, se realiza un análisis en base anual de la irradiación y a la energía captada por los módulos fotovoltaicos del caso base, representado en la siguiente figura. La curva de irradiación permite comprobar el correcto funcionamiento de la simulación en este aspecto mediante la comparación de estos datos con los proporcionados por diversas fuentes de información acerca de la radiación recibida según la localidad y época del año. La energía captada se define como aquella energía que proporciona la instalación de energía solar fotovoltaica, y da una idea del rendimiento de captación del sistema, en torno al 15 %.

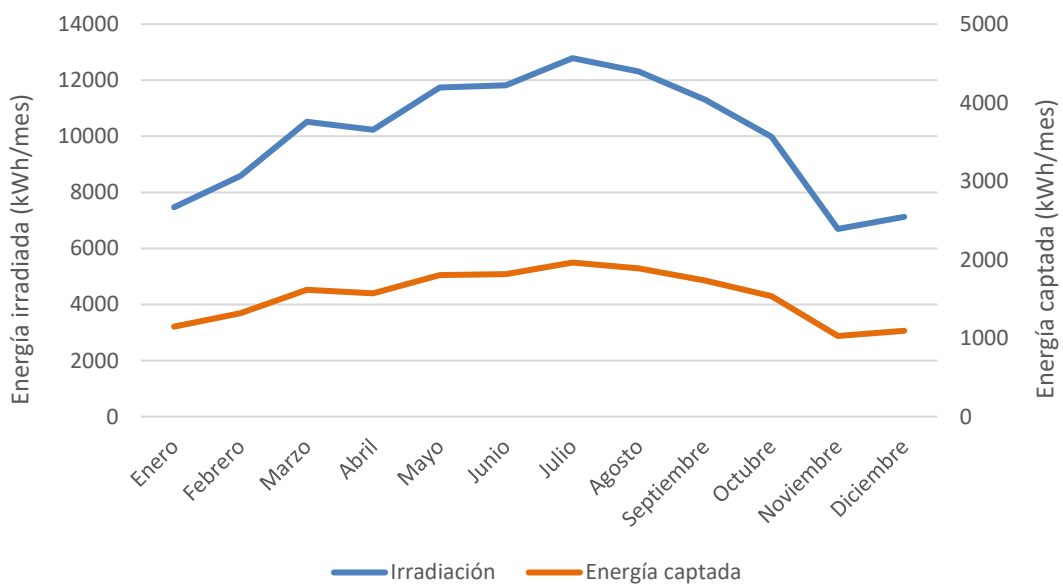


Figura 5-11: Valores mensuales de energía

Este análisis permite observar la gran influencia de la irradiación en el comportamiento de la instalación, ya que para meses de baja radiación la instalación genera menos energía útil, mientras que para el mes de mayor radiación (Julio) se genera más energía.

La comparación entre un día de alta radiación (Figura 5-12) y otro de baja (Figura 5-13) también permite observar esta disparidad. En concreto, se van a representar el día uno de julio para alta radiación y el día uno de noviembre para baja radiación. Observando las figuras puede verse como en un día de alta radiación la instalación es capaz de producir energía en la caldera eléctrica de vapor durante 9 horas, con una producción de vapor diaria equivalente a 49.66 kWh/día. En cambio, para baja radiación la instalación sólo proporciona energía durante 8 horas, con una producción de vapor equivalente a 46.25 kWh/día.

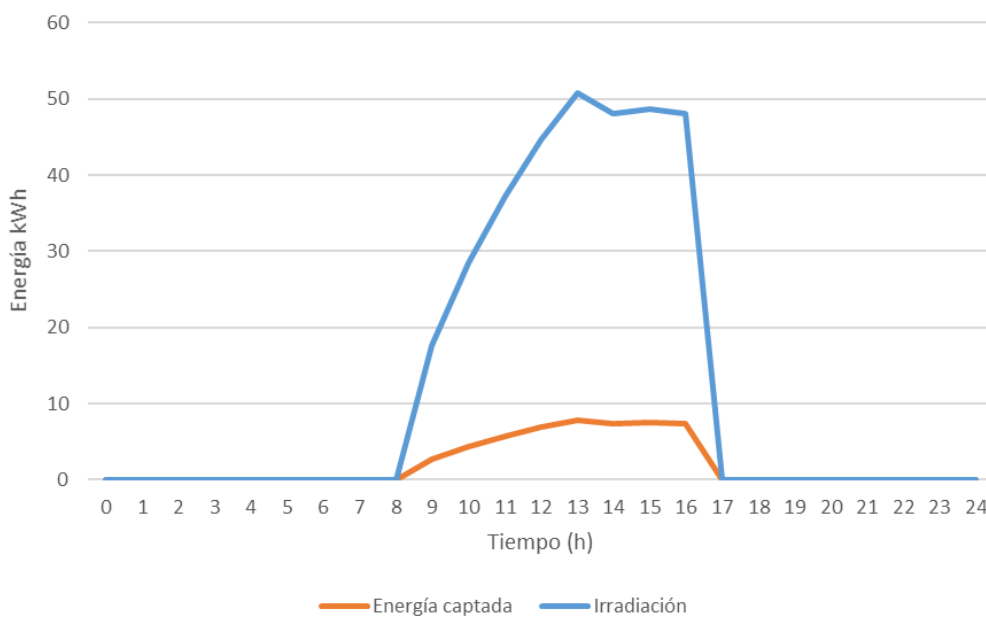


Figura 5-12: Valores diarios de energía (Alta radiación)

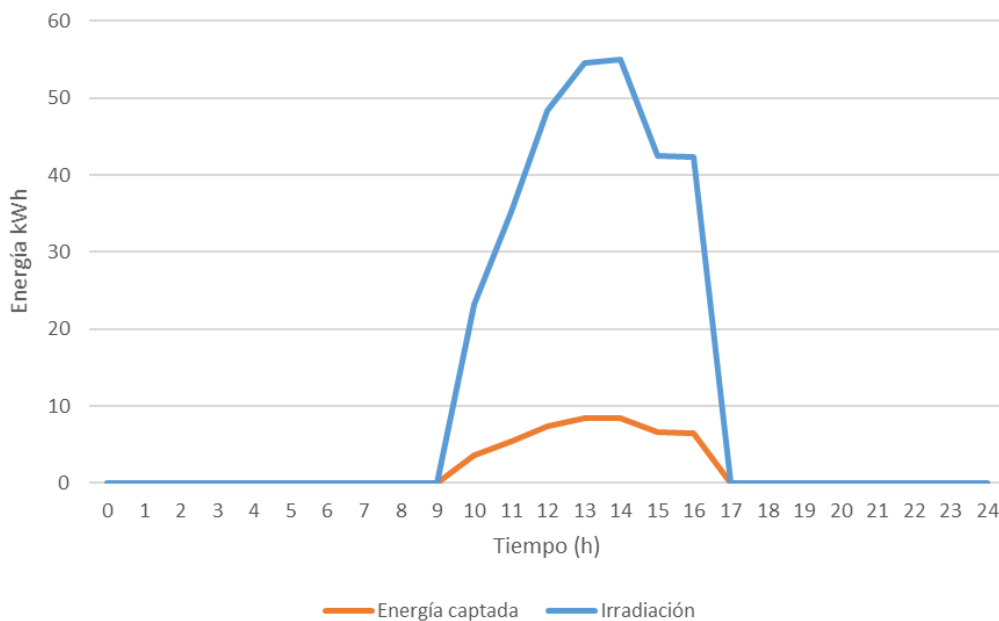


Figura 5-13: Valores diarios de energía (Baja radiación)

Esta diferencia de energía producida por la caldera de la instalación no es apreciable ya que el campo solar fotovoltaico es reducido (25 kW), pero a medida que se aumenta el número de módulos fotovoltaicos esta diferencia crece.

En el primer caso (alta radiación) se producen 75,75 kg de vapor al día, lo que resulta insuficiente para cubrir la demanda de vapor de la instalación, para cubrir la demanda de vapor de la instalación sería necesario sobredimensionar el campo solar fotovoltaico lo que no será viable ya que habría exceso de vapor y no es rentable. Por el contrario, en un día de baja radiación se llegan a producir 61,67 kg de vapor.

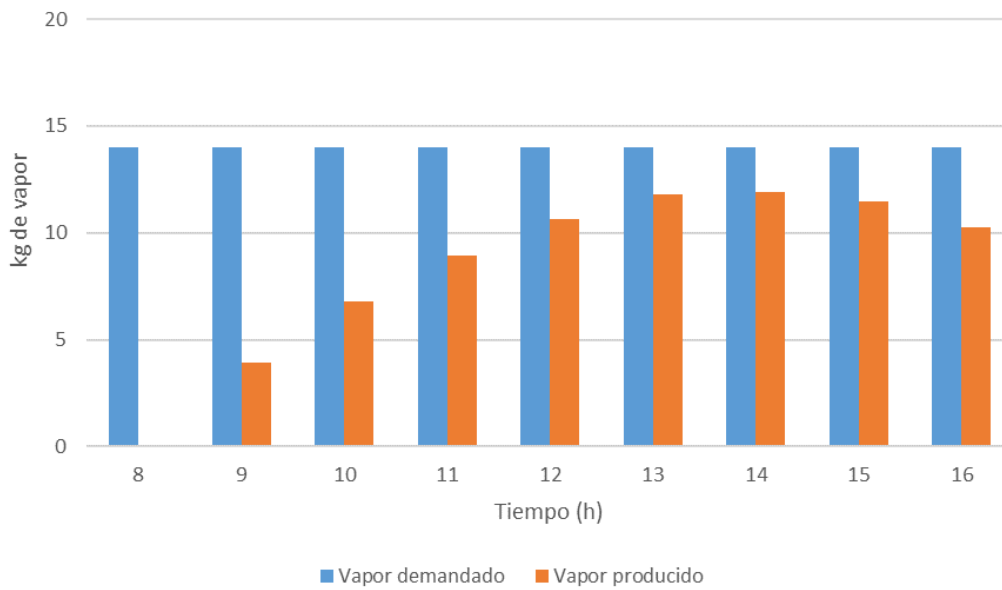


Figura 5-14: Comportamiento del sistema en un día de alta radiación

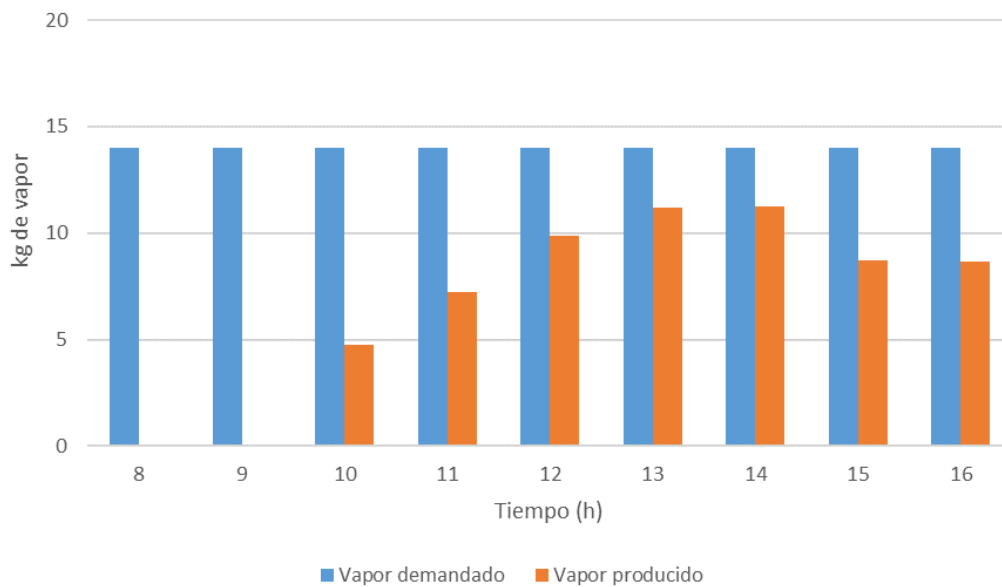


Figura 5-15: Comportamiento del sistema en un día de baja radiación

5.4 Análisis de sensibilidad

En este apartado se determinará la influencia de ciertas variables que tienen un peso importante en el comportamiento del sistema de energía solar fotovoltaica. Para ello se modificará la variable estudiada, manteniendo constantes el resto de parámetros de la instalación. Concretamente se estudiará la influencia de la localidad

Se estudia, en base anual, la irradiación, la energía captada y el vapor producido por la caldera de vapor en tres localidades diferentes, correspondientes a zonas climáticas distintas. Estas localidades serán Sevilla, Santander y Budapest. A continuación, se muestra una tabla con todos los valores para cada localidad, al igual que se ha hecho para el caso base explicado anteriormente. Como se ha comentado la instalación solar fotovoltaica elegida será de 25 kW y será constante para cada localidad.

Tabla 5: Valores anuales en función de la localidad

Ubicación	Irradiación (kWh/año)	Energía captada (kWh/año)	Vapor producido (kg/año)	Demanda cubierta (%)
Sevilla	120.552,88	18.504,85	24.673,13	61,19
Santander	85.117,96	13.065,59	17.420,79	43,20
Budapest	79.813,28	12.251,32	16.335,1	40,51

La conclusión que puede obtenerse de la tabla anterior es la gran influencia de la irradiación en la energía captada, así como en el vapor anual producido. Por lo tanto, este sistema tendrá escasa rentabilidad en zonas de bajas radiación, como se ha podido comprobar en Budapest.

Si se representan los datos de la tabla en cuanto a la demanda cubierta se puede ver la fuerte dependencia lineal con la irradiación.

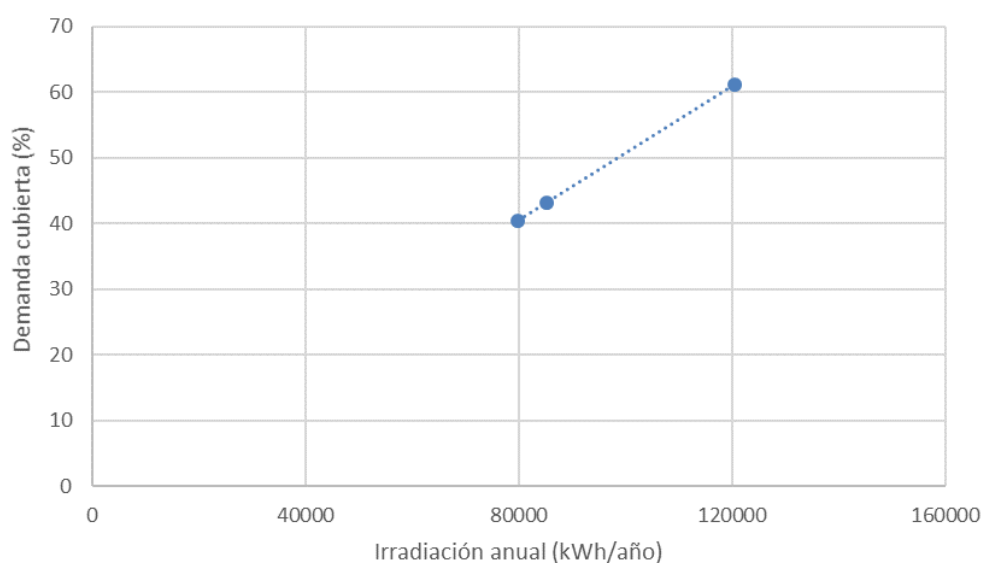


Figura 5-16: Dependencia de la irradiación con la demanda cubierta

6 PRESUPUESTO

En concepto de coste total de la instalación solar fotovoltaica hay que incluir todos los gastos. Esto incluye los precios de:

- Módulos fotovoltaicos.
- Inversor.
- Caldera eléctrica de vapor.

A continuación, se expone la lista de materiales empleados y las mediciones estimadas para la realización de la instalación planteada, detallando las cantidades unitarias, así como las cantidades totales necesarias para la misma.

Tabla 6: Presupuesto

PRESUPUESTO			
Designación	Precio unitario (€)	Cantidad (Ud.)	Precio Total (€)
Panel solar A-250 P	250	100	25.000
Inversor SYMO 10.0-3-M	2.507,66	1	2.507,66
Caldera eléctrica	13.588,30	1	13.588,30
TOTAL			41.095,96 €

En el siguiente gráfico, donde se representa la inversión por componentes, se puede comprobar como la mayor parte de la inversión de la instalación (61 %) corresponde a los paneles solares fotovoltaicos. En este caso se necesitan 100 paneles solares para una instalación solar fotovoltaica de 25 kW; en caso de instalaciones mayores el porcentaje de la inversión en los módulos fotovoltaicos será mayor frente al resto de componentes de la instalación.

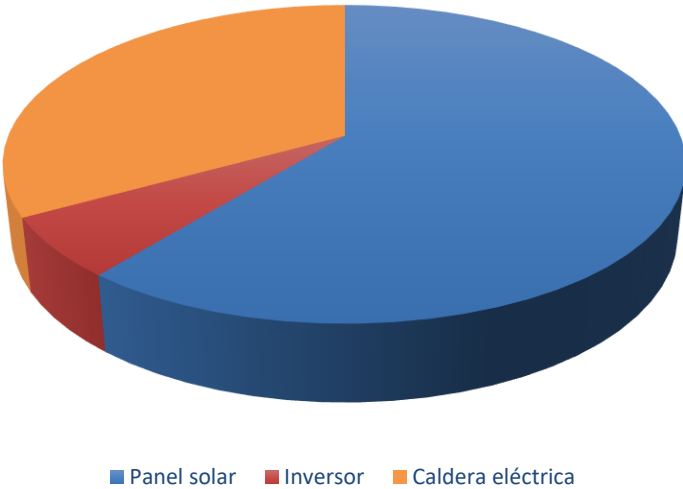


Figura 6-1: Inversión en los componentes de la instalación

También se observa que hay un gasto importante en la caldera eléctrica de vapor, el cual va a ser constante, independientemente de la superficie de captación que pueda tener el campo solar fotovoltaico.

7 ESTUDIO DE VIABILIDAD

En este apartado se va a verificar la viabilidad de este tipo de instalación solar fotovoltaica, cuya finalidad, como se ha dicho anteriormente, es la producción de vapor para su uso industrial, cubriendo así parte de la demanda de vapor requerida por una industria o proceso industrial, con el objetivo de reducir el consumo de combustible de una industria convencional que utiliza gas natural como combustible.

En primer lugar, se va a calcular el coste de producción de 1 kg de vapor, para ello es necesario conocer el coste del gas natural, 0,0138 €/MJ, además de su poder calorífico, 40,474 MJ/Nm³, obteniendo así un coste unitario del gas natural de 0,56 €/Nm³.

Tomando como referencia una caldera de 1 Tn/h de vapor que tiene un consumo de 80 Nm³/h de gas natural, para 1 kg/h de vapor consume 0,08 Nm³/h de gas natural.

Si la instalación funciona ocho diarias durante los 365 días del año, y produce 14 kg/h de vapor; producirá al año 40.880 kg de vapor.

Para producir 40.880 kg de vapor se necesitan 3.270,4 Nm³ de gas natural, que multiplicado por su coste unitario (0,56 €/Nm³) se obtiene un coste del gas natural de 1.831,4 €/año

A continuación, se va a calcular el ahorro en combustible que supondría la implantación de la instalación propuesta en el caso base en una instalación convencional, y al igual que en el apartado 5 se estudiará la influencia de la localidad, con el fin de obtener la de más rentabilidad.

En la siguiente tabla se muestra los kg de vapor producidos tanto por la caldera eléctrica como por la instalación convencional, además, el ahorro que supondría la instalación convencional dependiendo de los kWp producidos en el campo solar.

Tabla 7: kg anuales de vapor producidos

Potencia Campo Solar (kWp)	Área (m²)	kg anuales de vapor producidos por la caldera eléctrica	kg anuales de vapor producidos por la caldera de gas natural
10	61	1.880,82	38.999,18
15	98	6.684,38	34.195,62
20	131	11.315,89	29.564,11
25	163	15.835,93	25.044,07
30	196	20.004,39	20.875,61
35	228	22.772,86	18.107,14
40	261	24.571,29	16.308,71
45	295	25.913,4	14.966,60
50	330	26.961,78	13.918,22
Coste del combustible caldera gas natural (€/año)		Porcentaje de ahorro de combustible (%)	
1747,10		4,60	
1.531,94		16,35	
1.324,45		27,68	
1.121,96		38,74	
935,22		48,93	
811,19		55,71	
730,62		60,11	
670,49		63,39	
623,53		65,95	

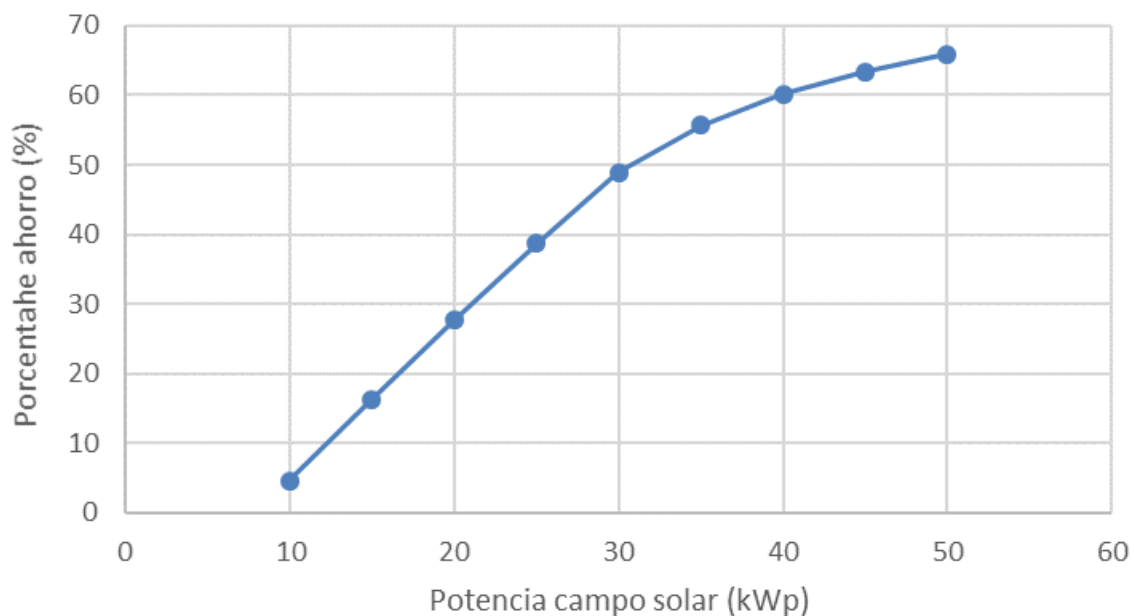


Figura 7-1: Porcentaje de ahorro

Hay que considerar que a partir de una potencia 30 kWp, obtenemos más energía de la necesaria por la caldera eléctrica elegida para este estudio (10,5 kWp). Como no disponemos de sistemas de almacenamiento, a partir de 30 kWp se estaría desaprovechando la energía obtenida.

En la siguiente tabla se muestra la potencia sobrante anual para las distintas potencias del campo solar fotovoltaico.

Tabla 8: Porcentaje de pérdida de energía

Potencia Campo Solar (kWp)	Potencia producida anual (kW)	Potencia sobrante anual (kW)	Porcentaje de pérdida (%)
30	22.623,46	179,975	0,80
35	26.607,92	1.380,95	5,19
40	30.527,17	3.307,69	10,84
45	34.453,39	5.705,12	16,56
50	38.355,50	8.378,76	21,85

A continuación, se va a calcular el valor actual neto o el VAN de la instalación. El VAN es un parámetro que indica la viabilidad de un proyecto basándose en la estimación de los flujos de caja que se prevé obtener, es decir, el VAN toma los ingresos de cada año, le resta los gastos netos y en base a eso calcula en cuantos años se podría recuperar la inversión, más un pequeño interés (el porcentaje que se obtendría si se hubiera puesto la inversión en renta fija en lugar de invertir en un proyecto empresarial). Para calcularlo se aplica la siguiente fórmula:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Donde cada incognita significa:

- “ V_t ” representa los flujos de caja en cada periodo t .
- “ I_0 ” es la cantidad de dinero inicial de la inversión.
- “ n ” indica el número de períodos que se consideran.
- “ k ” se refiere al tipo de interés definido.

Se va a considerar para este proyecto un período (n) de 20 años y el tipo de interés del 3%. En la siguiente tabla se muestra el calculo del VAN para las distintas potencias de campo solar.

Los flujos de caja que se han obtenido corresponden al ahorro que supondría el uso de la caldera eléctrica en lugar de la caldera convencional.

Tabla 9: VAN de la instalación

Potencia Campo Solar (kWp)	Inversión inicial (€)	Flujos de caja (€/año)	VAN
10	26.095,96	84,3	-24.841,79
15	31.095,96	299,46	-26.632,72
20	36.095,96	506,95	-28.553,08
25	41.095,96	709,44	-30.532,95
30	46.095,96	896,18	-32.750,87
35	51.095,96	1.020,21	-35.920,94

Como se muestra en la tabla anterior, el resultado obtenido del Valor Actual Neto es negativo. Por tanto, la inversión producirá pérdidas, por lo que esta inversión no es rentable sea cual sea la potencia de campo solar elegida. A medida que aumenta la potencia del campo solar, es decir, el área de captación crece, la inversión es menos viable.

Para que la inversión en este tipo de instalación sea rentable, el precio del combustible (€/año) de la caldera de gas natural tendría que ser cuatro veces mayor que el actual, es decir, equivaldría a 7.325,6 €/año, manteniéndose constante el resto de parámetros. En la siguiente tabla se calcula el VAN con estas condiciones y para el caso base planteado en el apartado 5, esto es para una potencia de campo solar de 25 kW.

Tabla 10: VAN instalación ideal

Potencia Campo Solar (kWp)	Inversión inicial (€)	Flujos de caja (€/año)	VAN
25	41.095,96	2.838	1.126,21

7.1 Influencia de la localidad

Al igual que se ha hecho para la localidad del caso base, Sevilla, en este apartado se analizará el estudio de viabilidad en las otras dos localidades. Es de esperar que en las otras dos localidades la inversión sea menos rentable que en el caso base estudiado, ya que, como se vio en el apartado 5, la irradiación es mucho mayor en Sevilla.

A continuación, se muestra una tabla con todos los valores para cada localidad, al igual que se ha hecho para el caso base explicado anteriormente. Como se ha comentado la instalación solar fotovoltaica elegida será de 25 kW y será constante para cada localidad.

Tabla 11: Valores del VAN en función de la localidad

Ubicación	Irradiación (kWh/año)	Vapor producido (kg/año)	Inversión inicial (€)	Flujos de caja (€/año)	VAN
Sevilla	120.552,88	24.673,13	41.095,96	709,44	-30.532,95
Santander	85.117,96	17.420,79	41.095,96	523,93	-33.300,16
Budapest	79.813,28	16.335,1	41.095,96	390,46	-35.293,74

8 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Con este trabajo se ha intentado integrar la energía solar fotovoltaica en el sector industrial, ya que en ella tienen lugar numerosos procesos térmicos que implican temperaturas fácilmente alcanzables con la tecnología actual. El motivo que ha llevado a la realización de este estudio ha sido la caída de los precios de los módulos fotovoltaicos, promovido por el gran desarrollo que está teniendo esta tecnología actualmente, lo que sugiere un futuro prometedor para este tipo de instalaciones.

En un primer momento se esperaba que, con la caída de los precios de los módulos fotovoltaicos, debido a la producción en masa y la entrada de fabricantes chinos, podría resultar más económico a largo plazo. A continuación, se explica como se ha desarrollado este estudio:

- Se ha comprobado la elevada importancia que tiene la simulación de los sistemas solares fotovoltaicos, puesto que nos permite determinar el comportamiento del sistema y analizar la influencia de la variación de cualquiera de sus parámetros. En particular se ha descrito TRNSYS, herramienta de simulación de naturaleza modular, que permite analizar el comportamiento de estos sistemas a partir de modelos de cada uno de los componentes de la instalación.
- Para cuantificar el comportamiento de estos sistemas se ha definido un caso base correspondiente a una instalación industrial de producción de vapor a la que se le ha adherido una instalación de energía solar fotovoltaica con una caldera eléctrica de vapor en paralelo a la caldera de vapor de la instalación convencional. A partir del análisis de este caso base, se ha desarrollado un análisis de sensibilidad, estudiando la influencia de la localidad geográfica.

Las conclusiones más importantes obtenidas en el análisis del caso base y en el análisis de sensibilidad son las siguientes:

- Al no disponer la instalación de un sistema de almacenamiento provoca que todo el vapor producido en exceso sea una pérdida, lo que limita el tamaño del área de captación del sistema solar fotovoltaico.
- Se ha comprobado la dependencia de estos sistemas con el recurso solar, tal y como se ha determinado en los análisis realizados. Para la localidad establecida en el caso base (Sevilla), la demanda cubierta varía en función de la época del año, con una producción de vapor variable entre 0 y 8 horas al día.
- La influencia de la localidad hace que la demanda de vapor cubierta por la instalación planteada varíe entre el 40,51% y el 61,19% para las localidades estudiadas, pudiéndose observar una dependencia casi lineal de la demanda cubierta con la irradiación. Motivo por el cual este tipo de sistemas resulta más interesante en zonas de elevada irradiación.

Las conclusiones más importantes obtenidas respecto al estudio de viabilidad son las siguientes:

- Se ha demostrado que la producción de energía térmica mediante energía solar fotovoltaica para este estudio, con las condiciones interpuestas inicialmente, es inviable, ya que este tipo de instalaciones requiere de una inversión muy alta para el porcentaje de ahorro de combustible de la caldera de gas natural que se obtiene.
- El coste de la caldera eléctrica de vapor es muy alto, lo que provoca que la inversión inicial sea muy alta.

9 REFERENCIAS

- [1] C. d. E. d. I. E. Solar, La Energía Solar, Aplicaciones Prácticas, Sevilla: PROGNSA, 2005.
- [2] D. Civantos, «<http://blogs.lainformacion.com>,» [En línea]. Disponible en: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/09/19/espejos-arquimedes/>.
- [3] A. Sáez, «<https://agrupacionastronomicamagallanes.wordpress.com>,». [En línea]. Disponible en: <https://agrupacionastronomicamagallanes.wordpress.com/2009/04/06/mecanica-celeste-adonde-orientar-la-vivienda/>.
- [4] E. A. Cabrerizo, Instalaciones Solares Fotovoltaicas, Sevilla: Progensa, 2002.
- [5] I. e. Inventos, «Ideas e Inventos,» [En línea]. Disponible en: <http://www.ideaseinventos.es/wp-content/uploads/2014/11/robot-es.jpg>.
- [6] D. Montolio, «Veo Verde,» [En línea]. Disponible en: <http://www.veoverde.com/2011/02/ecopanel-el-calentador-solar-chileno/>.
- [7] J. M. F. Salgado, GUÍA COMPLETA DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA, Madrid: AMV, 2007.
- [8] Asociación nacional de productores de energía fotovoltaica, «Anuario fotovoltaico 2018», [en línea]. Disponible en: <http://proyectotransicionenergetica.org/AnuarioFotovoltaico2018.pdf>
- [9] P. Hernández, «<http://pedrojhernandez.com/>,» Pedro Hernánd. [En línea]. Disponible en: <http://pedrojhernandez.com/2014/03/08/radiacion-directa-difusa-y-reflejada/>.
- [10] E. c. d. mes, «www.elcielodelmes.com,» Vicente Díaz, 2007. [En línea]. Disponible en: http://www.elcielodelmes.com/Curso_iniciacion/curso_1.php.
- [11] A. E. S. Inc., «www.altestore.com,» Alternative Energy Store Inc., [En línea]. Disponible en: <http://www.altestore.com/howto/Solar-Electric-Power/Reference-Materials/Solar-Insolation-Map-World/a43/>.
- [12] Quimicaweb, «www.quimicaweb.net,» Quimicaweb, [En línea]. Disponible en: http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyq3/tema7/tema7.html.
- [13] ECA INSTITUTO DE LA TECNOLOGÍA Y FORMACIÓN, ENERRGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA 3ra Edición, Madrid: FUNDACIÓN CONFEMETAL.

- [14] Radioelectronica, «www.radioelectronica.es,» Radioelectronica, [En línea]. Disponible en: <http://www.radioelectronica.es/articulos-teoricos/126-los-semiconductores-la-union-pn>.
- [15] Solartronic, «www.solartronic.com» VICTECK INTERNET, S.A. de C.V., 2007. [En línea]. Disponible en: http://www.solartronic.com/Energia_Solar/Sistemas_Fotovoltaicos/Curso_Breve/2_Fabricacion/.
- [16] Jaenclima, «www.jaenclima.com,» Jaenclima, [En línea]. Disponible en: http://www.jaenclima.com/articulos/articulo_20.php.
- [17] A. Dazne, «blog.is-arquitectura.es,» Arquitecturais. [En línea]. Disponible en: <http://blog.is-arquitectura.es/2012/07/08/paneles-fotovoltaicos-con-doble-cara-de-bsolar/>.
- [18] Z. N. L. G. X. C. Jia Fang, «Improvement in performance of hydrogenated amorphous silicon solar cells with hydrogenated intrinsic amorphous silicon oxide p/i buffer layers,» Solar Energy Materials and Solar Cells, p. 4, 2014.
- [19] D. T. V. D. J. C. Becker, «Polycrystalline silicon thin-film solar cells: Status and perspectives,» Solar Energy Materials & Solar Cells, p. 10, 2013.
- [20] B. M. a. Y. S. A. Rachid Chaouia, «Improvement of screen-printed textured monocrystalline,» ScienceDirect, p. 1, 2013.
- [21] G. d. Canarias, «<http://www.gobiernodecanarias.org>,» Gobierno de Canarias, 27 Mayo 2002. [En línea]. Disponible en: <http://www.gobiernodecanarias.org/industria/guia/FOTOVOLTAICA/Guia%20Fotovoltaica%20Final.html>.
- [22] A. H. SL, «<http://amordadsolar.com>,» Amordad Holdings SL, [En línea]. Disponible en: <http://amordadsolar.com/farolas-solares/>.
- [23] M. A. Abella, SISTEMAS FOTOVOLTAICOS, Madrid: S.A.P.T. PUBLICACIONES TÉCNICAS, S.L., 2005.
- [24] TRNSYS 17 a TRaNsient SYstem Simulation program [En línea]. Disponible en: https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/t17_1_updates.pdf

