



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE UNA TORRE SOLAR Y UN PARQUE FOTOVOLTAICO EN ALMERÍA.

León, Diciembre de 2015

Autor: Pablo Fernández Olmos

Tutor: Jorge Cara Jiménez

El presente proyecto ha sido realizado por D./Dña. Pablo Fernández Olmos, alumno/a de la Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas de la Universidad de León para la obtención del título de Grado en Ingeniería de la Energía.

La tutoría de este proyecto ha sido llevada a cabo por D./Dña. Jorge Cara Jiménez, profesor/a del Grado en Ingeniería de la Energía.

Visto Bueno

Fdo.: D./Dña. Pablo Fernández Olmos

El autor del Trabajo Fin de Grado

Fdo.: D./Dña. Jorge Cara Jiménez

El Tutor del Trabajo Fin de Grado

RESUMEN

En el presente trabajo, se realiza un repaso a la historia e inicios de las torres solares, apartado en el que se comentan las patentes de invención de Isidoro Cabanyes. A continuación, y tras haber revisado el estado de la técnica en el momento de presentación de las patentes de invención de Isidoro Cabanyes, referidas a un sistema denominado “motor solar”, se lleva a cabo un estudio de las centrales eólico-solares en donde se resaltan tanto los principios de funcionamiento como los componentes principales de las mismas, comentando también algunas mejoras técnicas que se pueden llevar a cabo en este tipo de instalaciones para reducir sus dimensiones sin que esto afecte a su eficacia.

Seguidamente, y después de hacer un repaso por la tecnología de los parques fotovoltaicos se describirá la ubicación donde se pretende llevar a cabo la instalación o bien de una planta eólico-solar, o bien de un parque dólar fotovoltaico, decisión que se tomará tras la realización de un estudio comparativo entre ambas tecnologías, siendo las dos de 2 MW de potencia. Dicho estudio se centra en dos aspectos, el aspecto económico y el medioambiental.

ABSTRACT

In this Project, a review of the history of solar chimneys has been done. It is important to remark that in that part of the project, the patents of invention of Isidoro Cabanyes have been explained.

After explaining the reasons why Isidoro Cabanyes' inventions were very complicated to make in the moment when Isidoro Cabanyes developed his solar chimney, a research about how solar chimneys work have been done. Besides, the different elements which make up the solar chimney have been described. On the other hand, a research about several improvements related to the chimney has been shown.

In the second part of the project, the main points of the photovoltaic solar plant like the components or the way it works have been explained. After talking about the two technologies we want to compare, we have described the place where setting up either the solar chimney or the photovoltaic solar plant is a good idea. It is remarkable that the reasons why we have chosen that place are explained.

Eventually, a comparison between the two technologies has been made. We have focused our comparison on two points: economy and environment.

ÍNDICE

Contenido

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	1
ÍNDICE	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
1 Introducción.....	8
1.1 Justificación del trabajo.	18
1.2 Objetivo del estudio.....	18
1.3 Desarrollo del trabajo.	18
2 Historia.....	19
2.1 Las patentes de Isidoro Cabanyes.....	20
2.1.1 Primera patente: Expediente número 30332. Memoria relativa a un proyecto de “motor solar”	21
2.1.2 Segunda patente: Expediente número 37137. Memoria relativa a un proyecto de “motor solar”	26
2.1.3 Conclusiones.	28
2.2 Situación de la técnica en el momento de presentación de las patentes de invención de Isidoro Cabanyes.	28
2.2.1 Estado de la técnica.	28
2.2.2 Conclusiones.	30
2.3 Invenciones posteriores al momento de presentación de las patentes de Isidoro Cabanyes.....	31
2.3.1 Chimenea de Bernard Dubos.....	31
2.3.2 Generador de ciclones.....	33
3 Tecnología y perspectivas de utilización de las centrales eólico-solares.....	35
3.1 Proyectos recientes.....	36
3.1.1 Central eólico-solar de Manzanares.	36
3.1.2 Prototipo chino en Mongolia interior.....	39
3.1.3 Central eólico-solar en Australia.....	40
3.1.4 Chimenea solar en Fuente del Fresno.	41
3.2 Principios de funcionamiento. Componentes.....	42

3.2.1	El colector.	43
3.2.2	La chimenea.	47
3.2.3	La turbina.	56
3.3	Almacenamiento térmico.....	56
4	Energía solar fotovoltaica.	59
4.1	Características y principio de funcionamiento.	59
4.2	Historia.	60
4.3	Tipos de instalaciones fotovoltaicas.	61
4.4	Ventajas e inconvenientes de la energía solar fotovoltaica.	62
4.5	Elementos fundamentales de un parque fotovoltaico.	62
5	Localización.....	64
5.1	Ubicación exacta.	64
5.2	Radiación solar.	67
5.3	Vientos predominantes.....	68
5.4	Características complementarias.....	69
6	Comparativa económica.	70
6.1	Conclusiones.	71
6.2	Coste de las centrales eólico solares frente el coste de los huertos solares.....	72
6.2.1	Coste de la central eólico-solar.....	72
6.2.2	Coste del parque solar fotovoltaico.....	73
6.2.3	Conclusiones.	74
7	Comparativa medioambiental.	75
7.1	Descripción del terreno.....	75
7.2	Impactos de la central eólico-solar.	75
7.2.1	Impacto sobre la calidad del aire.....	75
7.2.2	Impacto acústico.....	76
7.2.3	Impacto sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.....	76
7.2.4	Impacto sobre el suelo y la morfología del terreno.	77
7.2.5	Impacto sobre la ocupación y usos del suelo.	77
7.2.6	Impacto sobre la vegetación.....	77
7.2.7	Impacto sobre la fauna.	78
7.2.8	Impactos sobre las infraestructuras y la red de servicios.....	78
7.2.9	Impacto sobre los caminos pecuarios.	79
7.2.10	Impacto sobre el paisaje:.....	79
7.2.11	Impacto sobre el consumo de combustibles.....	79

7.2.12	Impacto sobre el medio social y económico.	80
7.3	Impactos del huerto solar.	80
7.3.1	Impacto sobre la calidad de las aguas.	80
7.3.2	Impacto sobre la calidad del aire.	80
7.3.3	Impacto sobre el suelo.	81
7.3.4	Impactos sobre la vegetación.	81
7.3.5	Impacto sobre la fauna.	81
7.3.6	Impacto sobre el paisaje.	81
7.3.7	Impacto socioeconómico.	82
7.4	Valoración global.	82
8	Conclusiones generales.	84
9	Bibliografía.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Esquema general de las fuentes de energía renovables y no renovables.	10
Figura 1.2.- Esquema de una central hidroeléctrica.....	11
Figura 1.3.- Aerogeneradores de un parque eólico.....	12
Figura 1.4.- Ciclo de la biomasa.	13
Figura 1.5.- Configuración de paneles termo solares.....	14
Figura 1.6.- Campo solar fotovoltaico.....	15
Figura 1.7.- Esquema de una central mareomotriz.	16
Figura 1.8.- Planta de energía solar térmica concentrada.	17
Figura 2.1.- Isidoro Cabanyes y Olcinellas.	19
Figura 2.2.- Torre solar de Cartagena.	20
Figura 2.3.- Dibujo del “motor solar” de la primera patente.	21
Figura 2.4.- Dibujo de la chimenea solar y el captador de la primera patente.	23
Figura 2.5.- Esquema de la proyección horizontal de la rueda del motor.	24
Figura 2.6.- Dibujo del motor solar al completo.....	25
Figura 2.7.- Dibujo en el que se muestra las dos superficies metálicas que forman el captador.....	26
Figura 2.8.- Dibujo en el que se muestran los helicoides fijados al eje vertical.	27
Figura 2.9.- Máquina inducida por el tiro de una chimenea.	29
Figura 2.10.- Patente de generador eléctrico de Enoch Claud.....	30
Figura 2.11.- Diferentes componentes de la segunda patente de Isidoro Cabanyes.....	31
Figura 2.12.- Esquema de la chimenea de Bernard Dubos.....	32
Figura 2.13.- Torbellino creado de forma natural.	33
Figura 2.14.- Esquema del generador de Nazare, según como aparece en la patente.....	34
Figura 3.1.- Mapa de radiación solar directa.....	35
Figura 3.2.- Central eólico-solar de Manzanares.....	37
Figura 3.3.- Conjunto turbo-generador de la central de Manzanares.	38
Figura 3.4.- Prototipo chino en Mongolia interior.....	39
Figura 3.5.- Proyecto de central eólico solar de Enviromission en Australia.	41
Figura 3.6.- Comparativa de alturas entre diversas torres solares.....	42
Figura 3.7.- Esquema explicativo del funcionamiento de una planta eólico-solar.	43
Figura 3.8.- Gráfico del coeficiente de transparencia de un vidrio normal.....	45
Figura 3.9.- Estructura portante del vidrio del colector.	47

Figura 3.10.- Chimenea fabricada con planchas de acero.....	48
Figura 3.11.- Chimenea diseñada por Herman Coetzee.....	49
Figura 3.12.- Dibujo de torre recta y torre divergente.	50
Figura 3.13.-Estructura de la torre flotante.....	51
Figura 3.14.- Base de la chimenea flotante articulada.	51
Figura 3.15.- Esquema de una planta con chimenea flotante de base articulada.	52
Figura 3.16.- Colector inclinado para reducir la altura de la chimenea.	53
Figura 3.17.- Torre de convección.	54
Figura 3.18.- Torre ciclónica.....	55
Figura 3.19.- Almacenamiento térmico mediante tubos de agua pintados de negro.	57
Figura 3.20.- Potencia de la planta con y sin almacenamiento térmico.	58
Figura 4.1.- Principio elemental de funcionamiento de un módulo fotovoltaico	59
Figura 4.2.- Elementos de un parque fotovoltaico.	63
Figura 5.1.- Localización de la zona elegida.....	65
Figura 5.2.- Situación la zona elegida con respecto a la línea de evacuación más cercana.	65
Figura 5.3.- Ubicación de la torre dentro del área seleccionada.....	66
Figura 5.4.- Sección del área elegida a través del eje (en verde).	67
Figura 5.5.- Irradiación global media.	67
Figura 5.6.- Distribución de los vientos predominantes.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1.- Irradiancia kW/m ² día) por provincias.	68
Tabla 6.1.- Coste de producción e inversión de distintas formas de generación de energía eléctrica.....	70
Tabla 6.2.- Comparativa entre el coste de producción del MW en un huerto solar y en una central eólico-solar	71
Tabla 6.3.- Costes de los elementos de las torres solares según la potencia.	72
Tabla 6.4.- Coste de la obra civil de la torre solar.	73
Tabla 6.5.- Inversión total de un parque solar fotovoltaico de 2 MW	74

1 Introducción.

Uno de los asuntos que la ingeniería debe resolver con más urgencia es el problema energético. Es evidente el hecho de que el desarrollo que hemos basado en los combustibles fósiles no durará mucho tiempo debido al agotamiento de dichos recursos, el cual se ha acelerado con el paso de los años, y es que desde el inicio de la revolución industrial los combustibles fósiles han sido los preferidos para hacer funcionar las máquinas que mueven el mundo, debido a las excepcionales características que presentan: alto contenido energético, fácil almacenamiento, y la obtención de múltiples subproductos.

A medida que la industria fue evolucionando, se hizo evidente que los combustibles fósiles presentan grandes amenazas hacia nuestro entorno. El primer problema que fue detectado desde que dichos recursos se empezaron a utilizar, fue la contaminación que producían en forma de gases y cenizas, productos de su combustión que se aglutinaban en forma de nubes alrededor de los grandes centros industriales disminuyendo considerablemente la calidad del aire, y generando así afecciones respiratorias entre los habitantes de aquellas zonas.

Además de los perjuicios que los gases y cenizas procedentes de la combustión de los combustibles fósiles tienen sobre las personas, cabe destacar que son gases favorecedores del efecto invernadero, que se presenta cuando los gases de la atmósfera dejan pasar la radiación solar hasta la superficie terrestre elevando así su temperatura, pero no dejan escapar el calor acumulado, manteniendo la temperatura alcanzada. El efecto invernadero es un fenómeno natural y necesario para mantener la vida en la tierra, pero la concentración anormal de gases de efecto invernadero producto de la actividad humana a través de la quema de combustibles fósiles ha desencadenado un proceso de sobrecalentamiento global.

Cabe destacar que los combustibles fósiles tienen una característica especial, que no son renovables, esto significa que en un futuro se agotarán y tendrán que pasar millones de años para que los procesos a través de los cuales se formaron, se lleven a cabo de nuevo. El día en que los combustibles fósiles se agoten no está muy lejos, es por esto que el hecho de encontrar fuentes de energía alternativas a los hidrocarburos es de vital importancia.

La generación de energía eléctrica es un proceso basado principalmente en los combustibles fósiles y por lo tanto es la principal responsable del aumento de los problemas que trae consigo la quema de combustible fósil. Esta es la razón por la cual, la ingeniería tiene la obligación moral de buscar nuevas fuentes de energía diferentes a los combustibles fósiles, para así poder desplazarlos de la industria de la generación de energía y algún día, reemplazarlos. Las características que se buscan principalmente en una fuente de energía son: que produzca el menor impacto ambiental posible y la menor contaminación de cualquier tipo, que tenga un potencial energético y una eficiencia aceptable, que sea segura, simple, confiable, rentable y barata.

Además de la quema de combustibles, existen otras fuentes de energía aprovechadas para la generación de electricidad, desgraciadamente no cumplen de manera satisfactoria las expectativas mencionadas, lo que las convierte en buenos apoyos para disminuir el uso de combustibles, pero no podrán reemplazarlos. Hasta que la humanidad encuentre

la forma de obtener energía limpia de un proceso totalmente ideal y eficiente, la energía tendrá que obtenerse mediante la combinación de las tecnologías existentes.

El presente trabajo gira en torno a las energías renovables, más concretamente en torno a la energía solar, una fuente de energía que apenas aprovechamos. Esta es la razón por la cual, antes de desarrollar el tema principal, me gustaría realizar un breve repaso a la clasificación de las diferentes fuentes de energía.

Existen diversos parámetros a través de los cuales podemos clasificar las fuentes de energía:

Según la necesidad de ser transformadas o no para su uso, las fuentes de energía pueden ser:

- **Primarias:** son aquellas fuentes de energía que se encuentran disponibles en la naturaleza de forma directa (ríos, oleaje), o de forma indirecta (el petróleo, el gas natural), para su uso energético sin necesidad de someterlo a un proceso de transformación.
- **Secundarias:** las fuentes de energía secundarias son el resultado de la transformación de fuentes de energía primarias. Por ejemplo, el gasoil gracias al cual se hace posible el funcionamiento de muchos automóviles, se considera una fuente de energía secundaria ya que para obtenerlo, necesitamos someter a la sustancia de la que proviene a una serie de procesos que tienen lugar en las refinerías.

Según su uso y desarrollo tecnológico en cada país:

- **Convencionales:** de todas las energías aprovechables, se consideran convencionales aquellas en las que se han desarrollado tecnologías que permiten contribuir de forma importante al consumo energético mundial. Tanto el petróleo como el gas natural y el carbón son fuentes de energía convencionales.
- **No convencionales:** son aquellas formas de producir energía que no son muy comunes en el mundo y cuyo uso es muy limitado. Esto se debe a que los costes de las infraestructuras necesarias para su obtención son muy elevados, además de la dificultad que entraña la conversión de estas energías en energía eléctrica. Entre las energías no convencionales tenemos: la energía solar, la energía eólica, o la energía química. Dentro de las que más se están utilizando tenemos la energía nuclear, la energía solar, la energía geotérmica, la energía química, la energía eólica y la energía de la biomasa.

Atendiendo al impacto ambiental que generan, las fuentes de energía se dividen en:

- **No contaminantes o fuentes de energías limpias:** son las fuentes cuya obtención produce un impacto ambiental mínimo y no generan subproductos tóxicos ni contaminantes, por ejemplo: la energía hidráulica, la energía eólica (las renovables en general).
- **Contaminantes:** Al contrario que las fuentes de energía limpias, estas fuentes de energía son perjudiciales para el medio ambiente ya que el uso de las mismas da lugar a subproductos nocivos. Lógicamente, estamos hablando de las sustancias como el carbón o el gas natural, ambos utilizados como combustible tanto en el sector industrial como en el de transporte. Debemos tener muy presente que las fuentes de energía que requieren operaciones como excavaciones, movimientos

de tierra, o talas para su obtención, también se consideran contaminantes debido a que en el momento de su obtención se está produciendo un daño físico al medio ambiente.

Según su disponibilidad en la naturaleza y su capacidad de regeneración, las fuentes de energía pueden clasificarse en:

- **Renovables:** las fuentes de energía renovables son todas aquellas que provienen de la naturaleza en una cantidad ilimitada, y una vez consumidas, se pueden regenerar de manera natural. Las energías renovables son, frente a las fuentes convencionales, recursos limpios cuyo impacto es casi nulo y siempre reversible. Las energías renovables son recursos abundantes y limpios que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones dañinas para el medio ambiente como las emisiones de CO₂, algo que sí ocurre con las energías no renovables como son los combustibles fósiles. Una de sus principales desventajas, es que la producción de algunas energías renovables es intermitente ya que depende de las condiciones climatológicas, como ocurre, por ejemplo, con la energía eólica. Sin embargo, este tipo de energía ayuda a disminuir la dependencia de nuestro país de los suministros externos, aminoran el riesgo y favorecen el desarrollo tecnológico y la creación de empleo.
- **No renovables:** las fuentes de energía no renovables son aquellas que se encuentran de forma limitada en el planeta y cuya velocidad de consumo es mayor que la de su regeneración. Existen varias fuentes de energía no renovables: los llamados combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) y la energía nuclear. Entre algunas de sus características destacan la producción de emisiones (referente a los combustibles fósiles) y la generación de residuos radiactivos potencialmente nocivos durante miles de años que dañan el medioambiente (referente a la energía nuclear). Además debemos tener en cuenta que las energías no renovables sólo se encuentran y explotan en zonas determinadas del planeta.

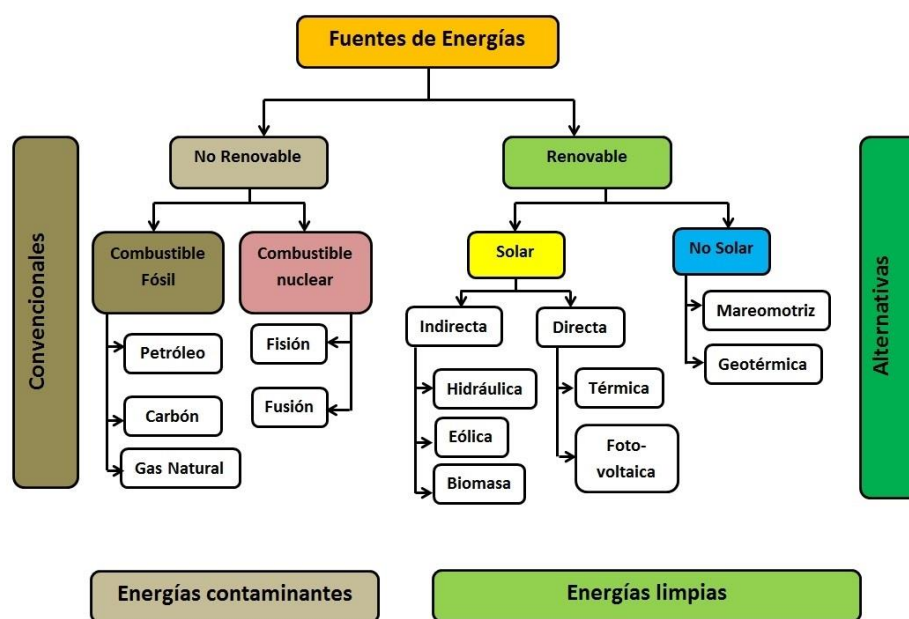


Figura 1.1.- Esquema general de las fuentes de energía renovables y no renovables.

A continuación se muestra un esquema explicativo de las fuentes de energía renovables y no renovables:

Algún tiempo atrás, la atención que recibían temas controvertidos como la contaminación o el cambio climático era más bien poca. Se sabía que eran dos aspectos que estaban ahí, pero muy poca gente se movía para intentar combatirlos. Hoy en día, sin embargo, tanto la contaminación como el cambio climático se han convertido en una de las principales preocupaciones de la población mundial, es por esto que cada vez somos más conscientes de que debemos encontrar soluciones para no hacer más daño al medio ambiente.

La forma de pensar de la población mundial acerca de un tema tan importante como lo es la contaminación ha evolucionado con el paso del tiempo. Esta es la razón por la cual las energías renovables están tomando una gran importancia en el panorama energético mundial.

Como se puede ver en el esquema anterior, existen diferentes tipos de energía renovable, que son:

- **Energía hidráulica:** es la producida por el agua retenida en embalses o pantanos a gran altura. Si en un momento dado, el agua se deja caer hasta un nivel inferior, la energía potencial contenida en el agua por estar a una cierta altura, se convierte en energía cinética y, posteriormente, en energía eléctrica en la central hidroeléctrica.

Ventajas: es una fuente de energía limpia, sin residuos y fácil de almacenar. Además, el agua almacenada en embalses permite regular el caudal del río.

Desventajas: la construcción de centrales hidroeléctricas es costosa y se necesitan grandes tendidos eléctricos. Por otro lado, los embalses producen pérdidas de suelo productivo y fauna terrestre debido a la inundación del terreno destinado a ellos.

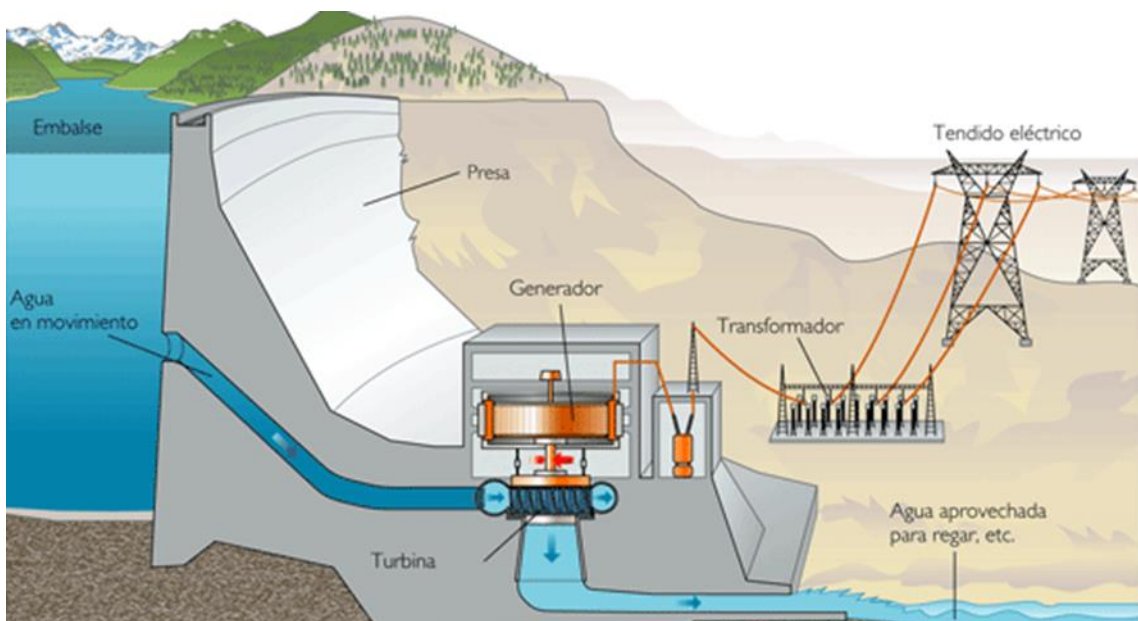


Figura 1.2.- Esquema de una central hidroeléctrica.

- **Energía eólica:** la energía eólica es aquella que tiene origen en el viento. El viento puede generarse o bien por una diferencia de presiones entre distintas zonas de la tierra, o bien por una diferencia de temperaturas, como pueden ser las brisas marinas o los vientos de montaña, que son debidos al calentamiento de las mismas.

En las palas de los aerogeneradores, la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica rotacional, que es transformada en energía eléctrica en el generador.

Ventajas: el viento es un recurso inagotable. Es una energía limpia, no contaminante, que contribuye a frenar el cambio climático. Además produce independencia de otras energías, porque es una energía autóctona, es decir, no hace falta importarla.

Desventajas: los periodos de máxima demanda durante el día y máxima generación por la noche cuando los vientos son más fuertes, no coinciden, además de que no siempre hay viento. Debemos tener en cuenta también el impacto visual, y el sonoro de los grandes aerogeneradores.



Figura 1.3.- Aerogeneradores de un parque eólico.

- **Biomasa:** la biomasa es la energía renovable que aprovecha todo lo que la naturaleza nos da, una fuente de energía natural, de calidad y que está en todo lo que nos rodea. La biomasa es materia de origen orgánico vegetal o animal que podemos utilizar para fines energéticos. Según su procedencia existen distintos tipos: las biomasas agrícolas, que son los residuos de las cosechas y los cultivos

energéticos agrícolas. Las biomasa forestales, que son los residuos procedentes de la limpieza de los bosques, los restos de podas, así como los cultivos energéticos forestales. Las biomasa ganaderas, que son los residuos del ganado como los estiércoles y los purines. Las biomasa industriales, que son los residuos orgánicos procedentes de la industria alimentaria como las fábricas de aceite de oliva o las conserveras, de la industria de la madera, como las fábricas de muebles, así como de la industria papelera. Las biomasa procedentes de las basuras de las ciudades, que son la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Y las biomasa acuosa, que proceden de las plantas acuáticas y algas.

Las biomasa se transforman mediante procesos mecánicos, termoquímicos y biológicos, para obtener productos que todos conocemos: como los pellets y las astillas para generar calor, biogás para generar electricidad, y el biodiesel y el bioetanol.

Ventajas: la biomasa da la oportunidad al sector agrícola de dar un uso a sus excedentes es. Por otro lado, contribuye a disminuir la dependencia externa para el abastecimiento de combustible en países que no producen petróleo. Además las cenizas que se producen son vegetales y pueden utilizarse como abono.

Desventajas: el poder calorífico de la biomasa es mucho menor que el de los combustibles fósiles, por lo tanto se necesita una mayor cantidad de biomasa para conseguir la misma energía que si utilizamos combustibles fósiles. No nos debemos olvidar de que los cultivos destinados a la producción de energía de biomasa compiten directamente con los cultivos destinados al consumo humano. Su mal uso puede dar lugar al aumento de los precios de los alimentos básicos.

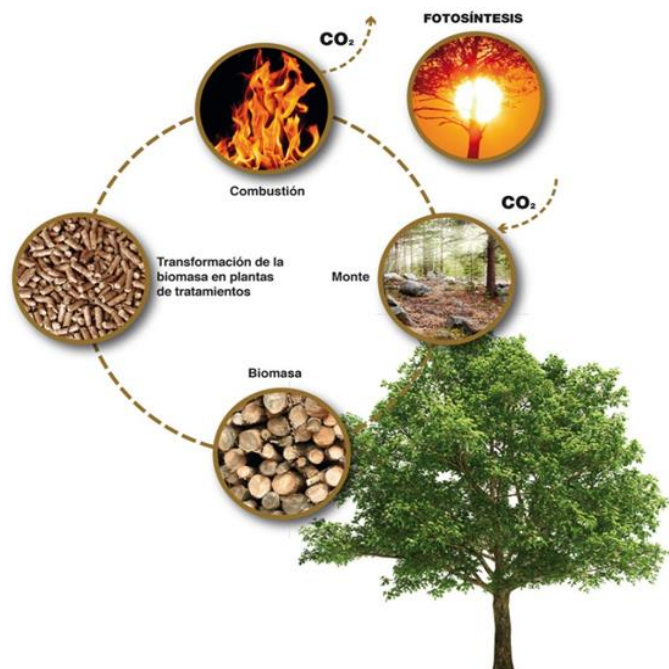


Figura 1.4.- Ciclo de la biomasa.

- **Energía solar térmica:** Definiremos la energía solar térmica o energía termo solar como el aprovechamiento de la energía del sol para generar calor mediante el uso de colectores o paneles solares térmicos. De manera muy esquemática, el sistema de energía solar térmica funciona de la siguiente manera: el colector o panel solar

capta los rayos del sol, absorbiendo de esta manera su energía en forma de calor, a través del panel solar hacemos pasar un fluido (normalmente agua) de manera que parte del calor absorbido por el panel es transferido a dicho fluido, el fluido eleva su temperatura y es almacenado o directamente llevado al punto de consumo. Las aplicaciones más extendidas de esta tecnología son el calentamiento de agua sanitaria (ACS), la calefacción por suelo radiante y el precalentamiento de agua para procesos industriales.



Figura 1.5.- Configuración de paneles termo solares.

- **Energía solar fotovoltaica:** la energía fotovoltaica es la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación se produce en unos dispositivos denominados paneles fotovoltaicos. Los paneles fotovoltaicos están formados por materiales semiconductores, normalmente silicio. Las obleas de silicio que forman el panel fotovoltaico han sido tratadas para que cuando incida sobre ellas la radiación solar, se liberen y empujen las cargas eléctricas hacia la superficie (las positivas en una dirección y las negativas en otra). Si se cierra el circuito eléctrico, las cargas salen de la célula creando una corriente eléctrica

Ventajas: se trata de una energía limpia y renovable, además el mantenimiento de las instalaciones es reducido. Por otro lado, las instalaciones fotovoltaicas constituyen una solución inmejorable en zonas aisladas, que de otra manera, no tendrían acceso a la electricidad.

Desventajas: los campos solares suelen ocupar una gran extensión de terreno por lo que el impacto visual es grande. Debemos tener en cuenta que el coste de las instalaciones es elevado y su rendimiento es bastante bajo.



Figura 1.6.- Campo solar fotovoltaico.

- **Energía mareomotriz:** la energía mareomotriz es aquella energía que resulta de aprovechar las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares, producida por la acción gravitatoria del sol y la luna para generar electricidad de forma limpia. Esta diferencia de alturas puede aprovecharse interponiendo partes móviles al movimiento natural de ascenso o descenso de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable.

La energía de las mareas se transforma en electricidad en las denominadas centrales mareomotrices, que funcionan como un embalse tradicional de río. Cuando la marea sube, las compuertas del dique se abren y el agua ingresa en el embalse. Al llegar el nivel del agua del embalse a su punto máximo se cierran las compuertas. Durante la bajamar el nivel del mar desciende por debajo del nivel del embalse. Cuando la diferencia entre el nivel del embalse y del mar alcanza su máxima amplitud, se abren las compuertas dejando pasar el agua por las turbinas.

Ventajas: es una fuente de energía renovable y no contaminante. Además está disponible en cualquier clima y época del año.

Desventajas: el impacto visual y estructural sobre el paisaje costero es alto. Además se sabe que la construcción de una central mareomotriz es sólo posible en lugares con una diferencia de al menos 5 metros entre la marea alta y la baja, es decir es una fuente de energía de localización puntual.



Figura 1.7.- Esquema de una central mareomotriz.

- **Energía geotérmica:** la energía geotérmica es aquella que se encuentra en el interior de la tierra en forma de calor. Los yacimientos geotérmicos de los cuales podemos obtener energía en forma de calor pueden ser yacimientos de agua caliente o yacimientos secos.

De la temperatura de dichos yacimientos, la energía geotérmica se utilizara para unos fines u otros, por ejemplo: si la temperatura del yacimiento es baja, este se puede utilizar para calentar agua a la que más tarde se le dará un uso doméstico. Si por el contrario la temperatura del yacimiento es muy elevada, la energía contenida en dicho yacimiento se puede transformar para generar vapor que posteriormente moverá una turbina de generación eléctrica.

Cabe destacar que la principal desventaja de este tipo de energía es q no se puede transportar.

Cabe destacar que un gran número de energías renovables dependen directa o indirectamente del sol, o mejor dicho, de la energía que del sol se desprende, que es eje central de este trabajo. España, por su privilegiada situación y climatología, se ve particularmente favorecida respecto al resto de los países de Europa, ya que sobre cada metro cuadrado de nuestro suelo inciden al año unos 1.500 kWh de energía. Esta energía puede aprovecharse directamente, o bien ser convertida en otras formas útiles como, por ejemplo, en electricidad.

Sería poco racional no intentar aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente, agotables.

Dos de las tecnologías utilizadas para aprovechar la energía solar ya se han explicado anteriormente. Existen otras, como por ejemplo las centrales solares de torre central, en las que la radiación solar es reflejada mediante un campo de heliostatos hacia una caldera que se encuentra situada en la parte superior de la torre. En dicha caldera, la energía solar se utiliza para calentar agua hasta que esta se transforma en vapor, que se expande en una turbina, consiguiendo así transformar la energía solar en energía mecánica, que será aprovechada en el alternador para obtener energía eléctrica.



Figura 1.8.- Planta de energía solar térmica concentrada.

Sin embargo, existe otra tecnología de la que no se habla mucho, debido a las dificultades técnicas y constructivas que entraña, de la cual ya se han obtenido resultados experimentales prácticos y que promete aprovechar la energía del sol de una manera sencilla y poderosa. Estoy hablando de lo que se conoce como “torre solar” o “chimenea solar”, que se puede definir como un híbrido que se nutre de la energía solar para sacar partido de la energía eólica.

Una central de torre solar, está constituida por tres elementos, que son de sobra conocidos, y que nunca antes se había utilizado de forma conjunta. En esta tecnología, dichos elementos se utilizan conjuntamente para, de una manera novedosa, obtener energía eléctrica.

El primer elemento que la conforma es un colector solar que consiste en una porción de terreno de forma circular, el cual está cubierto por un techo de vidrio o algún otro material transparente. La estructura está abierta a la atmósfera en la periferia, desde donde la altura del techo se eleva hasta alcanzar un máximo en el centro de la circunferencia de la misma, dónde se encuentra el segundo elemento que conforma a la planta, la chimenea. Cuando la radiación solar incide en la superficie del colector, la temperatura del aire que se encuentra debajo de él se eleva, haciéndolo más ligero que el aire que se encuentra fuera del colector y que está a temperatura ambiente. Debido a la diferencia de altura del techo del colector que se hace más alto en el centro, el aire caliente se dirige hacia él, donde por efecto de la chimenea eleva su velocidad para después escapar por ella hacia la atmósfera. Aire a temperatura ambiente entra al colector por su circunferencia abierta para reemplazar el aire caliente que se eleva por la chimenea, completando así su ciclo. En la base de la chimenea se encuentra el tercer elemento de la planta: una turbina eólica que aprovecha la energía presente en el aire para accionar un generador y producir energía eléctrica.

1.1 Justificación del trabajo.

Este trabajo ha sido elaborado para rescatar y dar luz a una de las tecnologías que en un futuro puede ser muy importante en el ámbito de la generación de energía eléctrica de forma limpia y saludable, acabando así con la dependencia de los combustibles fósiles que cada vez va siendo menor. Como ya comentamos anteriormente, debemos hacernos a la idea de que el momento en que se agoten los recursos de los que actualmente dependemos, está cada vez más cerca y el estudio, diseño y creación de nuevas tecnologías que aprovechen fuentes de energía no contaminantes es una buena iniciativa para adaptarnos al cambio de utilización de recursos energéticos.

1.2 Objetivo del estudio.

El objetivo de este estudio técnico es describir la tecnología conocida como “torre solar” o “chimenea solar” y la aplicación que esta tiene en la generación de energía eléctrica, para lo cual se llevó a cabo una investigación bibliográfica y una recopilación de información acerca del tema.

Por otro lado, se realizará una comparativa entre dicha tecnología y un campo solar, para determinar cuál de las dos tecnologías es más viable (tanto económica como medioambientalmente) hoy en día.

1.3 Desarrollo del trabajo.

El presente trabajo está dedicado a dicha tecnología. Primero trataremos diferentes aspectos de las torres solares tales como: los principios fundamentales de funcionamiento de las mismas, materiales utilizados, etc. Además realizaremos un repaso a la historia tanto de las torres solares como a la de su inventor y los distintos prototipos que diseño. Por último compararemos dos tecnologías que aprovechan la energía solar, compararemos las torres solares con los campos solares. Esta comparación se centrará básicamente en el ámbito económico y en medio ambiental. Con este estudio comparativo, llegaremos a la conclusión de qué tecnología es más rentable tanto económica, como ambientalmente.

2 Historia.

Isidoro Cabanyes patentó distintos trabajos de investigación, en los que utilizó sus profundos conocimientos de Matemáticas y Física, para proponer distintas innovaciones en los campos de la obtención y acumulación de electricidad. Trabajó también, en paralelo y en competencia con Isaac Peral, en el diseño de un submarino y fue uno de los pioneros en encontrar soluciones al alumbrado eléctrico en la ciudad de Madrid, pero de todos sus trabajos el más sorprendente y actual, es lo que él denominó “motor aéreo-solar”. Se trata de un diseño para obtener electricidad utilizando torres de gran altura en las que se aplican turbinas que son activadas por las corrientes de convección del aire previamente calentado por la radiación solar.



Figura 2.1.- Isidoro Cabanyes y Olcinellas.

Cabanyes fue la primera persona que patentó este sistema de obtención de energía e incluso llegó a construir, con el apoyo económico de su socio Luis de la Mata y el del Ejército, varias de estas torres en Madrid y Cartagena.

Hoy en día ha quedado relegado, en el ámbito de las energías alternativas, por las placas fotovoltaicas. Pero la obtención de electricidad mediante torres o chimeneas a partir de

la radiación del sol es un tema recurrente que actualmente está experimentándose en zonas desérticas, en lugares tan alejados como Australia y China. Puede tener un potencial muy interesante en el futuro por sus bajos costes de mantenimiento y la posibilidad actual de edificación de chimeneas flotantes, con telas hinchadas con gases ligeros como el helio que resuelvan el problema de la construcción de torres de gran altura con hormigón y estructuras metálicas que requieren elevadas inversiones.

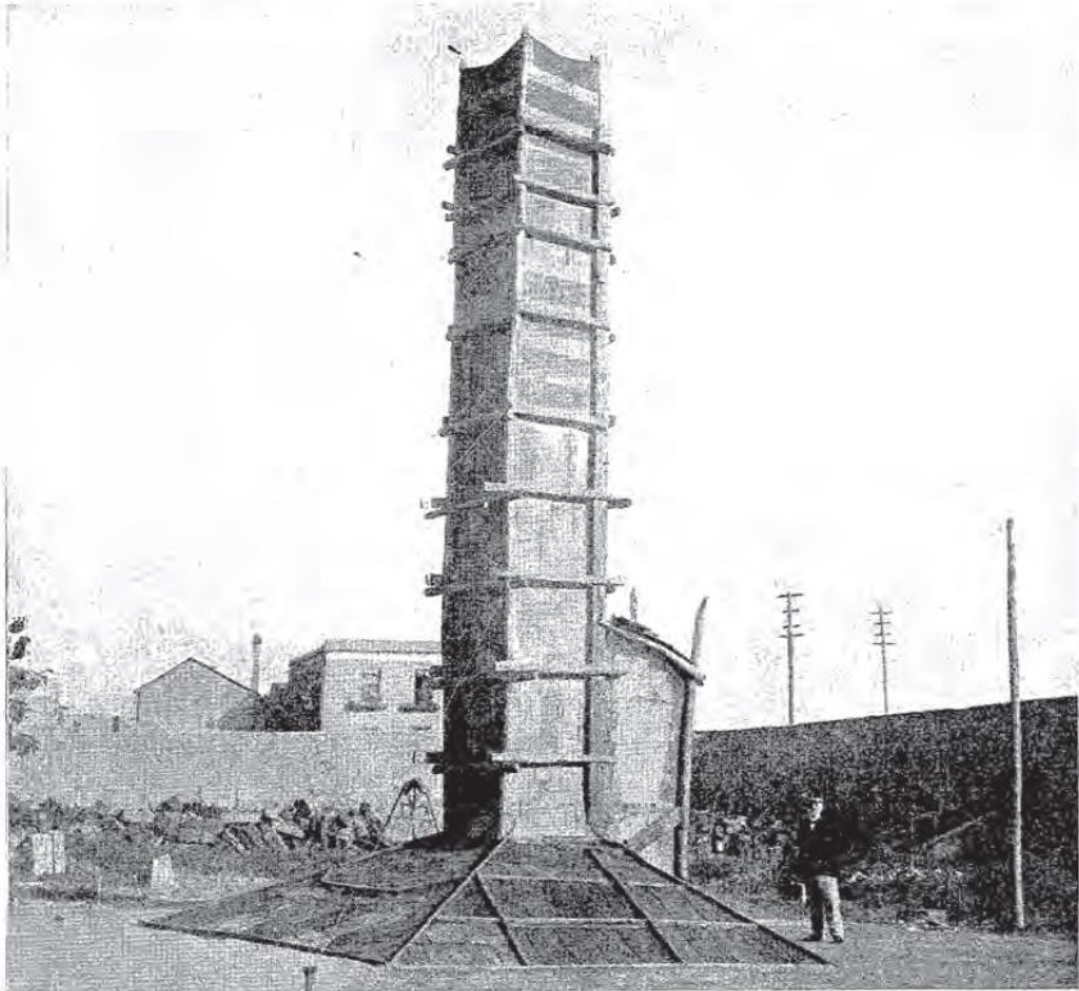


Figura 2.2.- Torre solar de Cartagena.

2.1 Las patentes de Isidoro Cabanyes.

En los más de cien años que han pasado desde que fueron escritas las primeras líneas de la Patente de invención N.º 30332, presentada en 1902 en la Dirección General de Agricultura, Industria y Comercio del Ministerio de Agricultura, Comercio y Obras Públicas a instancia de Isidoro Cabanyes, los sistemas alimentados con energía solar térmica han alcanzado una notable importancia industrial, desde los sistemas de baja temperatura a los de alta temperatura. Si bien la tecnología propuesta por Isidoro Cabanyes se basa en la captación solar de baja temperatura, los logros más destacados se han realizado en aplicaciones de media y alta temperatura, como demuestran las centrales termoeléctricas de concentración, tanto con tecnología de torre central como mediante concentradores cilindroparabólicos. Desde aquel 1902, ha evolucionado la técnica de los materiales, se

han descubierto y utilizado recubrimientos selectivos que mejoran la eficiencia de los absorbedores, se han desarrollado sistemas de mayor concentración de la radiación solar y se ha avanzado en los materiales de aislamiento para reducir las pérdidas de los sistemas solares. En consecuencia, se ha mejorado el rendimiento energético de los sistemas y, por tanto, en estos días son muchas las máquinas solares que sí han alcanzado importancia industrial. Esta evolución, que se ha logrado a través del desarrollo de los sistemas de captación solar, se ha visto acompañada por el descubrimiento y aplicación de nuevos materiales a la construcción, así como por la incorporación de nueva maquinaria que hace posible que hoy sean abordables proyectos que a principio del siglo XX no lo eran.

Y aunque actualmente las expectativas que depositó en sus diseños pueden parecer excesivamente optimistas, la filosofía fundamental de la utilización de la energía solar para estos procesos termo-eólicos sigue siendo la misma y las ideas que Isidoro Cabanyes plantea en sus patentes poseen los principios básicos que posteriormente ha terminado de desarrollar la industria. Estos principios no han perdido actualidad y, dejando aparte posibles discrepancias en la presentación de determinados conceptos físicos en la descripción de alguno de los diseños, se ven reflejados en otros desarrollos realizados de forma independiente con posterioridad, como es el caso de la central realizada en Manzanares en 1982, o las que actualmente se encuentran en planeamiento.

2.1.1 Primera patente: Expediente número 30332. Memoria relativa a un proyecto de “motor solar”

La primera de sus patentes fue presentada en septiembre de 1902 y en ella muestra la idea fundamental de su “motor solar” consistente, en esencia, en una chimenea solar en la cual se interpone un generador eólico.

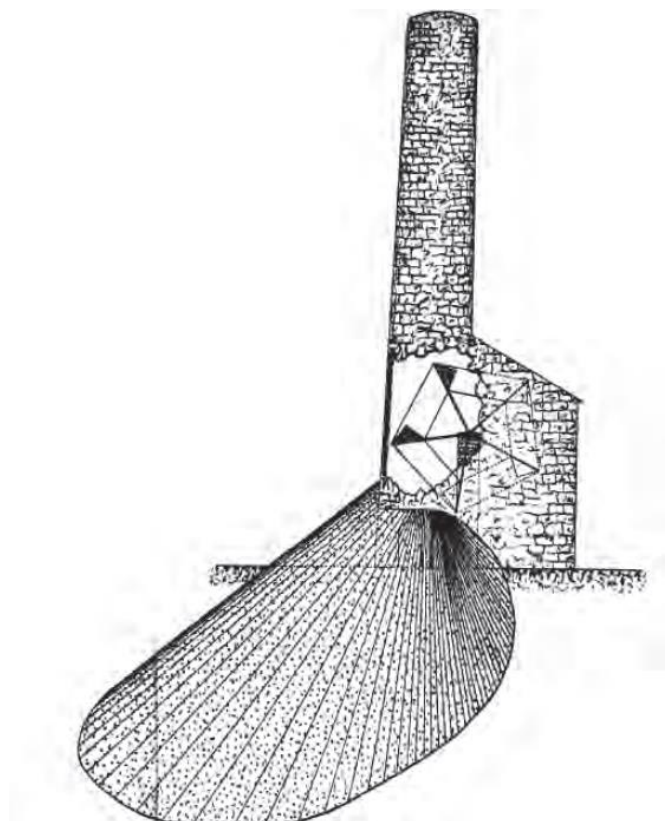


Figura 2.3.- Dibujo del “motor solar” de la primera patente.

Con el objetivo de aumentar la potencia del conjunto, Cabanyes propone instalar una superficie de color negro sobre la que incide la radiación solar en la base de la chimenea, con lo cual dispone de una zona de captación de mayor superficie que la propia de la chimenea. Bajo esta área de captación se encuentra una cámara en la que se calienta el aire que, por convección, ascenderá por la chimenea y activará el generador eólico.

En la misma patente expone que la dependencia de la eficacia del sistema dependerá de la altura de la torre de la chimenea y la diferencia conseguida entre la temperatura del aire ambiente y la temperatura del aire sobrecalentado en la “cámara solar”. Cuanto mayor sea la altura de la chimenea y mayor la diferencia entre la temperatura del aire calentado por la captación solar y la del ambiente, mayor será la potencia del sistema. Esto entendiendo que el generador eólico se mantenga igual en todos los casos, ya que la eficiencia en la conversión de la energía cinética en eléctrica, o trabajo útil del generador, es otro de los parámetros fundamentales del rendimiento del conjunto.

De estos tres parámetros podemos deducir las limitaciones que la época imponía a los diseños de Cabanyes. Por un lado, las técnicas constructivas y los materiales disponibles para la construcción de la chimenea, así como el coste de estos, limitaban la altura de la misma. Sería impensable imaginar en 1902 una torre de una altura de 1000 m como las que se plantean en la actualidad en algunas de las propuestas de chimeneas termo-eólicas que se están diseñando.

El segundo de los parámetros básicos mencionados es la diferencia entre la temperatura del aire exterior (temperatura ambiente) y la temperatura del aire calentado por el subsistema de captación solar. Cabanyes propone la utilización de un tronco de cono oblicuo formado por una chapa de hierro pintada de negro, con pequeñas perforaciones que permitan el paso de aire desde el exterior. Esta chapa de hierro se calentará por efecto de la radiación solar incidente y, a su vez, calentará el aire interior de la cámara. Al tratarse de una superficie opaca, la radiación absorbida será la diferencia entre la radiación incidente y la reflejada, motivo por el que se pinta la chapa de negro. Aun en el caso de que no existiese circulación de aire, la temperatura máxima de la chapa de hierro estará limitada por la temperatura del punto de equilibrio nivel que se alcanzaría cuando se igualasen la energía absorbida de la radiación solar incidente y la pérdida por procesos de conducción y, sobre todo, de radiación y convección.

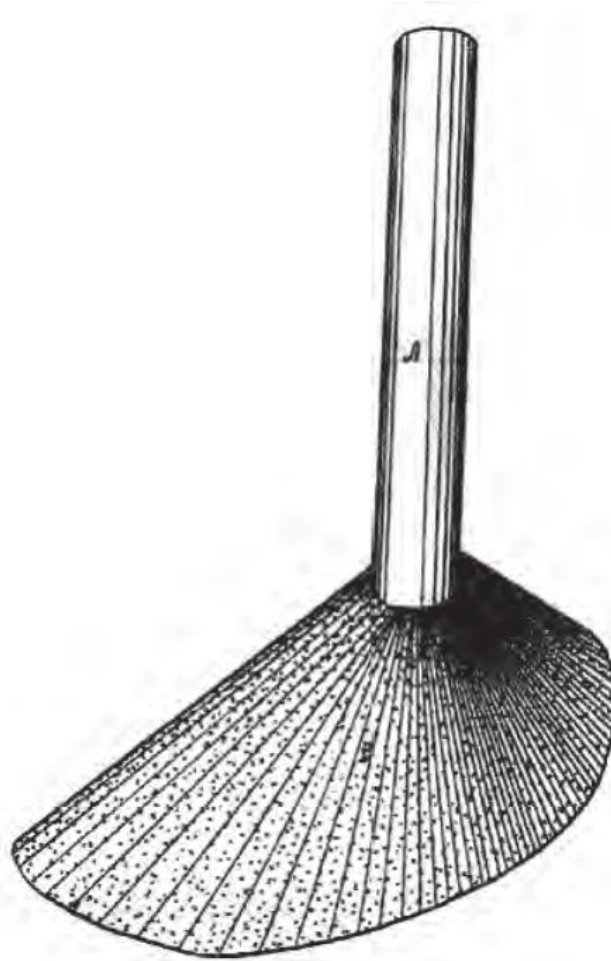


Figura 2.4.- Dibujo de la chimenea solar y el captador de la primera patente.

Cuando parte de la energía absorbida es extraída mediante el caudal de aire circulante, para convertirse posteriormente en energía útil, la temperatura de equilibrio desciende respecto a la anteriormente descrita.

La temperatura máxima que se puede alcanzar en el interior de la cámara está, por tanto, limitada en gran parte por las pérdidas que se producen en el sistema de captación solar. Actualmente para reducir estas pérdidas se dispone de diferentes estrategias. Una de ellas es la utilización de aislamientos, que han de ser transparentes a la radiación incidente si se sitúan en la zona de incidencia solar.

Hay que considerar que cuanto mayor sea la temperatura de la chapa, mayores serán las pérdidas que se producen mediante fenómenos de radiación, de una longitud de onda mayor que la visible. Para disminuir las pérdidas por radiación de onda larga se utilizan elementos como el vidrio de alta transparencia a la radiación, de longitud de onda en torno al visible y opaco a la radiación de mayor longitud de onda, situado sobre la chapa y a una distancia de esta. También se utilizan superficies selectivas como recubrimiento de la superficie absorbente (la chapa), las cuales tienen un alto índice de absorción (dado por la "absortancia") y un valor de emisión (dado por la "emitancia") bajo. Una pintura negra puede tener ambos valores en torno al 0.9, mientras que un recubrimiento selectivo suele estar alrededor del 0.9 para la "absortancia" y el 0.2 para la "emitancia".

Otra de las estrategias que se utilizan, actualmente, para aumentar la temperatura del fluido utilizado para obtener la energía útil es la de concentrar la radiación solar. En función de las temperaturas deseadas, los más utilizados son espejos planos que concentran la radiación solar incidente sobre un foco (sistemas de receptor central de alta temperatura), o espejos cilíndroparabólicos con receptores lineales para media temperatura. Las temperaturas más habituales, alcanzadas en la actualidad con estos sistemas, están entre 300 °C y 700 °C, por lo que directamente se utilizan en turbinas, en vez de utilizarse para activar generadores eólicos, como en el caso del diseño de Cabanyes.

Aunque si bien la estrategia del ingenio diseñado por Cabanyes se basa en la utilización de grandes áreas de captación, en las que se produce el calentamiento a baja temperatura, este breve resumen de soluciones adoptadas en la actualidad nos puede servir para hacernos una idea de las limitaciones de la técnica con las que se encontró Cabanyes, en 1902, a la hora de diseñar su «motor solar» y, por tanto, valorar su ingenio más allá de la apariencia de sencillez que pudiese darse tras una primera lectura.

Otro de los subsistemas fundamentales es el generador eólico utilizado. El diseño de la rueda del generador eólico es el elemento que más varía entre esta primera patente y la siguiente del año 1905. Este primer diseño propone un sistema de “cinco alas artesas de forma prismática rectangular de bases no paralelas” unidas por cinco radios al eje de la rueda del rotor.

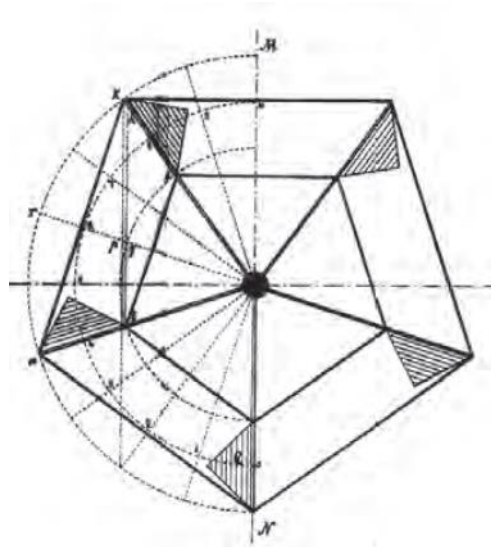


Figura 2.5.- Esquema de la proyección horizontal de la rueda del motor.

El flujo de aire ascendente haría rotar el sistema, produciendo un trabajo que podría ser utilizado para generar electricidad u otro trabajo útil. Este diseño que, en cierto sentido, recuerda a las ruedas de los molinos de agua, fue sustituido en la patente presentada tres años después por otro de eje vertical con alas helicoidales.

En esta primera patente, Isidoro Cabanyes no solo muestra el diseño de su ingenio, sino que además calcula cual será la energía producida y el coste de la construcción del mismo. Según los cálculos por él realizados, un “motor solar” con una torre de 23 metros de altura y una sección de 10x10 metros, costaría sesenta mil cien pesetas que, según

menciona en la misma patente, es cuatro mil novecientas pesetas menos de lo que costaría un motor de vapor de 100 caballos de potencia, que es la misma potencia que con una diferencia de temperatura de 10 °C podría desarrollar su “motor solar”.

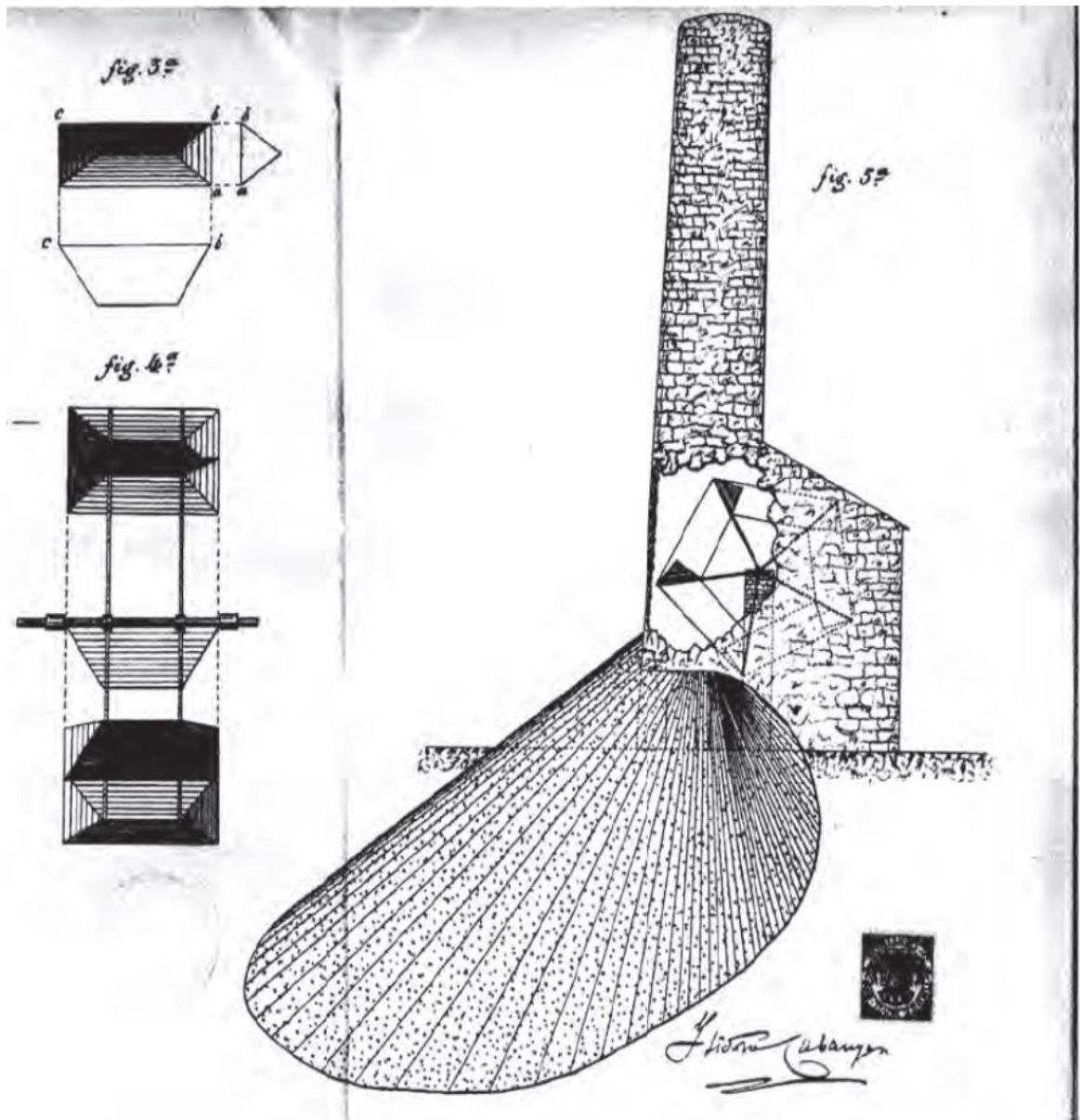


Figura 2.6.- Dibujo del motor solar al completo.

No obstante, y probablemente consciente de lo que esta inversión y su riesgo suponían en esa época, en el mismo expediente de la patente adelanta que el principal uso sería el del riego, para lo cual serían necesarios ingenios de menor potencia, proponiendo entre otros ejemplos uno que consta de una torre de 9 metros de altura, 1x1 metros de sección y 25 metros cuadrados de área captadora, por un coste de 1172 pesetas.

Gracias a una noticia publicada por el diario ABC, el 14 de agosto de 1903, sabemos que Isidoro Cabanyes llevó a la realidad este “motor solar” construyendo un prototipo del mismo. Lamentablemente no hay constancia del resultado. No obstante, este primer diseño evolucionó notablemente, de forma que tres años después presentó otra patente de “motor solar” con significativas diferencias, por lo que podemos suponer que los resultados no fueron todo lo satisfactorios que deseaba.

2.1.2 Segunda patente: Expediente número 37137. Memoria relativa a un proyecto de “motor solar”

En este proyecto, Isidoro Cabanyes rediseña todos los elementos constituyentes del “motor solar” presentados en el apartado anterior. En primer lugar, el subsistema de captación solar está formado por dos troncos de cono, metálicos y paralelos, que conforman una cámara intermedia dónde el aire es calentado. La primera de las chapas metálicas mantiene las perforaciones, que ahora se detallan hasta el punto de dar su diámetro y separación (posteriormente Cabanyes dice que estas perforaciones podrían ser sustituidas por rejillas en la parte baja de la cámara, lo que en principio parece que daría mejor resultado). Estas dos superficies metálicas forman ocho canales independientes para el calentamiento del aire por la radiación solar incidente.

Es de destacar el nivel de detalle con que se describe, en el mencionado expediente, el diseño y la construcción de ambos troncos de cono.

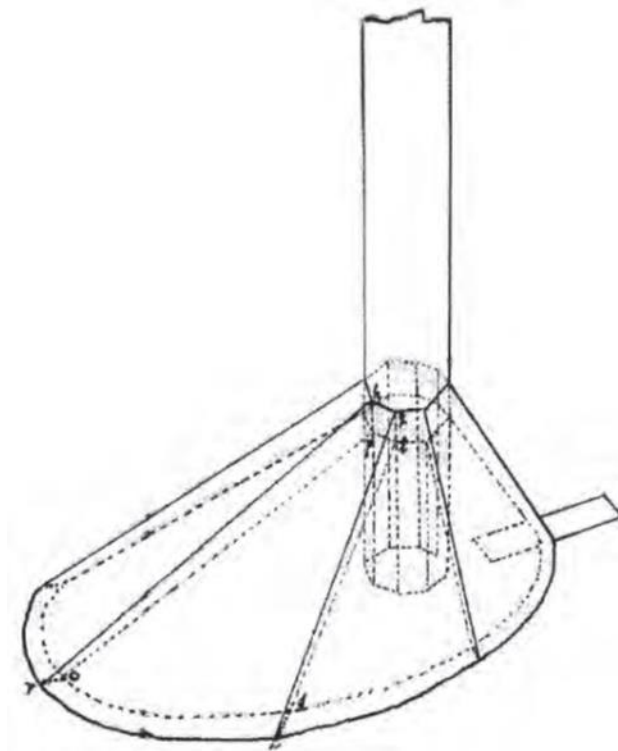


Figura 2.7.- Dibujo en el que se muestra las dos superficies metálicas que forman el captador.

También se modifica la chimenea, teniendo esta una base octogonal en la que encajan los sectores del basamento. En los puntos de unión entre el basamento y la chimenea dispone de compuertas que permiten el paso del aire calentado cuando están abiertas, o lo bloquean en caso de cerrarse.

Otro de los elementos más evolucionados, frente al diseño anterior, es la sustitución de la rueda motor por un sistema de helicoides, fijados a un eje vertical, a lo largo de la chimenea.

Este diseño incluye también un regulador consistente en dos medios discos metálicos, montados sobre ejes horizontales en el interior de la chimenea, que al ser accionados desde el suelo, mediante tirantes, permiten regular el caudal del aire ascendente y, por tanto, el giro del eje vertical.

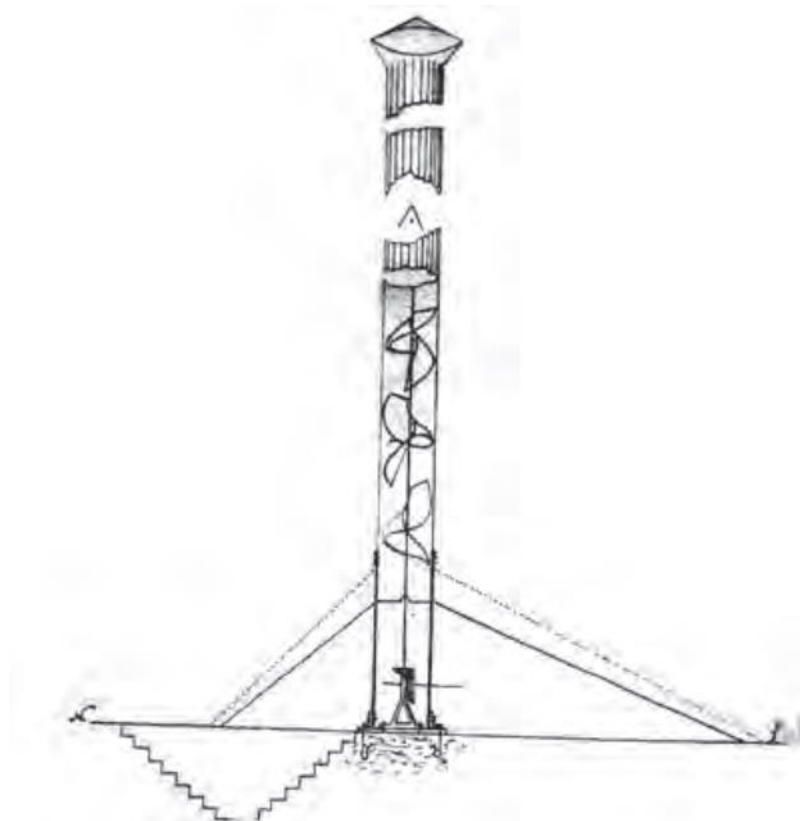


Figura 2.8.- Dibujo en el que se muestran los helicoides fijados al eje vertical.

Durante el funcionamiento del ingenio, los discos se dejan en posición libre y se abren las compuertas correspondientes al área del basamento, que es calentada por la radiación solar, debiendo ser cerradas o abiertas según varíe la zona de incidencia a lo largo del día. Así mismo, Cabanyes prevé el funcionamiento del sistema como una torre de viento, en caso de que exista este.

En el último apartado del expediente especifica que el mantenimiento del sistema se reduce a pintar la chimenea periódicamente y al engrase de los cojinetes.

Los cambios entre estos dos expedientes de patente muestran un desarrollo en el modelo, probablemente consecuencia de las experiencias recogidas de la construcción del primer diseño. Con las mejoras llevadas a cabo, Isidoro Cabanyes estimó que su

proyecto es realizable y con futuro de explotación, tanto es así que presentó un expediente de esta segunda patente de invención en la Oficina Nacional de la Propiedad Industrial de Francia y un detalle propio de un proyecto que se prevé como realizable y con futuro de explotación.

El 12 de Julio de 1906, a instancia de Isidoro Cabanyes, se instruyó en el Ministerio de Fomento el Expediente N.º 38695, que consistía en un certificado de adición a la Patente N.º 37137. En este expediente, Cabanyes recoge la posibilidad de emplear fuentes de calor alternativas a la radiación solar para el funcionamiento del ingenio descrito anteriormente.

En el texto menciona la posibilidad de utilizar el calor procedente de la combustión de combustibles, como petróleo, alcohol o hulla, pero también especifica como posibles fuentes de calor la cal viva, la fermentación de estiércol e incluso utilizar la cámara bajo la cubierta metálica para guardar cabezas de ganado y así aprovechar el calor desprendido por su metabolismo.

2.1.3 Conclusiones.

Solamente tenemos noticias de la construcción por él mismo del primero de sus ingenios, desconociendo el resultado práctico del mismo, y ninguna noticia de que se llevase a cabo algún prototipo experimental del segundo de sus diseños, pero el hecho de que hoy en día sigan planteándose como alternativas energéticas diseños de generadores basados en torres termo-eólicas, puede hacer pensar que si no hubiese sido por las limitaciones que existían a principios del siglo pasado, en cuanto a materiales y técnicas de construcción asociadas a estos, quizá los diseños de Isidoro Cabanyes habrían tenido un desarrollo posterior y hubiese sido viable su utilización.

2.2 Situación de la técnica en el momento de presentación de las patentes de invención de Isidoro Cabanyes.

El objetivo fundamental de este apartado del trabajo es determinar si las patentes anteriormente citadas pueden considerarse novedosas, atendiendo al estado de la técnica en aquellos años, o si, por el contrario, se encontraban al alcance de los conocimientos que un técnico en la materia hubiera podido desarrollar sin esfuerzo inventivo en esa época. Para ello, se procede a realizar un análisis y comparación de la invención con el estado de la técnica anterior a la fecha de presentación de las mencionadas patentes.

2.2.1 Estado de la técnica.

La valoración de cualquier invención debe realizarse a la luz de la tecnología conocida y disponible en el momento del depósito de la solicitud de patente. Este concepto recibe el nombre de “estado de la técnica” y comprende todo lo que antes de la fecha de presentación de una solicitud ha sido hecho accesible, en cualquier forma, al público.

Con la finalidad de situar las invenciones de Isidoro Cabanyes en su contexto tecnológico, hemos realizado una búsqueda de anterioridades, es decir, de solicitudes y registros de patentes existentes en el estado de la técnica antes de la fecha de presentación de su primera patente en 1902.

Como consecuencia de esta búsqueda se han encontrado diversas patentes que se consideran el estado de la técnica más próximo, ya que, de todo el campo técnico analizado, son las que poseen más elementos comunes con las invenciones estudiadas.

- Máquina inducida por el tiro de una chimenea:

Esta patente alemana de 1879 describe una chimenea *a*, de 20 a 30 metros de altura, en cuya base se ubican tres molinetes, *b*, *d* y *c*, provistos de aspas.

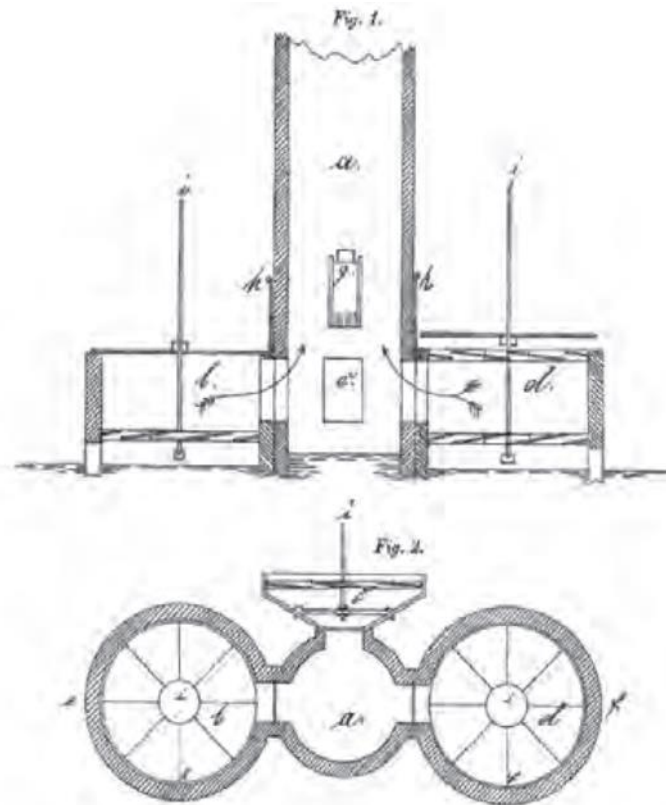


Figura 2.9.- Máquina inducida por el tiro de una chimenea.

Bajo condiciones de viento, en la parte superior de la chimenea se inducen internamente corrientes de aire que hacen girar los molinetes y, en consecuencia, los ejes *i*. cabe destacar que en movimiento rotacional de los ejes *i* será utilizado posteriormente para la generación de energía eléctrica. En caso de que el viento esté en calma, dicha inducción no se produce y, para remediarlo, la patente indica que debe encenderse un fuego en el lateral que comunica con la chimenea a través de la apertura *g*, lo que provoca un flujo de aire (aprovechando el tiro de la chimenea) similar al que se produce en tiempo ventoso. La velocidad de funcionamiento de la máquina, además del viento exterior, depende de la alimentación del fuego.

- Generador eléctrico:

Esta patente americana consta de una chimenea 1, con un conducto horizontal 2 en el que se encuentra ubicado un calefactor eléctrico 3 y en cuyo lateral existe un deflector 5.

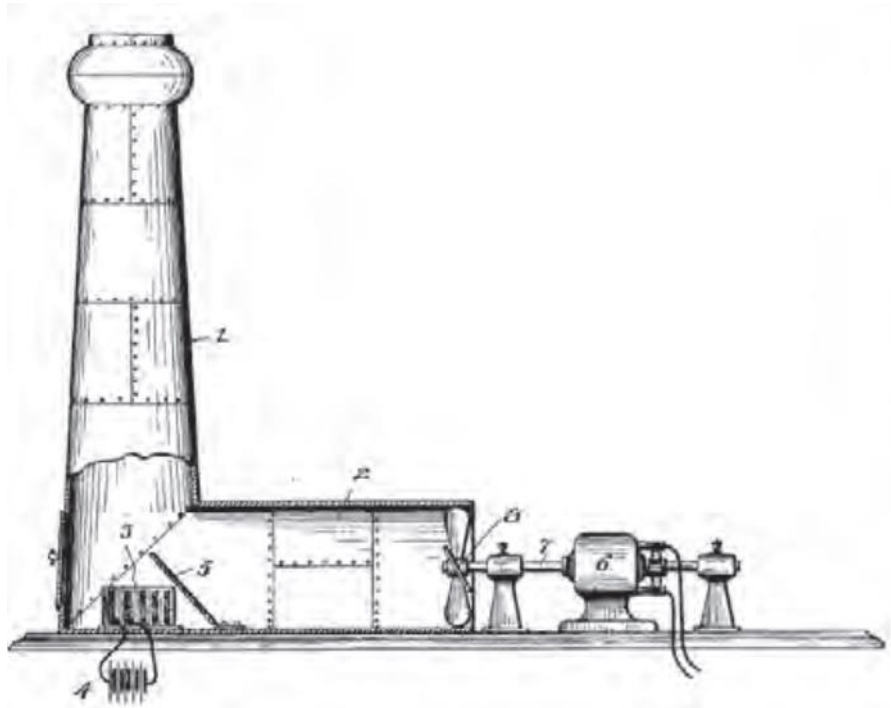


Figura 2.10.- Patente de generador eléctrico de Enoch Claud.

Al encender el calefactor se induce una corriente de aire en sentido ascendente que mueve unas paletas 8, unidas a un alternador 6, generándose electricidad. En el documento de patente se indica que puede utilizarse cualquier otro tipo de calefactor.

2.2.2 Conclusiones.

Existen varias diferencias entre las patentes de Isidoro Cabanyes y las encontradas en el estado de la técnica.

La diferencia fundamental, es que el aporte de calor en las patentes de Cabanyes se realiza mediante energía solar, con las implicaciones termodinámicas que este hecho implica. El rendimiento de esta máquina depende de la velocidad de ascenso de la corriente de aire y esta velocidad está directamente relacionada con la diferencia entre la temperatura de la base y la temperatura exterior en la parte superior de la chimenea. Por lo tanto, cuanto mayor sea la aportación de energía en la base de la chimenea mayor será la velocidad de ascenso de la corriente de aire y mayor el rendimiento. Se percibe rápidamente que la sustitución de un aporte de energía concentrado, cuya finalidad es obtener una diferencia importante de temperaturas, por un aporte de energía solar, que en sí misma no es una energía concentrada, implica la resolución de un problema técnico.

Es necesario por consiguiente encontrar una solución concreta para, en primer lugar, coleccionar del sol la cantidad suficiente de energía que sea capaz de hacer funcionar el mecanismo y, en segundo lugar, dirigirla y concentrarla hacia la base de la chimenea.

Existían en aquella época varias posibles formas conocidas de coleccionar energía solar, todas ellas requiriendo una gran superficie. Con grandes espejos, por ejemplo. La manera optada por la invención del señor Cabanyes, mediante un faldón metálico estático pintado en negro, además de su simplicidad mecánica, tiene en cuenta por su forma

cónica el aprovechamiento de la energía solar durante todo el día, resolviendo así el inconveniente del movimiento de la trayectoria del sol.

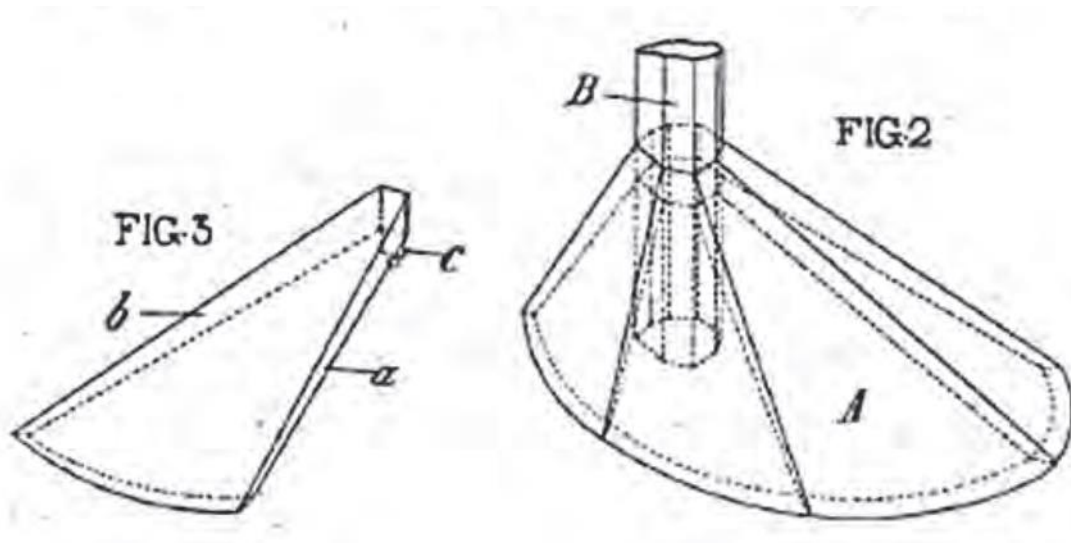


Figura 2.11.- Diferentes componentes de la segunda patente de Isidoro Cabanyes.

La segunda dificultad a superar es concentrar esa energía en la base de la chimenea. La solución adoptada resulta ingeniosa, ya que es el propio flujo de aire el que, al atravesar los múltiples orificios del faldón metálico y entrar en la cámara interior, adquiere la energía térmica que el propio movimiento inducido de la corriente de aire concentra hacia la base de la chimenea.

Ante las diversas posibilidades existentes, no resultaría obvio para un experto haber modificado el estado la técnica en el sentido que lo hizo el señor Cabanyes, por lo que podemos concluir que su invención, contenida en las distintas patentes que realizó, es muy meritoria por su carácter novedoso.

2.3 Invenciones posteriores al momento de presentación de las patentes de Isidoro Cabanyes.

Las invenciones que a continuación se van a explicar son posteriores a las fechas en las que Isidoro Cabanyes llevó a cabo la presentación de sus diversas patentes, por lo tanto no entraría en el estado de la técnica en el que Cabanyes realizó sus invenciones. Sin embargo los inventos que se van a describir a continuación siguen el principio de funcionamiento del motor solar de Cabanyes, aunque cada uno de ellos tiene un toque de distinción propio de cada ingeniero que los diseñó.

2.3.1 Chimenea de Bernard Dubos.

En 1926 Dubos envió su idea a la Academia Francesa de Ciencias, entidad que recomendó que la idea de Dubos fuera realizada, especialmente en el norte de África, en la región de influencia francesa para ser precisos, donde se carecía de recursos combustibles y se necesitaba de energía para su desarrollo.

Dubos decía que para obtener un poderoso viento vertical aprovechable, se necesita una llanura desértica calurosa, y en las proximidades de ésta, montañas razonablemente altas, cuyas paredes debían ser lo más verticales posible. En la llanura, la presión

atmosférica será menor que en la parte alta de la montaña, para la cual Dubos supone una altura unos 2000 metros. La diferencia de presión es un factor importante, pero tan o más importante es la diferencia de temperaturas entre la llanura y la cima de la montaña.

Normalmente el aire entre el suelo y la cima de la montaña estará dividido en capas con temperaturas y presiones que disminuyen gradualmente a medida que aumenta la altura, pero si conseguimos abrir un conducto (a través de todas esas capas para que la diferencia de presiones y temperaturas sea lo más brusca posible) usando el equivalente a una enorme chimenea a través de la cual circule el aire calentado en la superficie desértica, se generará una corriente de aire lista para su explotación.

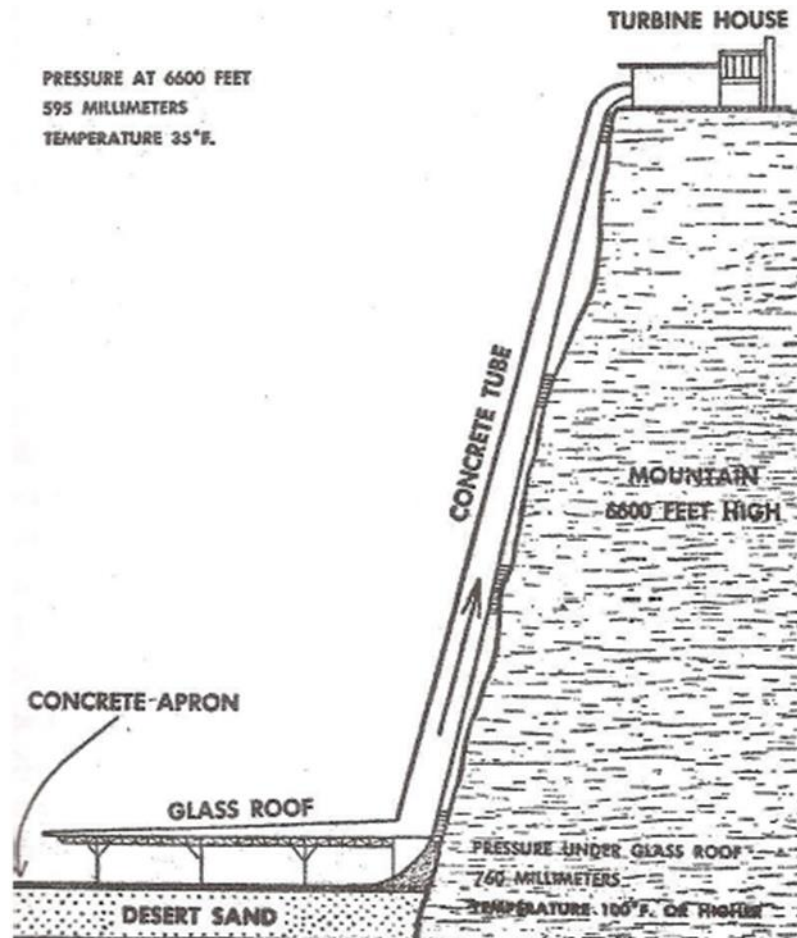


Figura 2.12.- Esquema de la chimenea de Bernard Dubos.

La turbina de aire que aproveche la corriente ascendente tendría que estar localizada al final de la chimenea, en la cima de la montaña. La montaña también soportaría la chimenea, que estaría anclada a su ladera. Para hacer efectivo el esquema, el suministro de aire caliente debe ser estable y no debe perderse calor a través de las paredes de la chimenea. Para lograr un buen suministro de aire caliente, Dubos dice que la parte inferior de la chimenea debe ensancharse para entrar en una estructura tipo invernadero. El aislamiento necesario en la chimenea se conseguiría si ésta se fabricara con cemento poroso, que es un material ligero y buen aislante.

2.3.2 Generador de ciclones.

El militar francés Edgard Henri Nazare, ingeniero aeronáutico especializado en mecánica de fluidos, tuvo la oportunidad de observar y estudiar en el desierto del Sahara el fenómeno conocido como “torbellino”, del cual tomó mediciones con rigor científico que desembocaron en el desarrollo de una idea de tecnología para aprovecharlos.

El aire caliente cerca de la superficie del suelo asciende rápidamente a través de una pequeña bolsa de aire más frío, de baja presión encima de él. Si las condiciones son las adecuadas (terrenos planos estériles, desérticos o asfaltados que facilitan el movimiento horizontal del remolino y permiten la entrada de aire caliente a la base, cielos despejados y muy soleados para calentar el aire superficial que alimentará al vórtice ya que es la energía solar la que provoca el fenómeno y una atmósfera con nulos o débiles vientos y aire frío, ya que es la diferencia de temperatura entre el aire superficial y el atmosférico lo que hace subir el aire) el aire puede empezar a rotar. Como el aire sube rápidamente, la columna de aire cálido se extiende verticalmente y se estrecha horizontalmente, haciendo que el efecto de rotación debido al principio físico de conservación del momento angular se intensifique. Cuanto más aire caliente se precipita hacia el vórtice en desarrollo para reemplazar el aire que asciende, el efecto de giro se hace más intenso.



Figura 2.13.- Torbellino creado de forma natural.

Cuándo Nazare observó el fenómeno y vio lo fuertes que podían ser estos remolinos, imaginó que de alguna manera se podrían aprovechar para producir trabajo y/o energía eléctrica, es en este momento cuando empezó a trabajar en su invención. Nazare describe su invento como una torre de vacío, en el interior de la cual es posible, mediante los dispositivos aerodinámicos adecuados, generar un ciclón con una potencia tal que justifique la construcción del dispositivo. La torre debería tener de 100 a 300 metros de altura siendo ancha en la base, estrechándose después y volviendo a ensancharse a la

salida. Para obtener una diferencia de temperatura entre la entrada en la base y la salida, se coloca la torre sobre una superficie elevada del suelo (no especifica el material, solo menciona una superficie) de gran área que recibirá la radiación solar, haciendo las veces de colector solar, que calentará el aire entre el suelo y la superficie del dispositivo. En éste espacio se colocan deflectores curvos, fijos o variables, que dirigirán el flujo de aire ascendente a la entrada de la torre en la base, siguiendo una espiral de vacío. La contracción de la torre tiene por objetivo aumentar la energía cinética del flujo de aire. Una vez establecido el flujo, se puede utilizar una hélice o una turbina para extraer la energía.

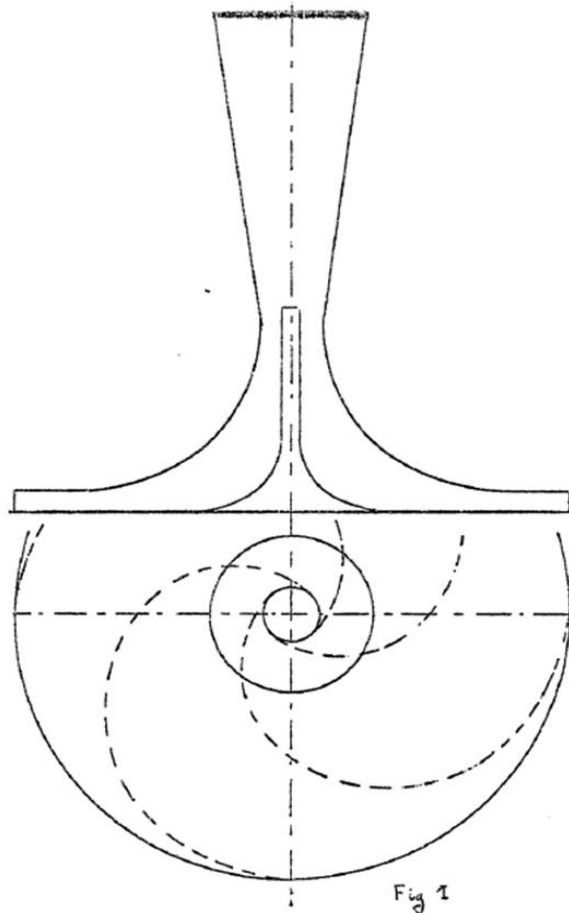


Figura 2.14.- Esquema del generador de Nazare, según como aparece en la patente.

Nazare concluye que su dispositivo es funcional y que es capaz de suministrar grandes potencias. Según sus cálculos, una torre de 300 metros de altura, con una temperatura de 75°C en la base y 40°C en la salida, y una sección transversal a la salida de 700 m², desarrollaría una potencia de 720 MW, lo que hace a la propuesta muy atractiva, si se tiene en cuenta que no necesita combustible alguno.

La invención de Nazare no era mala, sin embargo no tuvo en cuenta parámetros verdaderamente determinantes en la realización material de dicho aparato. No tuvo en cuenta la magnitud del flujo de aire caliente que se requiere para mantener el dispositivo en funcionamiento, o si la energía solar sería suficiente para elevar la temperatura del aire. Es por esto que el generador de ciclones de Nazare nunca se llevó a cabo.

3 Tecnología y perspectivas de utilización de las centrales eólico-solares.

Las centrales eólico-solares son consideradas como uno de los mecanismos de aprovechamiento de la energía eólica de eje vertical, según la clasificación de los aerogeneradores en función de la posición de su eje de giro.

Dichas instalaciones se basan en una tecnología que utiliza la energía solar térmica (en algunas aplicaciones recientes se incluye también el uso de la geotermia) para generar electricidad, basándose en un fenómeno tan sencillo como la convección (el aire caliente pesa menos y tiende a ascender). La planta consta de una superficie circular de terreno que se recubre con un material transparente, una torre hueca central y unas turbinas, colocadas en el interior de la torre, que se mueven debido al aire caliente que asciende por la misma. Esta tecnología está adecuada para aquellos emplazamientos que cuentan con una buena irradiación del sol.

En la siguiente imagen se presenta un mapa de los recursos solares (radiación solar directa) en el mundo viendo así, las zonas en las que tendría sentido desarrollar estas aplicaciones.

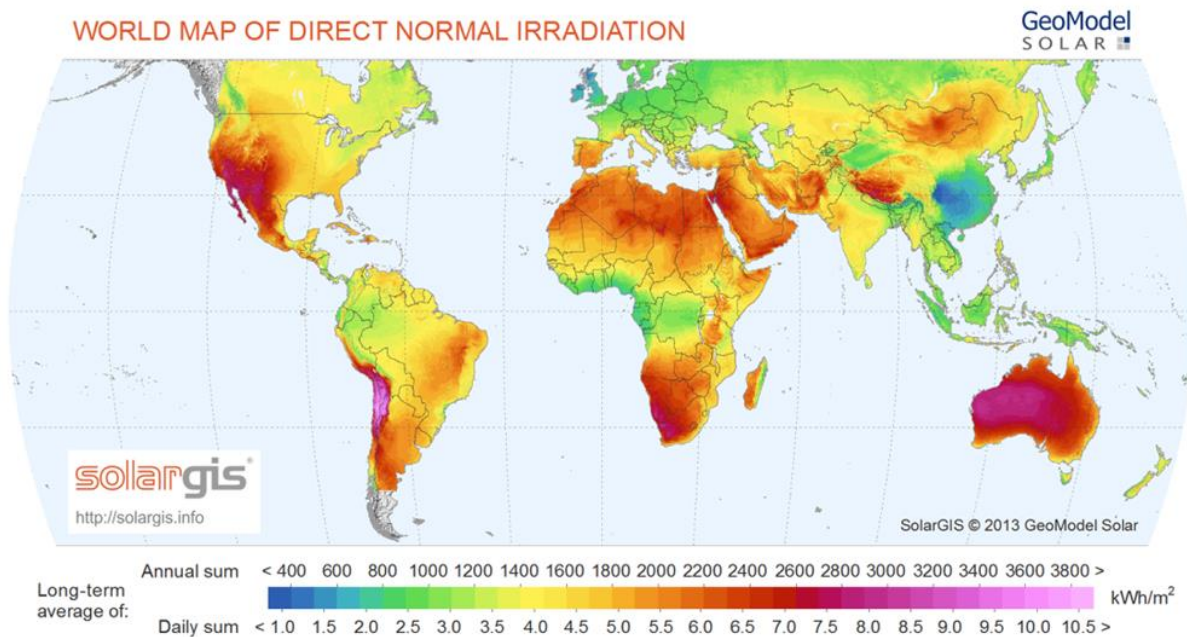


Figura 3.1.- Mapa de radiación solar directa.

realización de este trabajo procedan de universidades, centros y empresas, situados en zonas que tienen una gran radiación solar y gran disponibilidad de terreno, ya que una de las características de esta tecnología es la gran superficie de suelo que requieren, debido al tamaño del invernadero. De hecho, el gran potencial de aplicación de las torres eólico-solares se encuentra en las zonas desérticas, en las que, en caso de llegarse al éxito con esta técnica, podría constituirse una importante fuente de generación de electricidad con el empleo de un recurso renovable e inagotable como es el sol.

En este trabajo se realizará una revisión de las centrales eólico-solares que se han construido o que se han planeado en los últimos años, se describirá el principio de funcionamiento y sus principales componentes y se detallarán algunas variaciones sobre la configuración clásica de las centrales eólico solares descritas por Isidoro Cabanyes.

3.1 Proyectos recientes.

Además de las referencias a Leonardo da Vinci, que realizó algunos dibujos de torres solares mencionados por algunos autores, la primera iniciativa sólida la constituyen los trabajos de Isidoro Cabanyes en la primera década del siglo XX. Cabanyes propuso un nuevo dispositivo formado por una chimenea, que tendría en su base un colector solar destinado a calentar el aire y provocar así una corriente ascensional que moviera una turbina (generador eólico) situada en el interior de la chimenea.

Este proyecto, parece que fue olvidado hasta que en 1931, el alemán Hans Gunter (sin que se sepa que tuviera conocimiento del ingenio del español) realizó una descripción de un dispositivo similar. Más recientemente, a principios de los años 70, Roberto E. Lucier solicitó las patentes de la torre solar, patentes que le fueron concedidas en los Estados Unidos, Canadá, Australia e Israel.

3.1.1 Central eólico-solar de Manzanares.

En 1981, el Ministerio alemán de Investigación y Tecnología (BMFT), en colaboración con la compañía eléctrica Unión Fenosa, promovió y financió la construcción de una torre eólico-solar en la localidad manchega de Manzanares, en la provincia de Ciudad Real. La dirección del proyecto fue llevada a cabo por la empresa alemana Schlaich and Partners, bajo la dirección del profesor Jörg Schlaich y con la colaboración y apoyo del Ministerio español de Industria y Energía.

La central funcionó satisfactoriamente durante, aproximadamente, ocho años y constituye la referencia más sólida para esta tecnología. En ella se combinaban varias técnicas ya conocidas que forman el principio de funcionamiento de las centrales eólico-solares: el efecto invernadero, el efecto producido por la diferencia de densidad entre la parte baja y la parte alta de la chimenea y el empleo de una turbina eólica para aprovechar la corriente ascendente.

La torre tenía una altura de 195 m, con un área de colector de 46 000 m² y una turbina de 50 kW de potencia nominal.



Figura 3.2.- Central eólico-solar de Manzanares.

El colector estaba formado por una cubierta y un acumulador de calor. La cubierta del colector realizaba dos funciones: por un lado propiciaba la creación del efecto invernadero y por otro facilitaba la conducción del aire calentado hasta la chimenea. Se utilizaron láminas de material plástico, que eran tensadas y situadas a una altura del suelo que varía de los 2 a los 8 m y ocupan un perímetro circular de 225 m de diámetro.

El acumulador de calor fue el propio suelo: durante la primera fase de experimentación, el suelo se encontraba en su estado natural y, posteriormente, se ennegrecieron varias superficies. La producción eléctrica no solo se realizaba durante las horas de sol sino que se empleaba también la acumulación de calor en el suelo y su cesión lenta al medio ambiente durante la noche.

La chimenea era de chapa de acero galvanizado pretensado con un perfil trapezoidal, con un diámetro exterior de 10 m y una altura de 225 m, su peso alcanzaba el valor de 200 toneladas.

El conjunto turbo generador estaba formado por una turbina de palas de fibra de vidrio y poliéster de paso variable y 5 metros de longitud, un regulador de caudal similar a los empleados en las turbinas hidráulicas y un generador eléctrico formado por dos grupos en tándem de 140 y 40 kW, cuyo acoplamiento dependía del número de revoluciones de la turbina. En la siguiente imagen se puede apreciar el conjunto turbo-generador de la central eólico-solar de Manzanares.

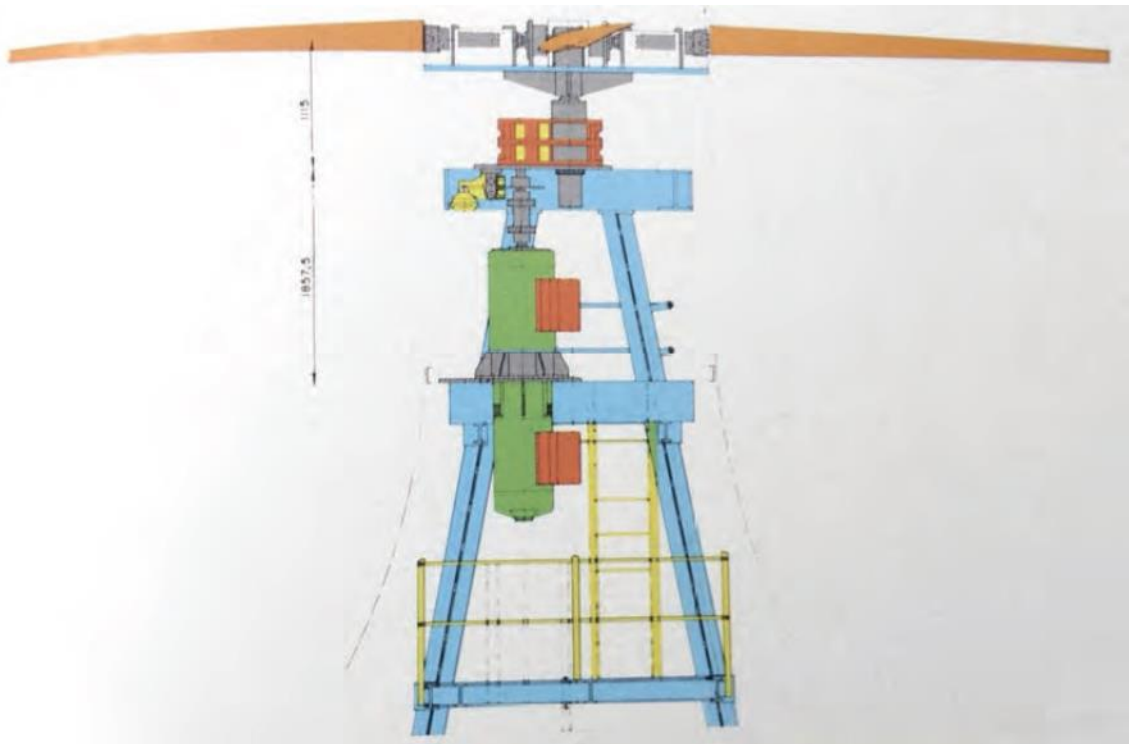


Figura 3.3.- Conjunto turbo-generador de la central de Manzanares.

La regulación de las revoluciones se realizaba mediante la variación del ángulo de paso de los álabes de la turbina eólica.

El incremento de calor que se producía en el suelo y en la lámina de plástico era transferido al aire existente entre ambas superficies. Una parte de la energía radiada durante el día era acumulada por el suelo, volviendo nuevamente al aire durante la noche, lo que teóricamente hacía posible el funcionamiento de la central durante las veinticuatro horas del día, verificaciones que no pudieron realizarse durante la operación de la planta.

La central eólico solar de Manzanares acumuló una experiencia de funcionamiento de unas 15 000 horas, consiguiendo periodos de funcionamiento de unas nueve horas al día.

La central estaba concebida como un primer prototipo del cual obtener la experiencia y los conocimientos necesarios como para abordar centrales de potencias superiores a los 200 MW. Hacia finales del año 1989, durante una fuerte tormenta, la chimenea solar se desplomó estrepitosamente poniendo fin al proyecto de la central eólico solar, que no pudo ponerse de nuevo en marcha.

La única continuación del proyecto fue la central fotovoltaica conocida como Toledo- PV, cuya construcción fue posible gracias a la indemnización que la compañía de seguros dio a Unión Fenosa tras el accidente. Un último incidente acompañaría a la central eólico-solar de Manzanares y fue el incendio de la subestación eléctrica en la que se guardaba la documentación del proyecto, que acabó destruida, conservándose solamente algunos documentos finales en las oficinas centrales.

3.1.2 Prototipo chino en Mongolia interior.

La segunda realización práctica de un proyecto eólico solar tuvo lugar en la región de la Bahía Jinsha Wuhai, en Mongolia Interior (China). Esta región tiene ventajas únicas para la construcción de una con chimenea solar:

- La riqueza de los recursos del desierto: la arena sirve como medio de almacenamiento del calor.
- Los materiales de construcción (vidrio, cemento y acero), los métodos de trabajo y la mano de obra se pueden obtener a nivel local.
- Las condiciones climáticas son excepcionales: un clima templado continental seco durante todo el año, ayudando así a mejorar la velocidad de flujo de aire.

La potencia total prevista para este proyecto era de 25 MW, lo que representa un total de 2,5 millones de metros cuadrados de desierto ocupados por un colector invernadero y una inversión total de 160 millones de euros.



Figura 3.4.- Prototipo chino en Mongolia interior.

El trabajo se realizará en tres fases:

- La primera fase del proyecto se completó entre Mayo de 2009 y Diciembre de 2010. Consistió en la construcción de un prototipo de 200 kW, con una torre de 53 m de altura y 18 m de diámetro, que ocupa 40 000 m² de desierto.

- La segunda fase proyecto, que no llegó a completarse, consistía en la construcción de una central de 2,2 MW de potencia nominal y una superficie de invernadero de más de 220 000 m² del desierto.
- Finalmente, la tercera fase del proyecto, cuya iniciación estaba prevista para mediados del año 2012, pretendía la construcción de una chimenea solar con una potencia total de 25 MW, con un invernadero colector ocupando una zona desértica de 2 500 000 m².

En la actualidad, la potencia es de 200 kilovatios, la unidad generadora puede suministrar 400 000 kWh de electricidad al año, ahorrando el equivalente de 100 toneladas de carbón y 900 toneladas de agua, en comparación con la generación de energía por una planta térmica. Cabe destacar que la segunda y tercera fase del proyecto no se llevaron a cabo por la cercanía de un aeropuerto.

Los datos e información recogida en este proyecto se están utilizando tanto para mejorar el modelado matemático de la tecnología como para dar luz a nuevos diseños de torres solares.

3.1.3 Central eólico-solar en Australia.

Hacia el año 2001 la compañía Enviromission anunció la construcción de una planta de 200 MW de potencia nominal en el sur de Australia.

El proyecto pretende construir una torre de 1000 m de altura que proporcionará una energía de 700 GWh de producción anual, se construirá en el desierto de Nuevo Gales en Australia y dará electricidad a unos 200 000 hogares, suponiendo un ahorro de emisiones de dióxido de carbono equivalente al ahorro de 700 000 barriles de petróleo y, por lo tanto, una reducción de emisiones de dióxido de carbono de 900 000 toneladas. El coste estimado de esta planta es de 380 millones de euros y la superficie acristalada será de 20 km², con un diámetro de 5 km. La torre tendrá 1 km de diámetro en su base, con un espesor de pared de 1 m, la altura total será de 1 km y un espesor en la parte superior de 25 cm.

El sol calentará el aire y provocará viento con velocidades de 56 km/h que pasará a través de 32 turbinas situadas en la base de la torre, con una potencia de 6,5 MW cada una. El proyecto será llevado a cabo por la empresa Solarmissions Technologies y para la construcción serán necesarios 20 km² de plástico o cristal y 400 000 m³ de hormigón.

En la actualidad, la compañía presenta dos proyectos similares al que acabamos de describir en Arizona y varias iniciativas en otras partes del mundo. Hasta ahora ninguno de estos proyectos ha llegado a la fase de construcción.



Figura 3.5.- Proyecto de central eólico solar de Enviromission en Australia.

3.1.4 Chimenea solar en Fuente del Fresno.

El levantamiento de una nueva torre solar en España estuvo de actualidad hace algunos años. La construcción de dicha torre (en la localidad de Fuente del Fresno, Ciudad Real, Castilla la Mancha) estaba prevista para comenzar en el año 2007, y se terminaría en el año 2010. Sin embargo, aún no se han comenzado las obras, y no está claro que dicha chimenea solar se lleve a cabo algún día. Esta planta, que tendría una potencia nominal de 40 MW, podría ahorrar el consumo de 140 000 barriles de petróleo o 78 000 toneladas de dióxido de carbono emitidas a la atmósfera. Su superficie de captación sería de 350 hectáreas ($3\,500\,000\text{ m}^2$) y su torre tendría una altura de 750 metros, lo que la convertirá en la construcción más alta de Europa.

En esta central, aparte de la función eléctrica, se pretende aprovechar la estructura periférica del invernadero para instalar cultivos de regadío, energéticos, o de biomasa (la parte próxima a la chimenea sería inadecuada por las altas temperaturas). También se busca darle una finalidad turística instalando un mirador en lo alto de la torre.

En la siguiente imagen se muestra una comparación de tamaño entre varias de las torres solares anteriormente descritas y otro tipo de edificaciones como el emblemático rascacielos Burj Dubai o una de las torres de refrigeración de la planta termoeléctrica de Niederaussem.

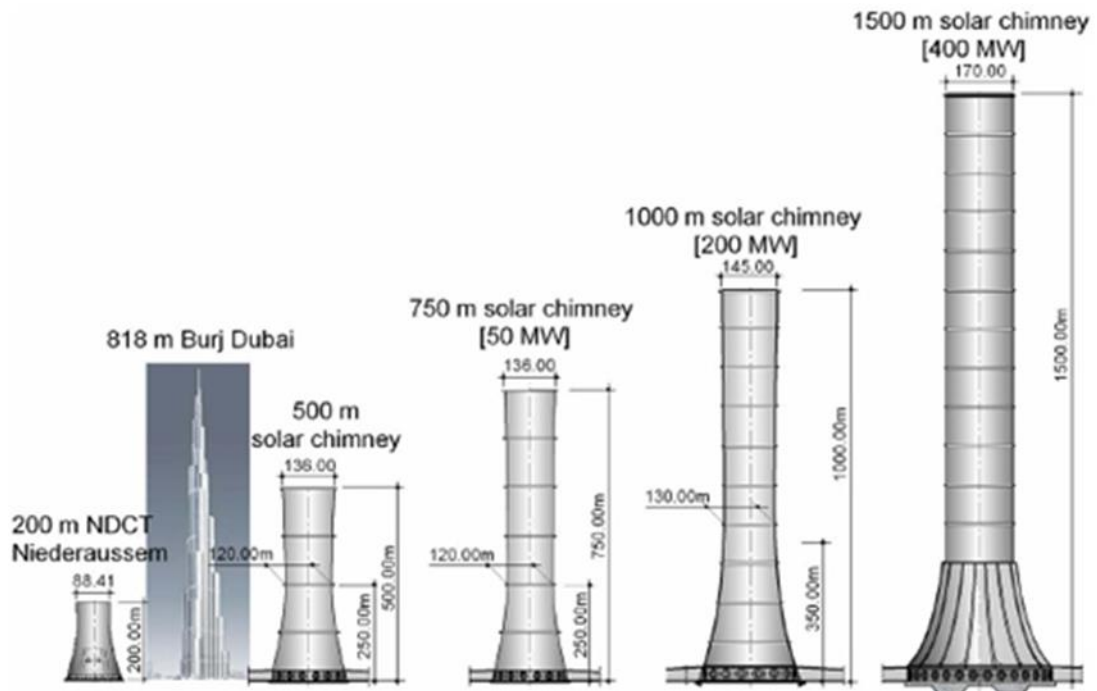


Figura 3.6.- Comparativa de alturas entre diversas torres solares.

3.2 Principios de funcionamiento. Componentes.

Como ya se ha mencionado, la instalación se compone de tres elementos básicos: un colector solar, una chimenea y una o varias turbinas. El aire es calentado por radiación solar debajo de una estructura circular, de material transparente o translúcido, abierta a la atmósfera en su perímetro. El techo y el suelo forman el colector solar que funciona como un invernadero. En el centro de la estructura se encuentra una chimenea, cilíndrica y hueca, con grandes entradas de aire en su base que la comunican con el interior del colector.

El aire caliente dentro del colector, más ligero que el aire frío de los alrededores, asciende dentro de la chimenea creando un efecto de succión que arrastra más aire dentro del colector que, a su vez, se calienta y continúa el ciclo. Unas turbinas situadas en la base de la chimenea y unos generadores eléctricos permiten el aprovechamiento de la corriente ascendente para la producción de la electricidad. En la siguiente imagen se puede apreciar un esquema de este principio de funcionamiento.

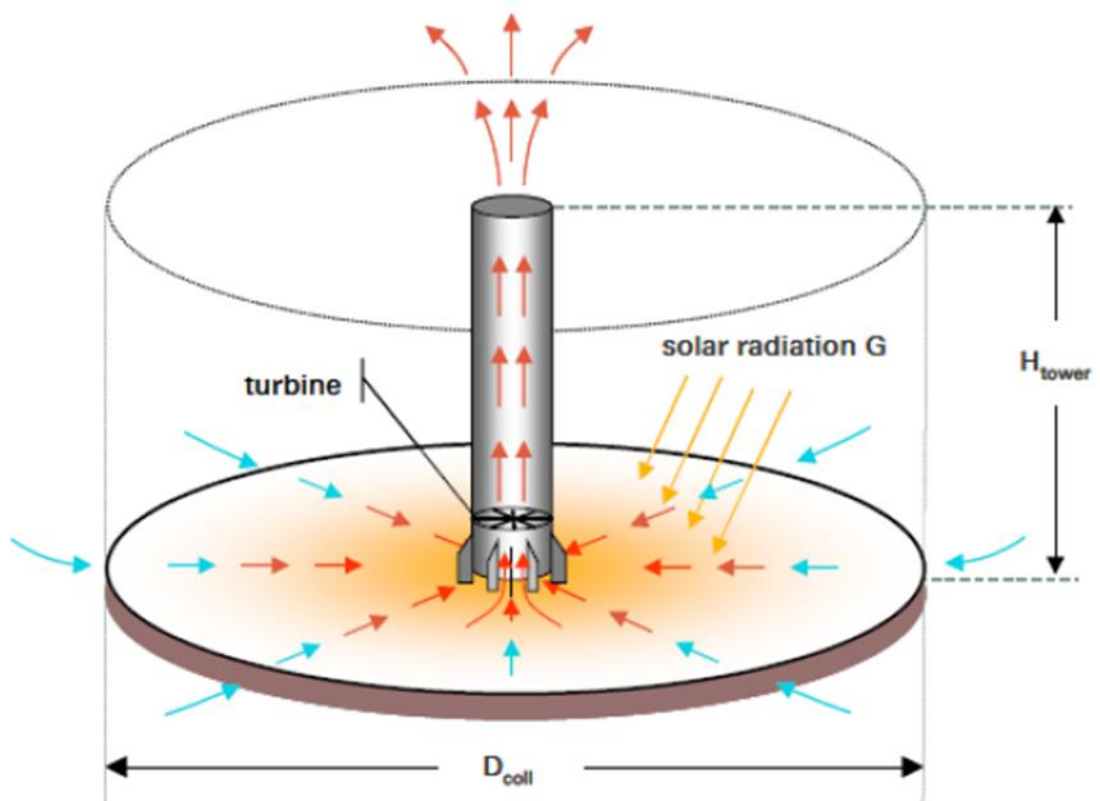


Figura 3.7.- Esquema explicativo del funcionamiento de una planta eólico-solar.

3.2.1 El colector.

El mayor componente de una torre eólico solar es el colector. Es la parte de la instalación que produce el aire caliente para la planta y consiste en una estructura techada, de vidrio o plástico, que se extiende horizontalmente cubriendo una gran área de terreno. Por lo general el área cubierta por dicha estructura es circular o poligonal, distribuida simétricamente alrededor de la chimenea instalada en el centro, cuyas grandes aberturas en su base o pedestal permiten la entrada del aire caliente procedente del colector. La estructura se encuentra abierta a la atmósfera, en su perímetro externo, para que el aire pueda fluir hacia su interior. La cubierta de vidrio o plástico del techo del colector es transparente para la radiación solar (de 280 a 2500 nanómetros de longitud de onda), la cual lo atraviesa e incide en el suelo, calentándolo. Una vez que el suelo se calienta, éste se convierte en un cuerpo emisor de radiación infrarroja (de 5000 a 35000 nanómetros de longitud de onda). La radiación infrarroja no puede atravesar la cubierta del colector y es reflejada de nuevo al suelo, el cual se calienta aún más. Por un proceso de convección, el suelo transfiere parte de su calor al aire que se encuentra por encima de él, incrementando la temperatura del aire, y haciendo que este se eleve, ya que es más ligero que el aire circundante fuera del colector que se encuentra a menor temperatura. La altura del techo se va incrementando paulatinamente hacia el centro, donde se encuentra la base de la chimenea, de modo que el aire caliente es dirigido por un movimiento vertical hacia el centro de la estructura con mínimas pérdidas por fricción.

Una ventaja del colector frente a las centrales termosolares es que puede aprovechar tanto el componente de radiación solar directa como el componente de radiación solar difusa, pudiendo funcionar aún con cielos nublados.

Como es lógico, incrementar la eficiencia del colector es ventajoso, para ello, necesitamos aumentar la capacidad del techo del colector para retener el calor ganado, ya que al aumentar la temperatura del aire dentro del colector, también aumentan las pérdidas por transferencia de calor al medio ambiente debido a una mayor diferencia de temperatura entre ambos medios. Los vidrios transmiten muy bien el calor, de modo que al tener dos temperaturas distintas a cada lado, hay notables pérdidas por transmisión. El resultado es que, a mayor temperatura, menor será el efecto de retención del calor, es decir que al aumentar la temperatura aumentarán las pérdidas disminuyendo el rendimiento del sistema. Estas pérdidas se pueden reducir si se coloca una segunda capa de vidrio o plástico en el techo del colector. El uso de material extra aumentará el costo de construcción de la estructura, por lo que la segunda capa sólo cubrirá el área central, donde la temperatura del aire es mayor.

Inevitablemente el polvo y la suciedad se acumularán sobre el techo del colector, lo que reducirá su eficiencia, pero la experiencia en la planta prototipo de Manzanares, que se ubicaba en una zona semidesértica, demostró que el colector es bastante insensible a la suciedad, además las pocas lluvias que tenían lugar en la zona eran suficientes para que el colector se mantuviera limpio.

Cabe destacar que al colector se le puede sacar un beneficio extra, y es que la zona más externa del colector puede ser aprovechada para cultivar plantas y vegetales, ya que después de todo es un invernadero, sin ningún costo extra y sin perjudicar significativamente el rendimiento de la planta.

3.2.1.1 Altura del colector.

La altura del techo en el perímetro del colector deberá ser de 2 m como mínimo, para que el personal de mantenimiento acceda al interior sin ningún impedimento. Esta altura debe ir en aumento a medida que nos acercamos al centro, donde está situada la chimenea.

La altura del techo deberá ser, como regla general, inversamente proporcional al radio del punto considerado, con el fin de mantener constante la velocidad del aire que fluye desde el perímetro hacia la chimenea.

En nuestro caso, la central termo-solar será de 2 MW de potencia, por lo que la altura de nuestro techo (en comparación con los diferentes proyectos estudiados hasta ahora) será de 2 metros en la periferia y de 8 metros en la parte más alta, es decir, en el entronque con la chimenea.

3.2.1.2 Materiales.

Queda claro que el objetivo prioritario es conseguir que la mayor parte de la energía solar incidente sobre el techo, alcance el terreno absorbente y, al mismo tiempo, reducir al mínimo las pérdidas de TIR (radiación infrarroja térmica de 3 a 15 μm) que puedan escapar a través del techo.

El material usado como techo de un colector deberá ser transparente a las radiaciones del espectro visible y a las del infrarrojo próximo (onda corta), permitiendo así su paso hacia el suelo del colector, donde se retendrá en forma de energía calorífica. Debemos de tener

en cuenta que no toda la radiación incidente es absorbida por el suelo, parte de la radiación que llega al suelo es reemitida pero con una longitud de onda diferente (onda larga). Una característica importante del techo es que no debe transmitir (transmitancia muy baja) este calor reirradiado y, en consecuencia, permanece en el interior del colector.

La transmitancia o coeficiente de transparencia a la radiación solar de un vidrio normal de ventana varía tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

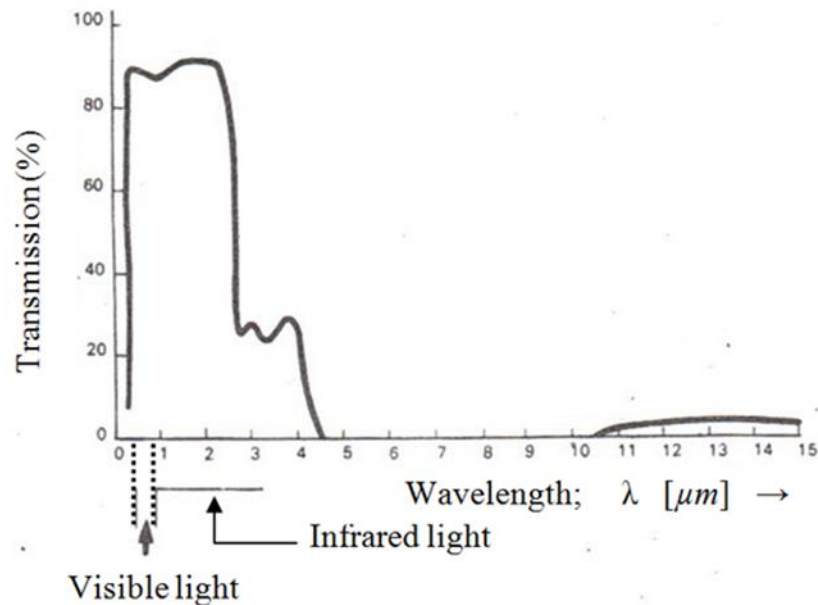


Figura 3.8.- Gráfico del coeficiente de transparencia de un vidrio normal.

De acuerdo con la curva, el vidrio de ventana es muy transparente (transmitancia alrededor del 95%) desde la luz visible hasta los 2,5μm, menos transparente entre los 2,5 μm y 4μm, totalmente opaco entre 4,5μm y 10,5μm y casi opaco entre 10,5μm y 15mm.

Lo que tiene verdadera importancia en el comportamiento de nuestro colector es la absorción infrarroja en el intervalo de 3-15μm (radiación infrarroja térmica, TIR). El vidrio, al ser opaco a los TIR, atrapa la radiación térmica, sin embargo la mayoría de los plásticos no evitan que parte de esta radiación térmica TIR de onda larga se escape al exterior, por esto no se suelen utilizar en los techos de los colectores. Si se utilizan materiales plásticos como techo de un colector, deberán tener el espesor suficiente como para ser intrínsecamente opacos a ellos.

Además del vidrio, existen otros materiales:

- El plexiglás o la fibra de vidrio atrapan mejor los TIR que el vidrio normal
- El polietileno tiene una transmitancia mayor que la del vidrio (aunque esta se ve reducida después de un año de exposición a la luz).
- Las superficies selectivas: las superficies selectivas son aquellas cuyas propiedades ópticas varían en función de la longitud de onda de la radiación que incide sobre ellas. Pongamos un ejemplo para entender el funcionamiento de las superficies

selectivas: El sol emite radiación a una temperatura aproximada de 6000K. La tierra reemite esta energía a unos 300K. Si disponemos de un recubrimiento que absorba bien en baja longitudes de onda ($< 2\mu\text{m}$), pero emita mal longitudes de ondas mayores ($> 2\mu\text{m}$), el recubrimiento alcanzará una temperatura elevada cuando se expone a la luz solar y podría, por ello, utilizarse como fuente de calor de un fluido térmico (aire, en nuestro caso). La característica que hace que las superficies selectivas sean los mejores materiales que podemos encontrar en el mercado para nuestro proyecto, es que sus propiedades ópticas varían de tal forma que permiten la entrada de la radiación de onda corta e impiden la salida de la radiación de onda larga de manera muy efectiva.

Sin duda alguna, el mejor material que se puede utilizar como techo del colector es una superficie selectiva, sin embargo, la opción más recomendable teniendo en cuenta sus buenas prestaciones y el precio es la utilización combinada de un vidrio normal y un film de plástico.

Una buena solución es usar cristal en la zona del colector más próxima a la chimenea, donde las temperaturas son altas y la retención de calor es importante. En las secciones del colector más alejadas de la chimenea se recomienda usar films de plástico (polímero) con unas buenas propiedades de comportamiento TIR y UV, para abaratar el precio de la instalación.

Hemos llegado a esta conclusión gracias a las experiencias obtenidas de la Central Eólico-solar de Manzanares, en la que se utilizó cristal para cubrir la el 50% del colector (la parte del colector más cercana a la chimenea), y film polimérico sintético con buenas propiedades ante los TIR y los UV para cubrir el 50% restante del colector.

3.2.1.3 Estructura portante.

La estructura que soporte el techo del colector debe estar diseñada de tal forma que aguante el propio peso de los cristales y plásticos que conforman el recubrimiento del colector y fuerzas ajenas a la estructura como puede ser el viento, la lluvia...

Dicha estructura está constituida por duros perfiles de aluminio o acero galvanizado, con un fácil ensamblado y desensamblado, para que tanto los trabajos de mantenimiento como los de reemplazamientos y reparaciones se lleven a cabo con la máxima rapidez posible.

La distancia de separación óptima entre los soportes verticales (hormigón prefabricado, aluminio o acero) según lo aprendido con la central de Manzanares es de unos 10 m.



Figura 3.9.- Estructura portante del vidrio del colector.

Por otro lado, y de acuerdo con la experiencia de la planta de Manzanares, lo más práctico y económico del cristal es instalarlo en planchas de 1m·1m·4mm y las dimensiones de los fragmento del plástico de recubrimiento de 6m·6m.

3.2.2 La chimenea.

La chimenea es el motor térmico de la planta: situada en el centro del colector. Posee una fuente de calor a alta temperatura en su base y un sumidero de calor a baja temperatura en su punto más alto. Opera con la diferencia de temperaturas entre el aire frío de la parte superior y el aire caliente de la base de la torre. Es un tubo de presión comparable con el tubo de descarga de una planta hidroeléctrica, con pequeñas pérdidas por fricción. La velocidad de la corriente ascendente de aire dentro de la chimenea es, aproximadamente, proporcional al aumento de temperatura en el colector y a la altura de la chimenea. En una planta a gran escala, de varios megavatios, el colector solar eleva la temperatura del aire alrededor de 30 a 35 grados, lo que produce una velocidad de la corriente de aire ascendente de alrededor de 15 m/s en las condiciones de operación nominal de la planta.

Cabe aclarar que la eficiencia de la chimenea es relativamente baja si se compara con las eficiencias del colector y de la turbina.

Las chimeneas (para alturas de hasta 200-300 metros) suelen estar normalmente construidas con planchas de acero soldadas, planchas de metal corrugado o incluso con redes de cables con recubrimiento o membranas. Además se pueden colocar vientos convenientemente organizados en diferentes niveles para así dotar de rigidez estructural a la chimenea. También cabe la posibilidad de utilizar anillos de refuerzo. El hormigón reforzado se usará preferiblemente para estructuras de alturas mayores.

En la siguiente imagen se puede apreciar un ejemplo de una chimenea fabricada a partir de planchas de acero.



Figura 3.10.- Chimenea fabricada con planchas de acero.

Tanto la utilización de planchas de acero o metal corrugado, como la utilización de hormigón, son técnicas que están bien establecidas y probadas en la construcción de chimeneas de combustión y en las torres de refrigeración por agua usadas en las plantas de producción eléctrica y otras plantas industriales. Podemos utilizar la información y la experiencia obtenida de estas obras para llevar a cabo la chimenea de nuestra central eólico-solar. Además nuestra chimenea cuenta con una ventaja frente a las chimeneas industriales, y es que la torre no tendrá ningún problema derivado de los efectos térmicos y corrosivos de los gases de combustión, ya que el aire usado es limpio y a bajas temperaturas.

Actualmente, las chimeneas de hormigón prefabricado son las que más frecuentemente se utilizan.

La chimenea es la estructura más sobresaliente de las centrales eólico-solares, y está expuesta a la acción de:

- Peso muerto, principalmente de la pared de recubrimiento.
- Cargas de viento: presión externa y succión interna.
- Cargas dinámicas de viento debidas a las ráfagas y viento cruzado causadas por la separación de torbellinos.
- El efecto de la temperatura del aire caliente y la irradiación del sol en las paredes de hormigón.
- Asentamiento con diferentes suelos de origen externo.

Como todos podemos deducir, las zonas sísmicas son eliminadas como sitios potenciales para la instalación de torres solares. Este problema tiene fácil solución, basta con construir nuestra planta eólico-solar en otra ubicación, sin embargo el viento y su

inmenso peso siguen siendo dos de las principales amenazas para la estabilidad estructural, y la solución de estos nuevos problemas ya no es tan fácil.

Con ánimo de dar solución a los problemas anteriormente mencionados en relación con el efecto del viento y el propio peso de la chimenea, surgen una serie de invenciones:

3.2.2.1 Chimenea con tobera convergente en el colector.

Con la finalidad de construir una chimenea significativamente más pequeña que los diseños propuestos de gran escala y así poder implantar las torres solares en localidades urbanizadas, Herman Coetzee diseñó una chimenea solar con tobera convergente en el colector.

Al reducir la altura de la chimenea, se reduce la velocidad que el viento es capaz de alcanzar cuando pasa a su través. Para solucionar este inconveniente, Coetzee propone la implantación de una tobera convergente en la base de la chimenea y salida del colector. La tobera incrementaría la velocidad del aire elevando su energía cinética, haciendo así que la turbina pueda extraer más energía.

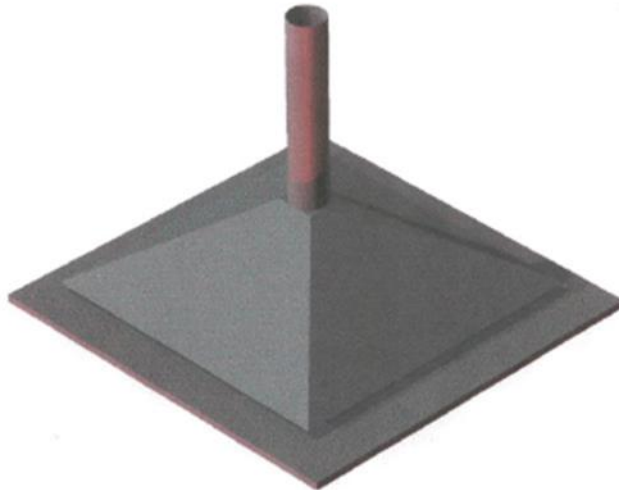


Figura 3.11.- Chimenea diseñada por Herman Coetzee.

Coetzee realizó los cálculos para una planta pequeña con una chimenea de 36 m de alto y 4 m de diámetro, debido a la disponibilidad de tubos de plástico reforzado con estas medidas en su localidad (Gaborone, Bostwana). El colector de su diseño es un cuadrado de 40 m de lado, de forma piramidal. Coetzee admite que estas dimensiones son demasiado pequeñas, pero se trata sólo de un prototipo, así que una chimenea real debería ser más grande que la aquí propuesta.

La energía útil para un día de invierno (el peor de los casos a considerar) en Botswana es de 4,056 Wh/día por metro cuadrado del área de la base de un colector de forma piramidal con un ángulo de 30°. Para una chimenea de 36 m de alto y 4 m de diámetro, se encontró que la velocidad del aire es de 3.53 m/s y la máxima potencia teórica es de 49.24 W. Empleando una tobera convergente, la velocidad se incrementa a 15 m/s y la potencia a 887.8 W

3.2.2.2 Torre divergente.

Atit Koonsrisuk y Tawit Chitsomboon analizaron el efecto que produce el cambio de área transversal de la torre en el desarrollo de la planta.

Estos dos ingenieros analizaron dos tipos de chimeneas, una convergente y otra divergente y las compararon con una chimenea recta.



Figura 3.12.- Dibujo de torre recta y torre divergente.

Los resultados de dicho análisis fueron los siguientes:

- Se encontró que para las chimeneas convergentes, la velocidad del aire aumenta hasta alcanzar su máximo en la salida de la chimenea. Por otro lado, en las chimeneas divergentes la velocidad del aire aumenta hasta alcanzar un máximo justo después de entrar en la chimenea.
- En cuanto al flujo másico se concluyó que una chimenea convergente disminuye el flujo másico y una chimenea divergente lo aumenta.
- Para la temperatura del aire se determinó que en ambos diseños el aire aumenta su temperatura al entrar en el colector y acercarse a la chimenea, para después permanecer relativamente constante. En una chimenea convergente el aumento de temperatura es mayor que en una chimenea divergente, ya que al ser menor el flujo másico, el aire pasa más tiempo dentro del colector y puede aumentar más su temperatura, mientras que en una chimenea divergente, con un flujo másico mayor, el aire tiene menos tiempo para elevar su temperatura.

Estos factores hacen que para una chimenea convergente, la energía cinética del aire permanezca prácticamente constante como en el caso de una chimenea recta, pero para una chimenea divergente, la energía cinética aumenta de manera considerable y tiene un máximo en la base de la torre.

Se concluye que una chimenea divergente ayuda a incrementar el flujo másico, velocidad y energía cinética del aire sobre los valores de una chimenea recta de la misma altura, haciendo posible la disminución de altura de la misma.

3.2.2.3 Chimeneas flotantes.

Como se ha indicado con anterioridad, el rendimiento de una central eólica solar convencional está determinado por la altura de la chimenea. En los proyectos de plantas se han concebido chimeneas de construcción metálica y de hormigón, siendo el coste y la dificultad de construcción dos de los obstáculos principales para la implementación de la tecnología.

El profesor Christos D. Papageorgiou, presentó en el año 2003 una alternativa para la construcción de la chimenea. Papageorgiou propuso reemplazar la chimenea de hormigón por una estructura de tela inflada con gas ligero, cómo en un globo aerostático. A esta innovación la llamó “floating solar chimney” o chimenea solar flotante.

La chimenea flotante está hecha de un conjunto de globos, con forma de anillos tubulares, que pueden llenarse de helio. Estos globos rodean a un cilindro interior de tela y mantienen su posición vertical.

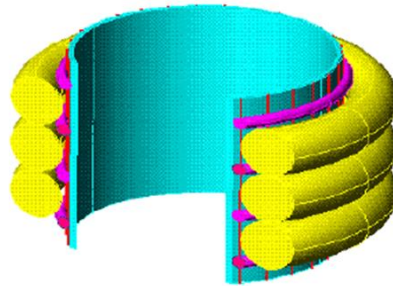


Figura 3.13.-Estructura de la torre flotante.

Tanto los globos tubulares como el cilindro interior, estarían fabricados con telas como el polyester, similar al que ya se utiliza para la construcción de globos aerostáticos. Para que la estructura mantenga su rigidez los globos tubulares deben estar a una mayor presión que el aire ambiental. De esta manera, la chimenea no puede ser deformada por el viento incidente. En la parte baja de la chimenea, donde esta se une con el colector, se encuentra una estructura articulada que permite que la chimenea se incline ante el empuje de los vientos.



Figura 3.14.- Base de la chimenea flotante articulada.

Según Papageorgiou, es posible construir chimeneas solares con este sistema de más de 1000 metros de altura con un coste significativamente menor que las soluciones tradicionales.

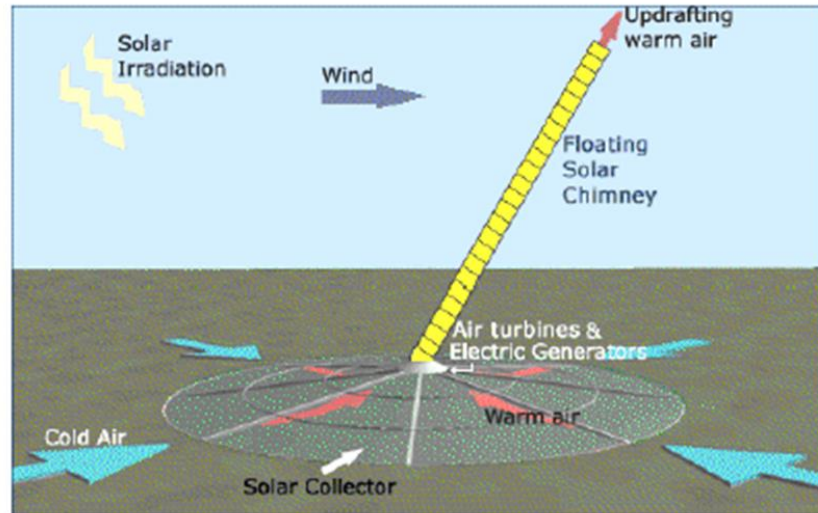


Figura 3.15.- Esquema de una planta con chimenea flotante de base articulada.

3.2.2.4 Torre solar con colector inclinado.

Dos ingenieros canadienses, E. Bilgen y J. Rheault, propusieron en 2004 el uso de un colector solar inclinado construido sobre la ladera de una colina, optimizando así la captación de energía solar y obtener buenos rendimientos en plantas que se construyen en latitudes alejadas de los trópicos, donde la radiación solar es menor, y la inclinación de los rayos solares es más acentuada.

Se llevaron a cabo varios estudios en diferentes localidades de Canadá (Ottawa, Winnipeg y Edmonton). Dichas locaciones fueron seleccionadas con el objetivo de obtener un amplio rango de latitudes, que varían desde 45.5° hasta 53.6° norte. Gracias a estos estudios, Bilgen y Rheault concluyeron que el ángulo óptimo de la pendiente del colector, para maximizar la captación solar, es de 5° a 7° menor que la latitud.

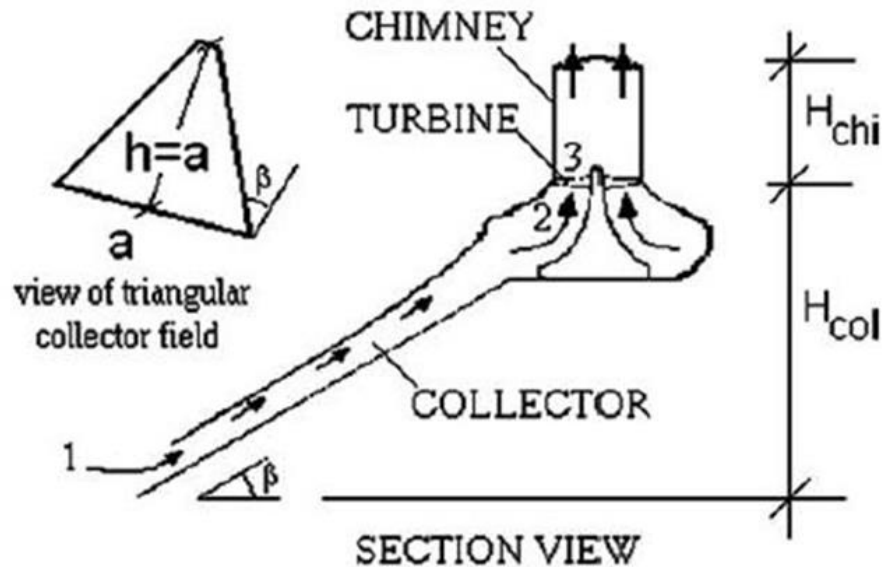


Figura 3.16.- Colector inclinado para reducir la altura de la chimenea.

Los autores simularon, mediante un modelo matemático desarrollado por ellos mismos, el comportamiento de una chimenea solar de 5 MW en las tres localidades y llegaron a la conclusión de que, la producción anual de energía eléctrica puede ser de hasta un 85% de la producción de una planta con igual área de colector en una región tropical, a pesar de que la radiación solar es poco favorable para tales latitudes.

Ya que un colector inclinado funciona también como chimenea, la altura de la chimenea real puede ser reducida hasta en un 90% para producir la misma potencia que una planta de colector horizontal con igual área. Una chimenea más pequeña reduce el costo de inversión inicial y elimina algunos problemas de construcción pero puede crear otros gastos y problemas debido al reto de construir una estructura tan grande en la ladera de una colina, este aspecto debe ser estudiado para cada localidad.

3.2.2.5 Torres de convección.

Las torres de convección, también denominadas torres energéticas, se mencionaron por primera vez en 1975, el doctor Philip Carlson realizó una patente estadounidense para un método de producción de energía eléctrica a través del flujo de aire frío por una chimenea. El profesor Dan Zaslavsky, del Instituto Israelí de Tecnología, Technion (Haifa, Israel), retomó la idea y desarrolló una propuesta de mejora.

El proyecto consiste en una torre alta y hueca, del tipo de una gran chimenea. En la parte alta de la misma se encuentra instalado un sistema de aspersores que rocía agua fría hacia el interior de la chimenea. El agua enfría el aire, haciendo que aumente su densidad y provocando que caiga por la torre. El aire frío dentro de la chimenea es más pesado que el aire fuera de esta, por lo que tiende a descender, produciendo un efecto opuesto al de las chimeneas solares. Al pie de la torre se sitúa una turbina que se acciona al paso del aire descendente.

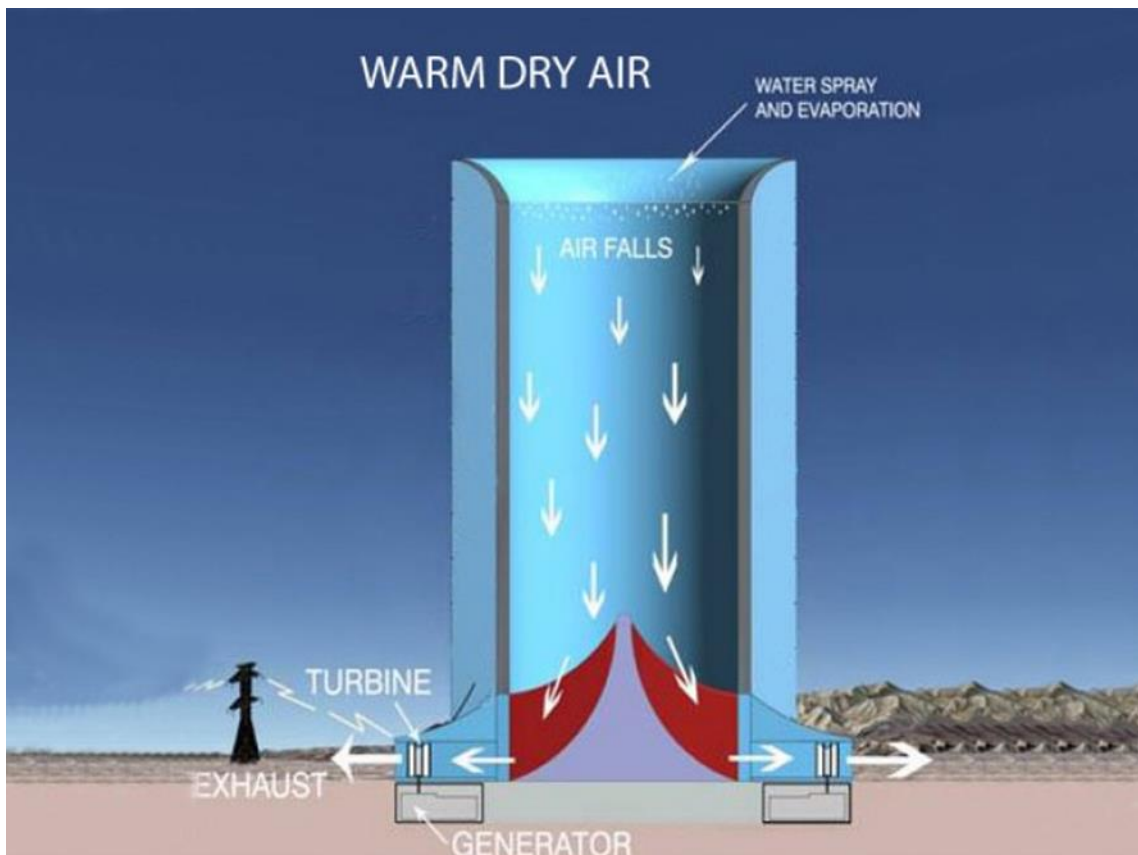


Figura 3.17.- Torre de convección.

Es cierto que con este sistema no se reduce la altura de la chimenea, es más, esta deberá ser tan alta o incluso más que la chimenea de una torre solar convencional, dependiendo de la potencia. Sin embargo una de las ventajas de este sistema es la ausencia del colector, que constituye una parte importante del coste total de la instalación. Por el contrario, es necesario emplear parte de la energía para mover las bombas que elevan el agua y permiten que el sistema funcione de una manera continua. La solución parece prometedora, si bien no se han construido plantas piloto o de demostración que permitan validar los modelos realizados.

El agua puede ser tomada de un río o lago cercano o. El funcionamiento de la planta requiere de sitios con climas cálidos y secos, pero a la vez se requiere de fuentes de agua cercanas. El medio oriente (la idea se desarrolló para Israel) cuenta con estas características pero también otros lugares alrededor del mundo, como la costa oeste de África, el oeste de Australia, India, el Golfo de California, etc.

3.2.2.6 Torres ciclónicas.

La idea de la torre solar cuenta con múltiples ventajas, sin embargo la gran altura que debe tener la chimenea la convierte en una propuesta poco viable para sustituir a las grandes plantas termoeléctricas de energía. Una idea para reducir el tamaño de la chimenea, y evitar la superficie del colector, ha impulsado las denominadas torres ciclónicas que tratan de reproducir artificialmente lo que la naturaleza produce en los tornados.

En las torres ciclónicas se combina el principio de extraer energía de una masa de aire atmosférico en convección ascendente y el principio de producir de manera artificial un fenómeno de aire en rotación (pequeño torbellino). Debemos recordar que este último principio ya lo vimos en la invención de Nazare.

Se trataría de generar un torbellino para capturar la energía mecánica producida durante el movimiento ascensional del aire caliente. El torbellino se genera cuando el aire caliente y húmedo entra tangencialmente en la base de una estructura cilíndrica. La fuente de calor puede ser la energía solar.

En la siguiente figura puede verse un esquema del funcionamiento de estas torres ciclónicas también denominadas “atmospheric vortex engine”.

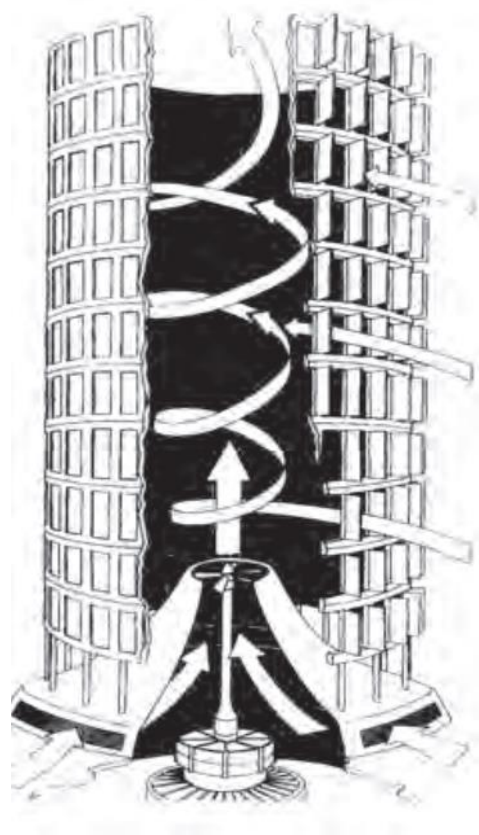


Figura 3.18.- Torre ciclónica.

En un dispositivo de este tipo la chimenea ha sido sustituida por la fuerza centrífuga del aire en rotación y el colector solar es reemplazado por la superficie terrestre. La energía mecánica es capturada por turbinas eólicas convencionales.

Una torre cilíndrica con un diámetro de 200 m y una altura de 100 m podría producir 200 MW de potencia nominal.

En 1977, la torre ciclónica, a escala de laboratorio, del doctor Zapata (ingeniero español) consigue la medalla de oro en el Congreso Europeo de Nuevas Invenciones, celebrado en Ginebra, despertando el interés de las autoridades nacionales en una época en la que se notaban los efectos de la primera crisis energética con una fuerte subida del precio del petróleo. El invento de este científico español consiste en reproducir artificialmente

ciclones confinados, fijos en un punto para que no puedan emigrar. Él y su equipo provocan ciclones en torres cerradas y aprovechan su energía.

Con un oscilante apoyo de las autoridades, el doctor Zapata intentó instalar un primer prototipo en las cercanías de la localidad manchega de Santa Cruz de la Zarza, en el denominado “Cerro de las Águilas”, en el que se producían fuertes corrientes térmicas ascensionales. La falta de apoyos impidió que se construyera el prototipo y la temprana muerte del inventor hizo que no continuara adelante esta iniciativa.

3.2.3 La turbina.

Las turbinas de una chimenea solar, son el componente que extrae la energía cinética de la corriente de aire y la trasmite al generador eléctrico. Las características de las turbinas empleadas en las torres solares son similares a las de los rotores de los grandes aerogeneradores, si bien la característica del movimiento del aire en un conducto, como es la propia chimenea, le confiere algunas ventajas (mayor rendimiento, menor exposición a las cargas debidas a la turbulencia, etc.) con respecto a las colocadas en corriente libre.

El ángulo de ataque de las palas del rotor es ajustado durante la operación de la turbina para obtener la máxima potencia conforme la velocidad y volumen del aire varían. Si los lados planos de las palas del rotor se encuentran perpendiculares al flujo de aire, el aire no podrá pasar a través de la turbina y ésta no girará. Si por el contrario las palas del rotor se colocan paralelas al flujo de aire, este pasará a través de la turbina sin impedimento alguno y sin caída de presión, por lo que el rotor no girará y no se generará potencia alguna. Por lo tanto, el punto óptimo de funcionamiento se encuentra en un lugar entre estos dos extremos.

Las turbinas siempre se colocan en la base de la chimenea. Existen varias opciones para la orientación y número de turbinas, y la mejor opción dependerá del tamaño y características de la planta, así como de los recursos y tecnologías disponibles. Se puede elegir entre una sola turbina de eje vertical cuyas palas barran la totalidad del área interior de la chimenea como es el caso de la central eólico-solar de Manzanares o varias turbinas más pequeñas dispuestas de manera que en conjunto cubran el mismo espacio. Otra opción es instalar un gran número de pequeñas turbinas de eje horizontal en la periferia del área de transición entre el techo del colector y la base de la chimenea, de un modo similar a los ventiladores que se instalan en la base de una torre de enfriamiento.

Las turbinas Kaplan es el tipo más adecuada para bajas presiones y grandes caudales y son las mejores para ser usadas en la torre con las adaptaciones necesarias para operar con presiones muy bajas.

3.3 Almacenamiento térmico.

Un aspecto asociado a todas las aplicaciones basadas en la energía solar es la intermitencia. Si se quiere tener un funcionamiento continuo y una operación en ausencia de radiación solar es necesario incorporar un sistema de almacenamiento térmico, que en el caso de las centrales eólico solares es relativamente sencillo. Por ejemplo, se puede conseguir colocando tuberías negras llenas de agua sobre el suelo debajo del techo del colector. Durante la noche, cuándo el aire en el colector comienza a enfriarse, el agua dentro de las tuberías libera la energía calorífica que almacenó durante el día. El almacenaje térmico con tuberías de agua funciona más eficientemente que empleando únicamente la inercia térmica del suelo, ya que la capacidad calorífica del agua es cerca

de 5 veces mayor a la del suelo. Además, aún a bajas velocidades de agua (por convección dentro de los tubos), la transferencia de calor entre el agua, las tuberías y el aire sobre ellas es mucho mayor que aquella entre la superficie del suelo y las capas de suelo que hay debajo.

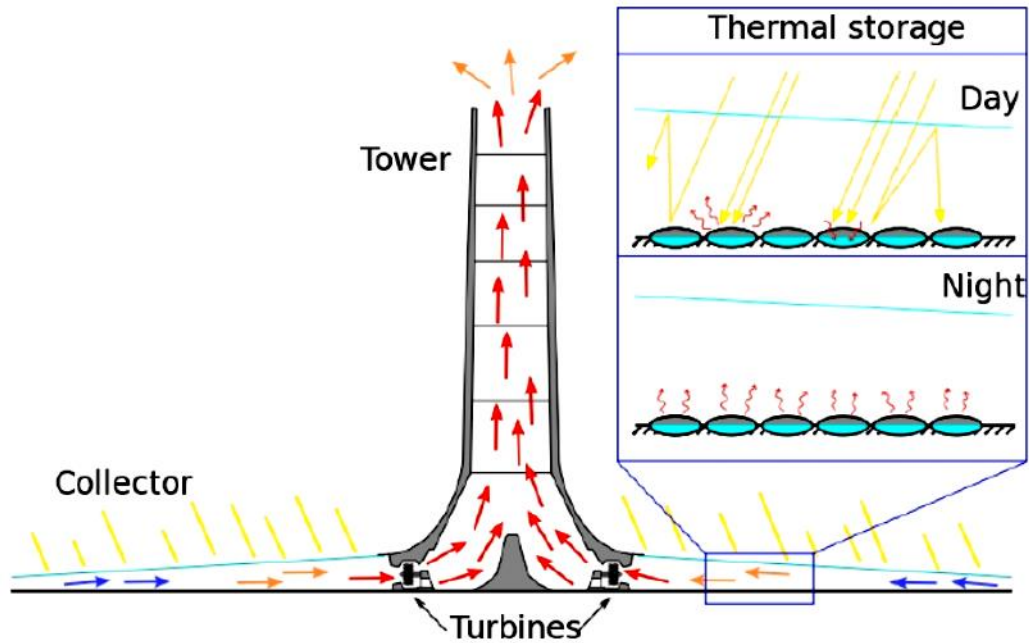


Figura 3.19.- Almacenamiento térmico mediante tubos de agua pintados de negro.

Cabe destacar que las tuberías se llenan con agua una sola vez y después permanecen cerradas, de manera que el agua no puede evaporarse.

En la siguiente gráfica se observa el efecto del almacenaje térmico usando la capacidad calorífica de solamente el suelo, de un grupo de tuberías equivalente a una capa de 10 centímetros de agua y de otro grupo de tuberías equivalente a 20 centímetros de agua. En el eje de las abscisas se representan las horas del día, y en las ordenadas se presenta la potencia correspondiente a cada hora del día.

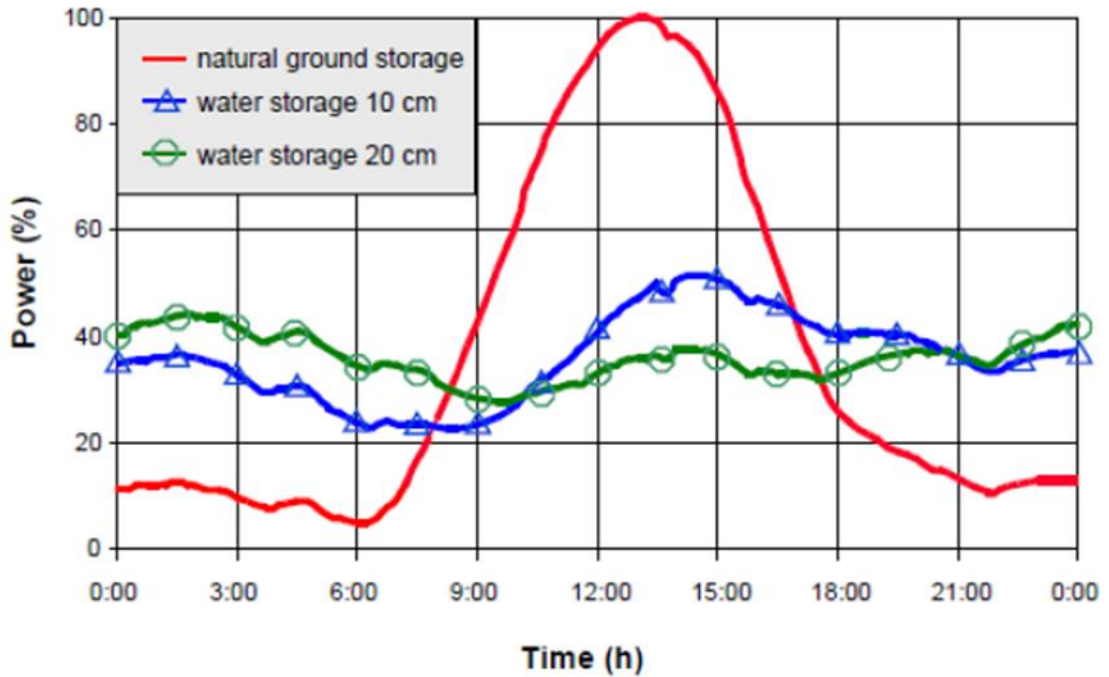


Figura 3.20.- Potencia de la planta con y sin almacenamiento térmico.

Se puede apreciar que sin el almacenaje térmico proporcionado por las tuberías con agua, en las horas del día con más radiación solar, la potencia generada es elevada, mientras que durante la noche la producción, aunque existente, es significativamente menor. Si se instala un sistema de almacenaje térmico de tuberías con agua, la producción de potencia se estabiliza relativamente alrededor de un valor promedio.

4 Energía solar fotovoltaica.

4.1 Características y principio de funcionamiento.

La transformación directa de la energía solar en energía eléctrica por efecto fotovoltaico, constituye una solución de características especialmente interesantes en las energías renovables.

La energía solar fotovoltaica, se caracteriza por funcionar a base de paneles solares que captan las radiaciones luminosas del sol y las transforman en una corriente eléctrica.

Estos paneles especiales están compuestos por unas "células fotovoltaicas" que es donde realmente tiene lugar la transformación de la energía luminosa (fotones) en electricidad (electrones en movimiento).

Cabe destacar que lo que se conoce como efecto fotoeléctrico (la luz activa la formación de corrientes eléctricas) es el fundamento de este sistema energético como vamos a ver a continuación.

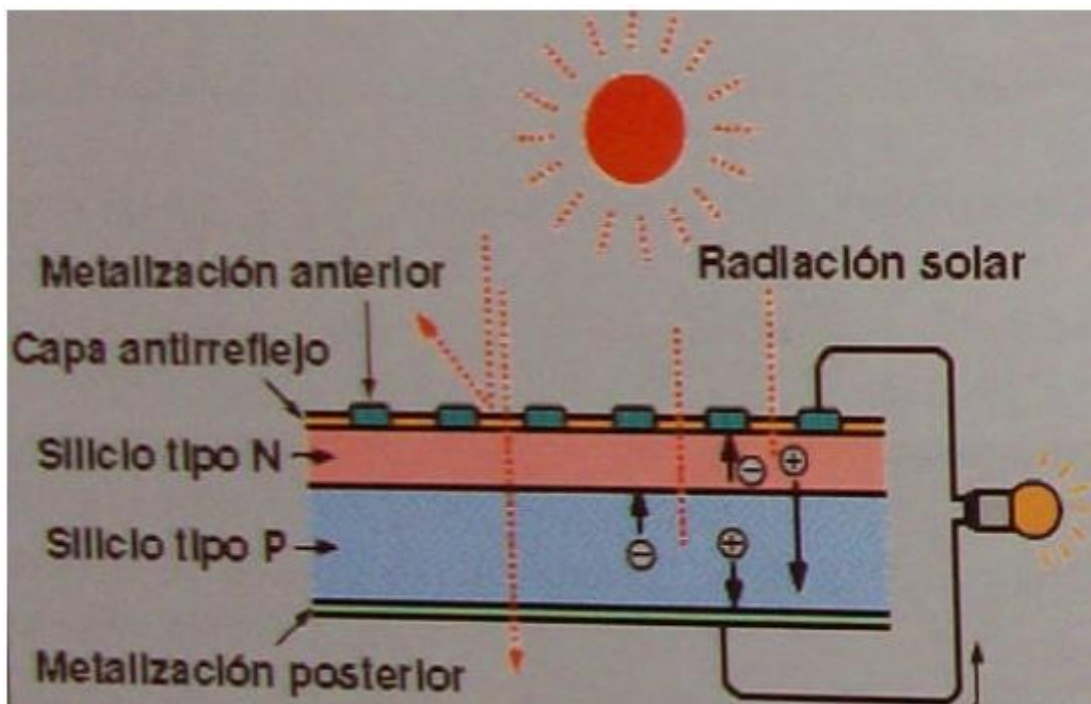


Figura 4.1.- Principio elemental de funcionamiento de un módulo fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es la base del proceso mediante el cual una célula fotovoltaica convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, o partículas energéticas. Estos fotones son de diferentes energías, correspondientes a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones inciden sobre una célula fotovoltaica, pueden ser reflejados, absorbidos o pueden pasar a su través. Únicamente los fotones absorbidos generan electricidad. Cuando un fotón es absorbido, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la célula. Con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico.

Las partes más importantes de la célula solar son las capas de semiconductores, ya que es donde se crea la corriente de electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas diferentes dopadas (tipo p y tipo n) para formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en otra. Cuando la luz solar incide en la célula se liberan electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico, formando una corriente eléctrica. Es por ello que estas células se fabrican a partir de este tipo de materiales, es decir, materiales que actúan como aislantes a baja temperatura y como conductores cuando se aumenta la energía, fundamentalmente el silicio.

Las células fotovoltaicas convierten pues, la energía de la luz en energía eléctrica. El rendimiento de conversión, esto es, la proporción de luz solar que la célula convierte en energía eléctrica, es fundamental en los dispositivos fotovoltaicos, ya que el aumento del rendimiento hace de la energía solar fotovoltaica una energía más competitiva con otras fuentes.

Estas células conectadas unas con otras, encapsuladas y montadas sobre una estructura soporte o marco, conforman un módulo fotovoltaico. Aunque un módulo puede ser suficiente para muchas aplicaciones, dos o más módulos pueden ser conectados para formar un generador fotovoltaico. Los generadores o módulos fotovoltaicos producen corriente continua y pueden ser conectados en serie o en paralelo para poder producir cualquier combinación de corriente y tensión. La corriente producida depende del nivel de insolación.

4.2 Historia.

El efecto fotovoltaico se descubrió en el siglo XIX (Becquerel, 1839), sin embargo el primer dispositivo funcional y de poca eficiencia (6%), una célula de silicio de unión pn, no fue realizado hasta mediados del siglo XX en los laboratorios Bell en Estados Unidos.

En 1972 se inicia en los países industrializados, incluido España, programas para favorecer la aplicación de energías renovables, especialmente la solar. La creación de la Agencia de Desarrollo e Investigación en Energía y los problemas con los productores de petróleo en el Golfo Pérsico condicionan el avance en estos programas.

Hasta 1980 la industria no empezó a madurar, basándose en la tecnología de células de unión pn de silicio. Durante los años en los que se estaba trabajando en el desarrollo de esta tecnología la iluminación pública se mostró como un mercado capaz de mantener la actividad de muchas industrias, lo que contribuyó a dar empuje. Otra de las aplicaciones fue la electrificación rural en asentamientos remotos. Inicialmente, la mayoría eran instalaciones de pequeña potencia y financiadas por agencias internacionales de ayuda. De esta misma forma, actualmente en los países pobres, las deficiencias en infraestructuras eléctricas, llevan a que la energía solar fotovoltaica sea una elección técnica y económica a medio y largo plazo.

En el lado opuesto de la escala de tamaños, estuvieron las plantas fotovoltaicas (del orden de MW) instaladas en los países desarrollados por las compañías eléctricas en los años 80 para evaluar su potencial en dos aplicaciones:

- Como suministradores de potencia en los picos de carga.
- Como generadores distribuidos para reducir las pérdidas de generación y distribución.

Las ayudas gubernamentales importantes en los años 90, principalmente en Europa y Japón, contribuyeron a la instalación de medianas y grandes plantas fotovoltaicas conectadas a la red.

Por último hay que mencionar otro campo importante en la aplicación de la energía solar fotovoltaica en los años 90 como es la integración de los módulos fotovoltaicos en los edificios, donde el establecimiento gubernativo de tarifas especiales a pagar por la generación de electricidad de origen fotovoltaico generada por particulares en conexión a red, desarrolló un mercado enorme.

4.3 Tipos de instalaciones fotovoltaicas.

En una primera gran división las instalaciones fotovoltaicas se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Instalaciones aisladas de la red eléctrica.
- Instalaciones conectadas a la red eléctrica.

En el primer tipo, la energía generada a partir de la conversión fotovoltaica se utiliza para cubrir pequeños consumos eléctricos en el mismo lugar donde se produce la demanda. Es el caso de aplicaciones como la electrificación de:

- Viviendas alejadas de la red eléctrica convencional, básicamente electrificación rural.
- Servicios y alumbrado público: iluminación pública mediante farolas autónomas de parques, calles, monumentos, paradas de autobuses, refugios de montaña, alumbrado de vallas publicitarias, etc. Con la alimentación fotovoltaica de luminarias se evita la realización de zanjas, canalizaciones, necesidad de adquirir derechos de paso, conexión a red eléctrica, etc.
- Aplicaciones agrícolas y de ganado: bombeo de agua, sistemas de riego, iluminación de invernaderos y granjas, suministro a sistemas de ordeño, refrigeración, depuración de aguas, etc.
- Señalización y comunicaciones: navegación aérea (señales de altura, señalización de pistas) y marítima (faros, boyas), señalización de carreteras, vías de ferrocarril, repetidores y reemisores de radio y televisión y telefonía, cabinas telefónicas aisladas con recepción a través de satélite o de repetidores, sistemas remotos de control y medida, estaciones de tomas de datos, equipos sismológicos, estaciones meteorológicas, dispositivos de señalización y alarma, etc. El balizamiento es una de las aplicaciones más extendida, lo que demuestra la alta fiabilidad de estos equipos.

En cuanto a las instalaciones conectadas a la red se pueden encontrar dos casos:

- Centrales fotovoltaicas, (en las que la energía eléctrica generada se entrega directamente a la red eléctrica, como en otra central convencional de generación eléctrica).
- Sistemas fotovoltaicos en edificios o industrias, conectados a la red eléctrica, en los que una parte de la energía generada se invierte en el mismo autoconsumo del edificio, mientras que la energía excedente se entrega a la red eléctrica. También es posible entregar toda la energía a la red; el usuario recibirá entonces la energía eléctrica de la red, de la misma manera que cualquier otro abonado al suministro.

El tipo de instalación para la comparativa con la torre solar se refiere a una central fotovoltaica de 2 MW.

4.4 Ventajas e inconvenientes de la energía solar fotovoltaica.

Ventajas

- Al no producirse ningún tipo de combustión, no se generan contaminantes atmosféricos en el punto de utilización, ni se producen efectos como la lluvia ácida, efecto invernadero por CO₂, etc. Es pues una energía limpia.
- El Silicio, elemento base para la fabricación de las células fotovoltaicas, es muy abundante, no siendo necesario explotar yacimientos de forma intensiva.
- Prácticamente se produce la energía con ausencia total de ruidos.
- Además, no precisa ningún suministro exterior (combustible) ni presencia relevante de otros tipos de recursos (agua, viento).
- Es inagotable.
- Las instalaciones no son complejas, requieren poco mantenimiento y poseen una vida relativamente larga.

Inconvenientes

- Impacto en el proceso de fabricación de las placas: Extracción del Silicio, fabricación de las células.
- Gran inversión inicial, pero menor que la inversión inicial necesaria para construir una planta de torre solar siendo ambas tecnologías de la misma potencia.
- Explotaciones conectadas a red: Necesidad de grandes extensiones de terreno Impacto visual. Para un parque de 2 MW (nuestro caso) dependiendo de la irradiación de la zona, ocupa una extensión aproximada de 14 hectáreas.
- Producción variable según la climatología y época el año.

4.5 Elementos fundamentales de un parque fotovoltaico.

- Generador: conjunto de módulos o paneles fotovoltaicos que son los que reciben las radiaciones solares y las convierten en una corriente eléctrica continua.
- Inversor: elemento utilizado para transformar la corriente continua recibida de los paneles, en corriente alterna.
- Contador: dispositivo que sirve para medir la energía generada.
- Transformador: eleva la tensión a introducir en la red.
- Sistema de seguimiento: elemento opcional para la orientación idónea y continua de los paneles con respecto al sol.



Figura 4.2.- Elementos de un parque fotovoltaico.

En líneas generales un parque fotovoltaico consta de generadores fotovoltaicos adaptados a la potencia nominal requerida. Cada generador fotovoltaico, formado por una serie de módulos conectados entre sí, se encarga de transformar la energía del sol en energía eléctrica continua proporcional a la radiación solar que incide sobre ellos. Sin embargo, esta energía, en forma de corriente continua, debe ser transformada por el inversor, que utilizando la tecnología electrónica de potencia, la convierte en corriente alterna en baja tensión para acoplarse a la red convencional, con unos parámetros eléctricos técnicos y de calidad (tensión, frecuencia, armónicos) similares e incluso superiores a los de la red eléctrica.

La conexión del conjunto de instalaciones se realiza en baja tensión a una estación transformadora, que elevará la tensión necesaria para introducirla a la red.

La energía generada por cada una de las instalaciones individuales que conforman el parque, será medida por su correspondiente contador para ser vendida a la empresa distribuidora.

La orientación del generador fotovoltaico puede ser variable, ya que mediante los seguidores solares se sigue la trayectoria del sol. De este modo, se maximiza la energía solar incidente sobre el generador a lo largo del año para la localidad en la que se ubica el parque.

El seguidor solar orienta los paneles fotovoltaicos de forma que la radiación solar directa es en todo momento perpendicular a la superficie de los mismos, obteniéndose así la máxima producción eléctrica posible, pudiendo aumentar la producción de una instalación fotovoltaica hasta un 40%.

Los seguidores solares se utilizan para mejorar la producción de los paneles fotovoltaicos captando la máxima radiación de energía solar durante el mayor tiempo posible, a través de sistemas que siguen la trayectoria del sol. Encarecen el coste de la instalación pero aumentan mucho su rendimiento.

5 Localización.

La selección del terreno es uno de los puntos claves para determinar la rentabilidad de una torre solar o parque solar fotovoltaico.

Para la viabilidad del proyecto será imprescindible la elección de emplazamientos adecuados, y por tanto, el estudio de la ubicación de la torre solar implica tener en consideración varios parámetros:

Principalmente, los niveles adecuados de radiación solar y la cercanía con infraestructura existente para la transmisión de potencia eléctrica, son los factores que generalmente gobiernan la localización de una planta de chimenea solar. Además de lo anterior es necesario tener en consideración los vientos reinantes en la zona, el tamaño y la orientación del terreno, las características geológicas del mismo, la cercanía de vías de comunicación, el impacto medioambiental de la zona y la estadística sísmica de la misma completan el estudio que podemos hacer del terreno a elegir.

Partimos de que España es uno de los países de la comunidad económica europea que disfruta del clima más soleado, a la vez que del mayor número de horas de sol. Si además se añade la tendencia general creciente, que según la AEMET se viene produciendo desde mediados de los años 70, son muchos los puntos de la geografía española, sobre todo en la parte sur, donde se pueden materializar los criterios para una correcta ubicación de la torre solar.

En este caso se ha elegido la provincia de Almería por encontrar en ella muchas características idóneas.

El clima es árido/desértico cálido, con temperaturas suaves durante todo el año que oscilan entre los 17°C y 9°C en enero y los 33°C y 24°C en agosto. En ocasiones durante los meses de verano sube la temperatura hasta superar los 40°C. Los inviernos son muy suaves y los veranos calurosos. Almería es la única ciudad de Europa Continental que nunca ha registrado heladas, ya que la mínima histórica se registró en enero del 2005, siendo de +0,1 C.

Con una media de 2994 horas de sol y 108 días completamente despejados al año, es una de las ciudades más soleadas de Europa. La temperatura media anual es de 19,7°C. La humedad media es del 66%, con un promedio de 26 días de lluvia anuales, siendo noviembre el mes más lluvioso. Esto resulta en una pluviometría media de 196 mm, una de las más bajas de España y de Europa.

Así pues, a nivel climático, caracterizado por la ausencia de heladas y precipitaciones tan escasas se podría hablarse técnicamente de desierto árido.

5.1 Ubicación exacta.

El posible emplazamiento se encuentra 10 Km. al NE de la capital de Almería (coordenadas.36º 54' 15.05" N, 2º 23' 2.74" E) en una zona sin ningún aprovechamiento dada su aridez, y actualmente utilizado como campo de maniobras y tiro para unidades militares.

Ocupa una extensión de 78.55 hectáreas a lo ancho de una ladera que se extiende sobre un eje con rumbo de 34º desde la base hacia la torre, que se situaría en la parte alta. Esta

disposición de colector inclinado optimiza la captación de energía solar y obtiene mejores rendimientos que los colectores planos, tanto más cuanto más alejados estemos de los trópicos, pues aquí la radiación solar es menor y la inclinación de los rayos solares es más acentuada que en aquellos.

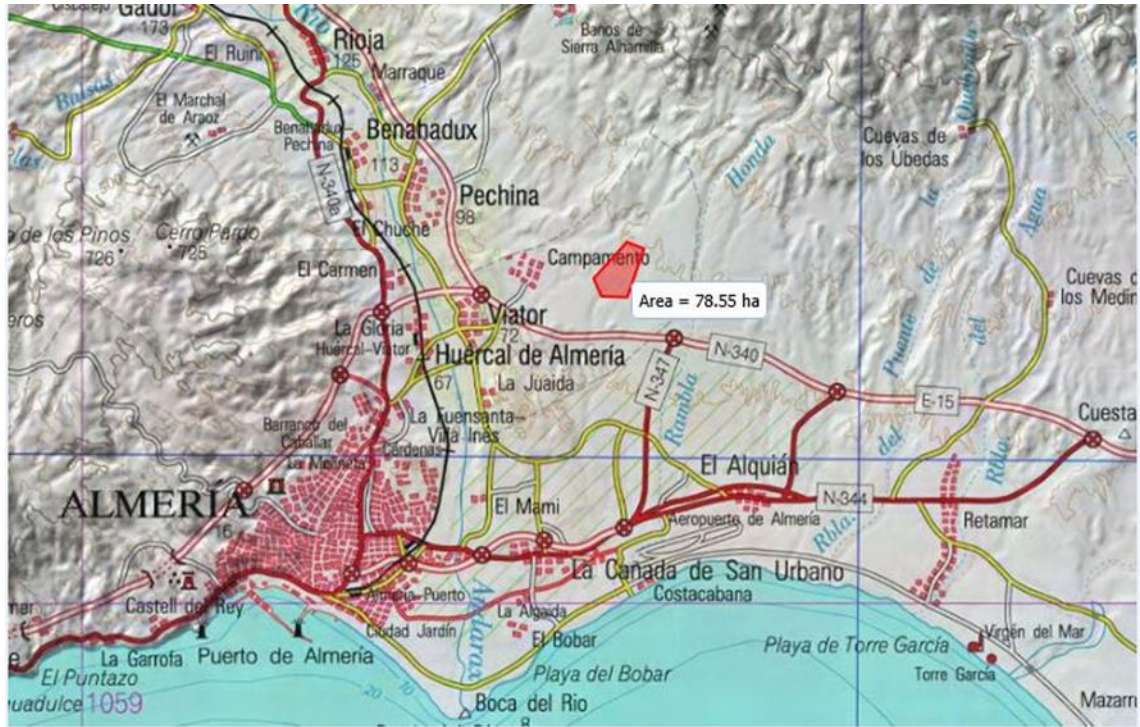


Figura 5.1.- Localización de la zona elegida.

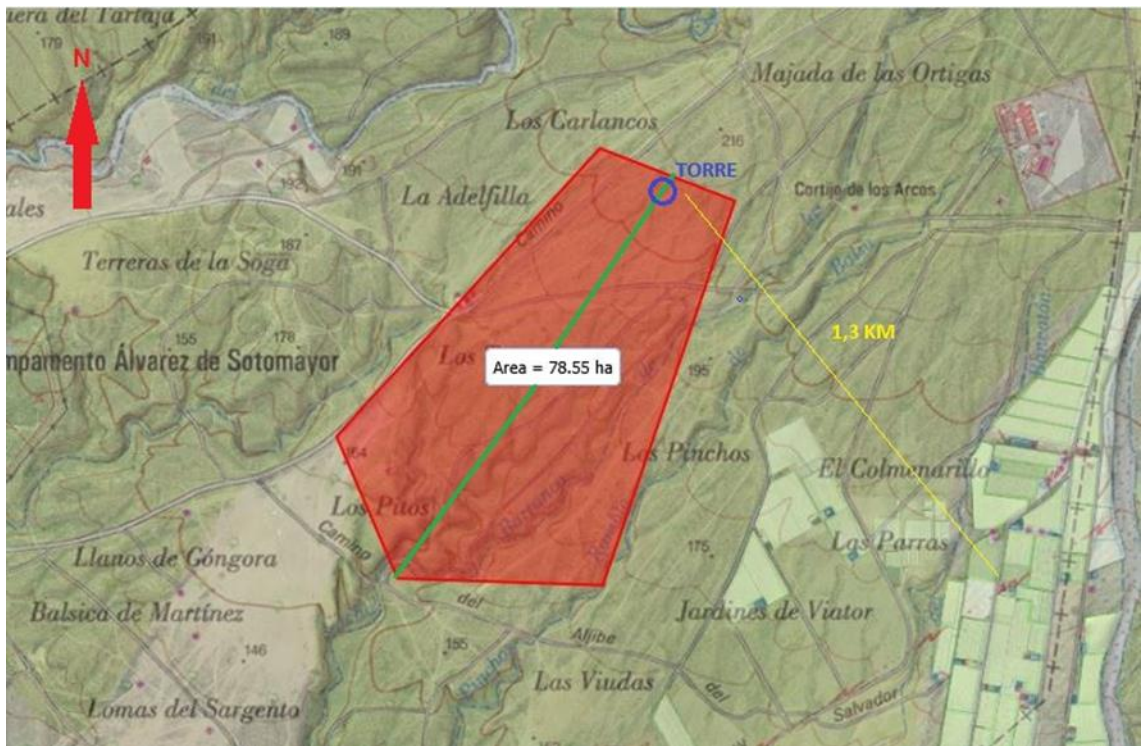


Figura 5.2.- Situación la zona elegida con respecto a la línea de evacuación más cercana.

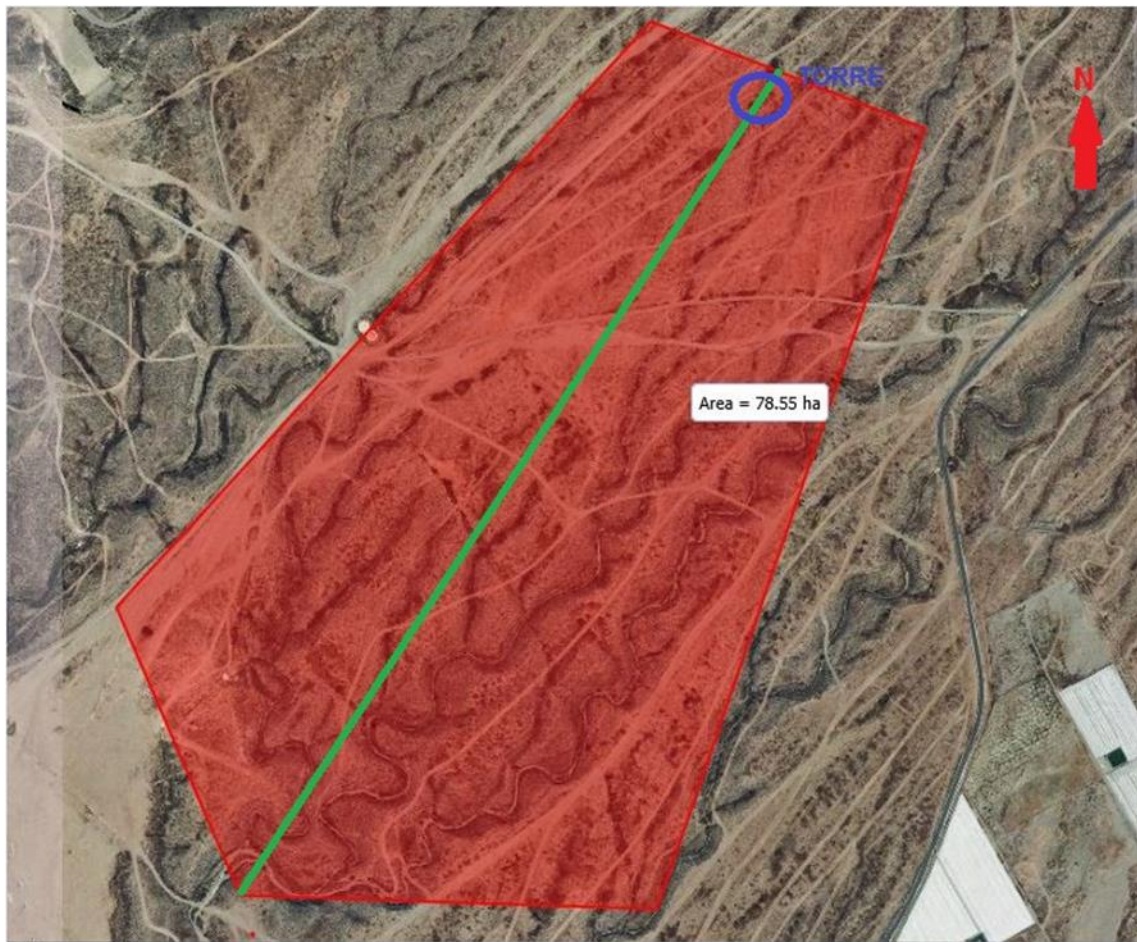


Figura 5.3.- Ubicación de la torre dentro del área seleccionada.

Este colector inclinado, encarado prácticamente hacia el sur, a la vez de captar más perpendicularmente la radiación, funciona a su vez como chimenea dirigiendo la corriente de aire hacía la torre que estaría situada, lógicamente, en la parte más elevada del colector, en lugar de la disposición central que ofrece en colectores planos. La diferencia de nivel entre la parte baja del colector y la torre es 64 m. por lo que la torre ve disminuida considerablemente su altura.

En la siguiente imagen se muestra una sección longitudinal de la parcela donde se pretende llevar a cabo el proyecto, con el fin de que se cuál es la inclinación del terreno.

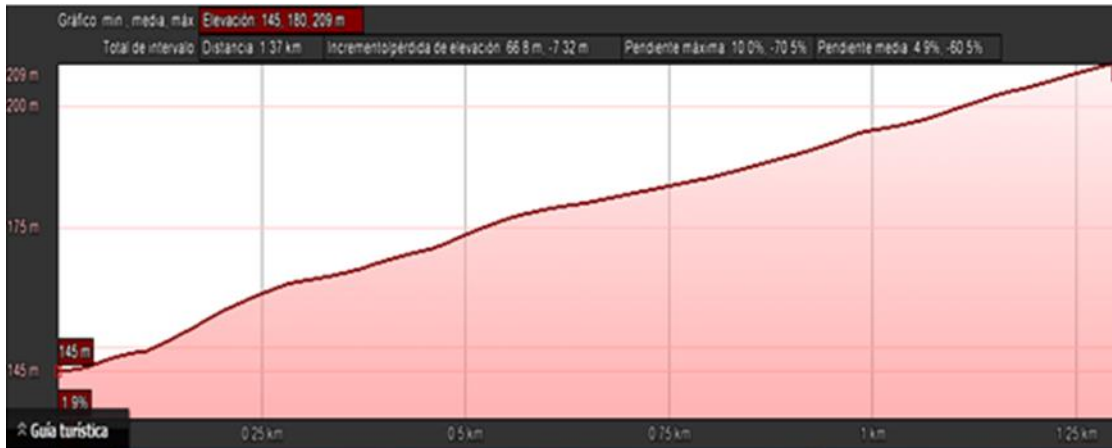


Figura 5.4.- Sección del área elegida a través del eje (en verde).

5.2 Radiación solar.

Tiene que ser lo más alta y uniforme posible a lo largo del año. Es preferible el mayor número posible de días despejados. Este importante criterio lo ofrece la ubicación elegida sobre Almería.

La radiación debe incidir en el campo de captación de la manera más limpia posible, por lo que áreas con nieblas y brumas deberían ser evitadas.

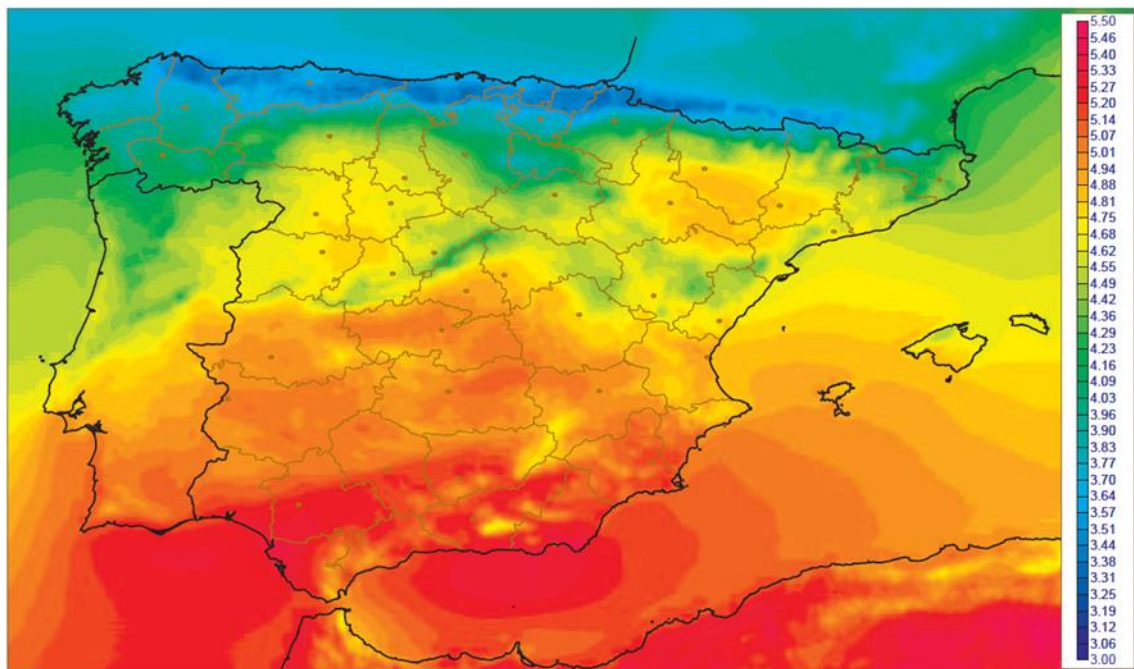


Figura 5.5.- Irradiación global media.

Como se aprecia en la imagen anterior el nivel de radiación de la zona es de moderado a alto con $1927,2 \text{ Kwh/m}^2$ al año.

Tabla 5.1.- Irradiancia kW/m² día) por provincias.

A CORUÑA	LUGO	ORENSE	PONTEVEDRA	OVIEDO	SANTANDER
3.86	3.84	4.1	4.08	3.57	3.66
BILBAO	VITORIA	S.SEBASTIAN	PAMPLONA	HUESCA	ZARAGOZA
3.54	3.79	3.18	4.04	4.75	4.78
TERUEL	BARCELONA	TARRAGONA	LERIDA	GERONA	AVILA
4.72	5.05	4.64	4.79	4.36	4.63
ZAMORA	SORIA	SEGOVIA	LEON	BURGOS	PALENCIA
4.7	4.8	4.54	4.49	4.31	4.61
VALLADOLID	SALAMANCA	LOGROÑO	MADRID	GUADALAJARA	CUENCA
4.01	4.72	4.22	4.88	4.82	4.72
TOLEDO	C. REAL	ALBACETE	CASTELLON	VALENCIA	ALICANTE
5	5.02	4.98	4.75	4.92	5.04
CACERES	BADAJOS	MURCIA	HUELVA	SEVILLA	CORDOBA
4.99	5.02	5.13	5.21	5.23	5.12
JAEN	CADIZ	MALAGA	GRANADA	ALMERIA	
5.17	2.28	5.19	5.2	5.28	

Como se observa en la imagen anterior, la irradiancia de Almería es la más alta, lo que hace del lugar un emplazamiento perfecto para instalar una tecnología que aproveche la energía solar.

5.3 Vientos predominantes.

Los vientos en la zona no suelen ser fuertes y si predominantes de SE (sureste), y dada la orientación del colector esto favorecería el flujo del aire en la torre.

Mes del año	ene	feb	mar	abr	Mayo	juni	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Año
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	1-12
Dominante Dir. del viento	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↘	↖
Probabilidad del viento >= 4 Beaufort (%)	32	36	40	37	36	31	28	31	34	29	30	28	32
Promedio													
Velocidad del viento (kts)	9	10	10	10	10	10	9	9	10	9	9	8	9
Temperatura media del aire (°C)	13	14	16	18	21	24	27	28	25	22	17	15	20

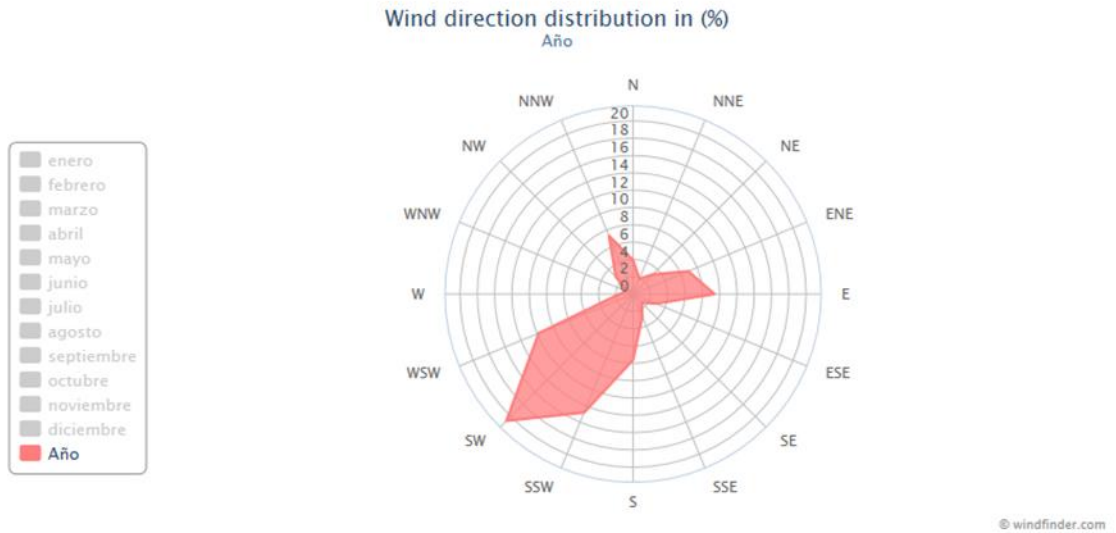


Figura 5.6.- Distribución de los vientos predominantes.

5.4 Características complementarias.

La cercanía del emplazamiento a la capital de Almería, ofrece el resto de criterios idóneos: fácil acceso a la zona dadas las vías de comunicación cercanas así como bajo coste para la transmisión de la energía generada (existencia de líneas de alta tensión a 1,3 Km.)

Por otra parte este emplazamiento tiene potencial para sostener negocios asociados al campo como pueden ser explotaciones agrícolas tal como existen en su entorno bajo invernaderos o bien producción de materia prima para elaboración de biodiesel.

6 Comparativa económica.

Una de las finalidades de este trabajo, como ya se explicó anteriormente, es realizar una comparativa entre una chimenea solar y un huerto solar. En este apartado del trabajo, se llevará a cabo una comparativa económica, a través de la cual podremos saber cuál de las dos tecnologías es más rentable a la hora de ser instalada.

Toda comparativa ha de realizarse en igualdad de condiciones, para que ésta sea fiable y de calidad, por este motivo, hemos decidido que la potencia de ambas tecnologías sea la misma, 2 MW.

Es importante destacar que las plantas eólico-solares, además de otras tecnologías solares, son apropiadas si estas están equipadas con sistemas de almacenamiento, garantizando así un funcionamiento continuo.

La incorporación de sistemas de almacenamiento térmico para que las centrales de torre solar sean rentables en lo económico, es necesario, pero no suficiente para competir con las plantas existentes basadas en el carbón, el gas natural o centrales nucleares cuyo coste de producción de la energía eléctrica es tres veces menor que el coste correspondiente al de las centrales de chimenea solar.

Atendiendo a lo anteriormente explicado, las plantas eólico-solares no pueden competir en lo económico con las centrales en las que se queman combustibles fósiles, así como tampoco pueden competir con las centrales nucleares, como se puede observar en la siguiente imagen:

Tabla 6.1.- Coste de producción e inversión de distintas formas de generación de energía eléctrica.

Método de generación de energía	Coste de producción (€/MW)	Inversión por MW generado al año (€/MW·año)
Combustión de carbón	55 – 60	200
Combustión de gas natural	60 - 65	150
Fisión nuclear	65 – 75	400 – 450
Central eólico-solar	155	2000
Parque solar fotovoltaico	280	3000

Los dos primeros métodos de generación de energía son emisores de gases de efecto invernadero y deberían más pronto que tarde ser remplazadas por tecnologías alternativas con cero emisiones. Por otro lado la fisión nuclear aunque tiene cero emisiones, genera residuos radiactivos, y es considerado un sistema de producción de energía eléctrica peligroso.

Dejando a un lado la generación de energía eléctrica mediante la quema de carbón o gas natural, y la producción de electricidad mediante la fisión nuclear, tecnologías que están fuera de nuestra comparativa, nos centramos en la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar.

Hay diversas invenciones capaces de aprovechar la energía solar para la producción de electricidad, sin embargo nuestra comparativa se centra en dos de ellas: las torres solares y los huertos fotovoltaicos.

Tabla 6.2.- Comparativa entre el coste de producción del MW en un huerto solar y en una central eólico-solar

Tecnología solar con funcionamiento continuo	Beneficios	Problemas	Coste de producción (€/MW)
Huerto solar con almacenamiento en baterías	No hay demanda de agua	Amortización del coste de las baterías	280
	Bajo coste de operación y mantenimiento	El propio coste de las baterías	
Central eólico-solar	No requiere uso de agua	Inversión inicial elevada	155
	Larga vida de operación	Largo periodo de construcción	
	Bajo coste de operación y mantenimiento		

En la tabla anterior se puede apreciar una comparativa de diferentes tecnologías solares con la generación continua, entre las que se incluyen:

- Paneles fotovoltaicos a gran escala (huerto solar) equipados con baterías.
- Plantas de Producción con Chimenea Solar.

Como se indica en la tabla, tanto los huertos solares como las chimeneas solares tienen sus pros y sus contras en lo que al tema económico se refiere, sin embargo, de la tabla se deduce que tanto el coste de producción directa del MW como la inversión por MW producido al año son mayores para un huerto solar que para una chimenea solar.

6.1 Conclusiones.

Tras echar un vistazo a las tablas anteriormente descritas, se obtienen las siguientes conclusiones:

Hoy por hoy, las centrales eólico-solares no podrían competir con las plantas de generación eléctrica cuyo funcionamiento está basado en la quema de combustibles fósiles como el carbón o el gas natural. Tampoco podrían competir con la electricidad generada a partir de la fisión nuclear ya que tanto el coste de producción directa como la inversión por MW producido al año es superior en las torres solares que en el resto de tecnologías mencionadas.

Por otro lado, si comparamos las centrales de chimenea solar con los huertos fotovoltaicos, la balanza se declina hacia la primera tecnología con un coste de producción del MW y una inversión por MW producido al año bastante menor que en los huertos solares.

6.2 Coste de las centrales eólico solares frente el coste de los huertos solares.

6.2.1 Coste de la central eólico-solar.

Para determinar el coste de la chimenea solar y del huerto solar que estamos comparando, debemos tener en cuenta que la potencia instalada será la misma, 2 MW.

Para calcular la inversión que debemos hacer si se quiere instalar una torre solar utilizaremos los datos publicados en el proyecto "Desertec". Esta información puede ser muy útil para especificaciones preliminares y estimaciones de costes ya que están basadas en las experiencias de equipos científicos y técnicos pioneros en el diseño y puesta en funcionamiento de manera satisfactoria de la primera torre solar, la de Manzanares (España), ya mencionada.

El proyecto "Desertec" propone la creación de una red eléctrica que conecte diversas centrales de producción de energías renovables en la denominada región MENA (siglas en inglés de las palabras Middle East, North Africa) es decir de las regiones de oriente próximo y norte de África.

Con ello se pretende principalmente por un lado proporcionar electricidad a Europa a partir del sol y del viento desde los desiertos del Sahara, Arabia y oriente medio y por otro lado proporcionar energía para que estos últimos países mayoritariamente áridos puedan desalinizar del mar un agua de la que tienen carencia.

El proyecto "Desertec" plantea la instalación de entre 40 y 56 centrales de chimenea solar independientes de 6.4 GW cada una, para cubrir aproximadamente el 50% de la demanda de la UE.

Un cálculo aproximado de la inversión de capitales para este proyecto se demuestra en la tabla siguiente:

Tabla 6.3.- Costes de los elementos de las torres solares según la potencia.

Costes (millones de €)	Potencia (MW)			
	2	5	15	30
Chimenea	13	19	34	49
Colector	9	14	41	66
Turbogenerador	4	8	19	32
Ingeniería	2	5	10	17
Total	28	46	104	164

La suma total de cada uno de los componentes de nuestra central eólico-solar y de la ingeniería de la misma ascendería a 28 millones de euros aproximadamente.

No debemos olvidarnos de que a esta cantidad debemos añadirle la obra civil, que se especifica a continuación.

Tabla 6.4.- Coste de la obra civil de la torre solar.

Concepto	Obra civil	
	Precio	Importe
Cimentación de la chimenea		292.000,00 €
Alquiler de caseta prefabricada para aseos	168,62 €/mes	168,62 x 24 = 4046,88 €
Alquiler de caseta prefabricada para vestuarios	128,78 €/mes	128,78 x 24 = 3093,72 €
Alquiler de caseta prefabricada para oficinas	138,06 €/mes	138,06 x 24 = 3313,44 €
Alquiler de caseta prefabricada para comedor	192,59 €/mes	192,59 x 24 = 4622,14 €
Fosa séptica		2.783,71 €
Vallado y puertas de acceso de personal y maquinaria		200.0000,00 €
Explanado del terreno		573.050,00 €
Total		1.082.906,91 €

Conociendo el coste que supondría la obra civil de nuestra central eólico solar, podemos determinar el coste total de la inversión, que sería de 29.082.906,91 euros.

6.2.2 Coste del parque solar fotovoltaico.

Para calcular la inversión que supondría la instalación de un parque solar de 2 MW, nos hemos apoyado en los datos obtenidos de un proyecto recientemente realizado en Albesa (Lleida) formado por 20 instalaciones fotovoltaicas independientes de 100 kW cada una.

Tabla 6.5.- Inversión total de un parque solar fotovoltaico de 2 MW

Unidades	Concepto	Precio	Importe
12600	Módulo fotovoltaico	750,01 €	9.450.126,00 €
100	Inversor	12.951,15€	1.295.115,00 €
100	Estructura seguidor solar	31.700,00 €	3.170.000,00 €
100	Cimentación	4.200,00 €	420.000,00 €
1	Caseta instalaciones	22.160,00 €	22.160,00 €
6000	Vallado y puertas	25,18 €	151.080,00 €
1	Instalaciones varias	51.000,00 €	51.000,00 €
1	Sistemas de seguridad	48.000,00 €	48.000,00 €
1	Sistemas de motorización	22.000,00 €	22.000,00 €
1	Proyecto ejecutivo	89.000,00 €	89.000,00 €
1	Dirección de obra	89.000,00 €	89.000,00 €
1	Plan de seguridad y salud	45.000,00 €	45.000,00 €
Total			14.896.481,00 €

6.2.3 Conclusiones.

Aunque el coste de producción de energía eléctrica en un parque solar fotovoltaico sea mayor que en una central eólico-solar (debido entre otros detalles al sistema de almacenamiento, ya que las baterías son bastante caras), la inversión a realizar para instalar dicha tecnología es menor. Una de las ventajas de los huertos solares, dentro del ámbito económico, es que necesitan mucho menos espacio que las centrales eólico-solares para la misma potencia. Esto hace que los costes de la obra civil, por ejemplo, se abaraten bastante.

En el ámbito económico, la batalla la gana el huerto solar ya que la inversión a realizar es mucho menor. A continuación, veremos cuál de las dos tecnologías es más competente en lo que al ámbito medioambiental se refiere.

7 Comparativa medioambiental.

7.1 Descripción del terreno.

La zona que se ha elegido para llevar a cabo la construcción de una torre solar, o en su caso de un huerto solar, es un antiguo campo militar de maniobras, a través del cual han circulado a lo largo de sus años de utilización diversos carros de combate. Lo anteriormente explicado y la propia naturaleza del terreno hacen de la zona seleccionada, una zona por lo general bastante desnaturalizada, colonizada por terrenos exentos de vegetación casi en su totalidad, no obstante el proyecto introduce varios impactos sobre el medio, que serán analizados en este apartado del trabajo.

Las altas temperaturas y la falta de lluvias condicionan la escasa y original vegetación herbácea y arbustiva a ras de suelo. Una especie omnipresente es la escoba.

En cuanto a la fauna, destacan pequeños mamíferos como conejos, lirones además de zorros, pequeños reptiles como el lagarto ocelado, o la culebra de escalera y numerosos invertebrados como alacranes y tarántulas.

Cabe destacar que la flora y la fauna anteriormente descrita se encuentra en el área que ocuparía nuestra chimenea solar o nuestro parque solar fotovoltaico. Cabe destacar, que cerca de nuestra ubicación existen ramblas en donde la vida animal y vegetal es un poco más rica, pero esas zonas están fuera de nuestra influencia por lo que no se verá afectada por los posibles impactos que pueda introducir la construcción y el funcionamiento de una instalación de este tipo.

7.2 Impactos de la central eólico-solar.

El impacto ambiental de una instalación solar termoeléctrica de este tipo, se va a centrar en el impacto paisajístico debido a la ocupación de una gran extensión, en nuestro caso alrededor de 78,5 hectáreas y a la presencia de una estructura de unos 400 metros de altura que va a ser fácilmente visible desde cualquier punto cercano.

Respecto a los beneficios ambientales cabe destacar que la energía eólico-solar forma parte de un conjunto de energías renovables para la producción de energía eléctrica, en ausencia de procesos de combustión y por tanto en ausencia de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

7.2.1 Impacto sobre la calidad del aire.

Fase de construcción: Este factor se verá principalmente afectado por las emisiones de partículas provocadas por los movimientos de tierra y el tránsito de maquinaria, así como por los gases de combustión emitidos por los vehículos.

Cabe destacar que la emisión de gases de combustión se considera de escasa relevancia ya que se trata de actuaciones puntuales y con una temporalidad determinada (mientras dure el periodo de obra, estimado en 24 meses).

Por otro lado el aumento de partículas en suspensión, debido a operaciones como movimientos de tierras, excavaciones para cimentaciones y el tránsito de vehículos y maquinaria puede llegar a ser relevante.

A pesar de ello las afecciones provocadas sobre el medio resultan ser mínimas, debido a que:

- Las velocidades del viento registradas en la zona son bajas. Esto favorecerá la deposición de las mismas a escasos metros de las obras.
- No existen especies vegetales de interés, sobre las que podría tener mayor incidencia la deposición de partículas, al igual que tampoco existen cursos de aguas permanentes.

Las especies vegetales sobre las que el aumento del nivel de partículas podría tener mayor afección serán las cultivadas en terrenos circundantes, por lo que se tendrán en cuenta medidas preventivas y correctoras, para minimizar la emisión de partículas difusas durante el periodo de ejecución del proyecto.

Fase de explotación: La afección en cuanto a la calidad del aire en la fase de explotación es de carácter positivo, ya que se produce energía eléctrica mediante un recurso renovable que favorece la disminución de gases contaminantes emitidos a la atmósfera y por tanto contribuye a la disminución del efecto invernadero.

Conclusiones: Los efectos que tendrán lugar se deben a la emisión de partículas difusas y a la emisión de gases de combustión siendo en todos los casos los impactos de una intensidad baja, de efecto directo, discontinuo y recuperable a corto plazo.

No obstante, cabe destacar la existencia de un impacto positivo debido a las emisiones de CO₂ evitadas con el funcionamiento de una planta de estas características.

7.2.2 Impacto acústico.

Fase de construcción: Durante el periodo de tiempo que dure la ejecución las obras del proyecto se prevé un aumento de la potencia acústica provocado por actividades como el tránsito de vehículos, realización de excavaciones, montaje de estructura, etc. El principal afectado por esta molestia será la fauna, ya que en el entorno inmediato de la instalación no existen zonas habitadas.

Fase de explotación: En esta fase, la única fuente de generación de ruido será el grupo turbogenerador. Durante el día los niveles postoperacionales serán superiores a los preoperacionales en 3.1 dB. En el periodo nocturno serán superiores en 2.6 dB.

Conclusiones: En la fase de construcción, la alteración del nivel sonoro se considera de intensidad media a baja, reversible a corto plazo y recuperable a corto plazo, por lo que se ha valorado como compatible.

La alteración de los niveles sonoros se ha valorado como compatible en la fase de explotación.

7.2.3 Impacto sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

Los únicos efectos significativos que se prevén sobre la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas tienen lugar en la fase de construcción. Estos efectos pueden provenir o bien de las situaciones accidentales que pueden dar lugar al vertido de aceites o sustancias utilizadas para la maquinaria de la obra, o bien por la realización de cimentaciones.

Conclusiones: en cuanto a la afección de aguas subterráneas por realización de cimentaciones se han valorado de intensidad baja, de extensión parcial, reversible a corto plazo, efecto directo y recuperable de manera inmediata, por ello se ha valorado como compatible.

Por otro lado, la probabilidad de que la afección de las aguas por vertido de aceites y otras sustancias contaminantes utilizadas por la maquinaria ocurra es prácticamente nula si se realizan las medidas de control necesarias.

7.2.4 Impacto sobre el suelo y la morfología del terreno.

Fase de construcción: Estos efectos vendrán principalmente derivados de la fase de construcción de la obra, debido a la preparación del terreno para la disposición de la planta, en todo caso se trata de labores superficiales, por lo que el aspecto exterior de la superficie terrestre no se variará de manera significativa.

En cuanto a las características que hacen del suelo un lugar apto para albergar vida en él (características edáficas) pueden verse alteradas en las labores de ejecución del proyecto debido al movimiento de tierras, las excavaciones y cimentaciones realizadas, que en el caso de la torre será de unas dimensiones considerables y en el caso del colector, se trata de una gran superficie. Además, no debemos olvidarnos de que existen otras transformaciones que variarán las características del suelo, como es por ejemplo el asfaltado del vial principal.

En este apartado debemos tener en cuenta también el impacto que puede generar el vertido de aceites o combustibles procedentes de la maquinaria utilizada en la fase de ejecución del proyecto, es por esto, que deberán extremarse las precauciones en la manipulación, almacenamiento de tales sustancias, así como en las labores de mantenimiento, con el fin de no producir tales episodios accidentales de contaminación del suelo.

Conclusiones: en cuanto a los efectos sobre la morfología del suelo por acondicionamiento de la superficie y tránsito de maquinaria se ha valorado como compatible, ya que se trata de un efecto de baja intensidad y perfectamente reversible y recuperable.

La afección sobre el suelo debido a la realización de cimentaciones y apertura de zanjas se ha valorado como moderado, ya que se trata de efectos permanentes, irreversibles, de efecto directo y continuo.

7.2.5 Impacto sobre la ocupación y usos del suelo.

Los efectos por ocupación del suelo en la fase de construcción debido a la realización de las cimentaciones, permanecerán en la fase de explotación, por la presencia de estas mismas construcciones.

La zona donde se pretende instalar la planta solar era un campo de entrenamiento militar, actualmente en desuso. El cambio de uso del suelo y la ocupación afectan a una superficie medianamente extensa, unas 78,5 hectáreas, sin embargo el hecho de que la zona tiene una amplia distribución hace que la importancia de este impacto se reduzca.

Conclusiones: todos los efectos sobre la ocupación del suelo se han considerado como compatibles, excepto la ocupación de las cimentaciones que se ha caracterizado como moderado dada su extensión y su carácter permanente.

7.2.6 Impacto sobre la vegetación.

Como ya se ha señalado con anterioridad, el terreno que afecta a nuestro proyecto era un campo de tiro militar, en donde la vegetación existente es más bien escasa, por lo que la afección sobre la vegetación por acondicionamiento de la superficie y las labores de

mantenimiento en la fase de construcción y de explotación respectivamente, es muy escasa.

La vegetación que puede verse afectada por el proyecto son los cultivos de zonas aledañas, sin embargo, dichos cultivos se llevan a cabo dentro de invernaderos que actúan como barreras defensivas de esos cultivos por lo que se puede considerar que la realización de nuestro proyecto no influye negativamente en el desarrollo de dichos cultivos.

Conclusiones: la afección sobre la vegetación por acondicionamiento de la superficie y debida a las labores de mantenimiento se han valorado como compatibles, ya que la vegetación afectada es de escasa relevancia.

Por otro lado, la posible afección de nuestro proyecto (por ejemplo: partículas en suspensión producidas por el movimiento de la maquinaria en la fase de construcción) se considera compatible por dos razones: la distancia, que es prudente, no son zonas colindantes, y el hecho de que los cultivos están protegidos por los invernaderos.

7.2.7 Impacto sobre la fauna.

Fase de construcción: durante la fase de construcción de nuestra chimenea solar, aspectos como el tránsito de maquinaria o la elevación de los niveles sonoros, generarán una alteración del hábitat natural, provocando la huida de los animales que habitan la zona hacia zonas más tranquilas.

La ejecución del proyecto de la planta solar puede causar efectos sobre la avifauna nidificante en épocas de reproducción, por molestias debidas al tránsito de los vehículos, realización de excavaciones, cimentaciones, que podrían afectar sobre todo a aves esteparias que se caracterizan por nidificar sobre el suelo o en pequeños arbustos.

Fase de construcción: en el periodo de explotación de la chimenea solar, los impactos sobre la fauna serán menores que la fase de construcción ya que, una vez que la situación se normalice y los animales se acostumbren a los nuevos elementos que han sido introducidos en su hábitat, éstos podrán volver a sus refugios anteriores, ahora cubiertos por el colector.

Conclusiones: los impactos sobre la fauna tanto en fase de explotación como en fase de construcción se han valorado como moderados. Esto se debe a que son efectos de manifestación inmediata y de carácter continuo, considerando la intensidad de los efectos como media en todos los casos. Se trata de efectos irregulares o discontinuos en su mayor parte, excepto para el caso de la pérdida de hábitat por ocupación del terreno que es permanente.

7.2.8 Impactos sobre las infraestructuras y la red de servicios.

Fase de explotación: durante la fase de construcción, es necesario el tránsito de maquinaria por las principales vías de comunicación. El efecto provocado por el tránsito de vehículos pesados y maquinaria de obra se deberá sobre todo a la ralentización del tráfico.

Cabe destacar que el tránsito de esta maquinaria aunque tendrá lugar durante todo el periodo de la obra será puntual y de máxima afluencia en determinados periodos, como al inicio con la incorporación de maquinaria y con el transporte de material e infraestructuras.

Fase de explotación: en este periodo, las afecciones respecto al tráfico pueden considerarse mínimas, debido a que las labores de mantenimiento no generan una gran afluencia de vehículos.

Conclusiones: los impactos provocados sobre las infraestructuras viarias se han valorado como compatibles, ya que se trata de una situación puntual y temporal, de extensión media, de manifestación inmediata, siendo totalmente recuperable y reversible.

7.2.9 Impacto sobre los caminos pecuarios.

No se considera necesario transitar por las vías pecuarias cercanas ni en la fase de construcción ni tampoco en la de explotación, ya que existen otros caminos rurales que conducen a lo que antiguamente era un campo de tiro para entrenamiento militar.

Conclusiones: la afección de las vías pecuarias es mínima ya que no se va a utilizar ninguna, por lo que el tránsito ganadero y uso público de la vía pecuaria no se verá interrumpido en ningún momento. El efecto sobre las mismas se ha valorado como compatible.

7.2.10 Impacto sobre el paisaje:

Fase de construcción: durante el periodo de tiempo que duren las obras, el efecto sobre el paisaje vendrá determinado por las infraestructuras temporales necesarias para la obra tales como el parque de maquinaria, el almacenamiento tanto de estructuras y materiales como de tierras procedentes de las excavaciones, etc. Sin embargo, debido a la distancia tanto a núcleos de población cercanos como a grandes vías de comunicación, y a al carácter temporal de las obras, cabe esperar que el efecto sobre el paisaje durante el periodo de obras se ha calificado como no significativo.

Fase de explotación: en esta fase, los efectos sobre el paisaje son producidos por la existencia de un elemento artificial de grandes dimensiones, la chimenea solar. Recordemos que es una zona preferentemente llana, en la que no hay accidentes topográficos y que la densidad de vegetación arbórea es baja. Estos aspectos harán que dicha instalación sea fácilmente detectable desde puntos alejados a la planta.

Conclusiones: el impacto provocado por la presencia de maquinaria se ha estimado como compatible, ya que se trata de una acción de carácter transitorio y de difícil detección debido a que los caminos rurales cercanos a la instalación no están muy transitados.

En cuanto al efecto sobre el paisaje provocado por la presencia de las instalaciones este se ha valorado en todos los casos como moderado.

7.2.11 Impacto sobre el consumo de combustibles.

Fase de construcción: tanto la maquinaria utilizada para construir físicamente nuestra instalación solar, como los vehículos de transporte de los materiales necesarios para llevar a cabo dicha obra generan un consumo de combustible importante, contribuyendo así al agotamiento de los combustibles fósiles y al incremento de la polución y efecto invernadero. A favor, podemos decir que la maquinaria y vehículos de transporte serán utilizados durante el periodo de tiempo que duren las obras, es decir, 24 meses.

Fase de explotación: con el inicio del funcionamiento de la planta se generara energía eléctrica a partir de energía solar, que es un recurso renovable, lo que implica una disminución del consumo de combustibles fósiles para generar la energía eléctrica demandada, por lo que el impacto se considera positivo.

Conclusiones: el consumo de combustible llevado a cabo por la maquinaria de obra y por los vehículos de transporte se ha valorado como moderado, debido fundamentalmente a que se trata de un consumo de un recurso no renovable y una fuente finita.

7.2.12 Impacto sobre el medio social y económico.

Fase de construcción: el impacto provocado sobre el medio socioeconómico en la fase de construcción de nuestro proyecto generará un efecto positivo, debido a la generación de empleo por parte de la empresa constructora.

Fase de explotación: De forma indirecta el sector servicios de la zona se verá enriquecido también, ya que al tratarse de una tecnología innovadora, se atraerá un continuo flujo de visitantes.

7.3 Impactos del huerto solar.

7.3.1 Impacto sobre la calidad de las aguas.

Fase de construcción: Se pueden producir pérdidas de combustible o aceites de la maquinaria destinada a la preparación de terreno. Pero a parte de improbable, la contaminación de las aguas parece imposible ya que las obras se van a llevar a cabo en una zona prácticamente desértica a través de la cual no discurren ni ríos ni arroyos.

Fase de explotación: en esta fase del proyecto, no habrá maquinaria presente en el terreno en el que vamos a llevar a cabo nuestro proyecto exceptuando los días esporádicos en los que se realizarán las inspecciones técnicas o labores de mantenimiento, por lo tanto el vertido de cualquier sustancia que pueda afectar al agua de la zona es más que improbable.

Conclusiones: el impacto sobre la calidad del agua tanto en la fase de explotación como en la fase de construcción de nuestro huerto solar de 2 MW de potencia se considera no significativo.

7.3.2 Impacto sobre la calidad del aire.

Fase de construcción: El uso de maquinaria pesada para el transporte de material, construcción de zanjas y preparación del terreno de la instalación producirá una contaminación química atmosférica, aunque los casos serán de escasa magnitud por lo que se considera mínima su incidencia en las comunidades vegetales y animales.

Las emisiones de polvo y ruido debido al movimiento y a la operación de la maquinaria de obra, no pueden repercutir sobre la población ya que la población más cercana se encuentra a 3 kilómetros de distancia, sin embargo si puede afectar a la fauna terrestre y a la vegetación.

El ruido puede provocar un alejamiento y una posible alteración de los procesos de reproducción y cría de determinados animales. La magnitud del impacto de la emisión del ruido dependerá de varios factores, entre los que destacan: niveles sonoros emitidos, duración de la emisión, franja horaria y proximidad de la población al foco emisor.

Fase de explotación: Las instalaciones fotovoltaicas no emiten contaminantes de ningún tipo a la atmósfera. Se considera una energía limpia, pues transforma la energía fotovoltaica del sol en energía eléctrica.

Conclusiones: mientras que el impacto que generará nuestra instalación fotovoltaica en la fase de construcción se considera compatible, dicho impacto se considera positivo en la fase de explotación ya que al tratarse de una forma limpia de generar energía, estaremos ahorrando gran cantidad de emisiones de gases nocivos para la atmósfera contribuyendo así a frenar el la contaminación.

7.3.3 Impacto sobre el suelo.

Fase de construcción: La erosión del terreno será mínima en la fase de construcción debido a que no es necesario realizar grandes desmontes, pues la zona donde se ubicará la instalación es una zona llana y despejada, basta con realizar un nivelado y desbroce de la zona afectada por nuestro proyecto. Se considera el efecto de incremento en la erosión muy bajo y compatible con el medio.

Fase de explotación: El impacto generado viene determinado por la ocupación del terreno. La valoración de este impacto se podría considerar como no significativo ya que el impacto sobre la productividad no se ve alterado al seguir produciendo beneficios. Además el suelo actualmente no tiene ningún uso.

Conclusiones: en ambas fases del proyecto (construcción y explotación) el impacto sobre el suelo se considera compatible.

7.3.4 Impactos sobre la vegetación.

Fase de construcción: En la fase de obra se producirá la pérdida de matorrales y vegetación arbustiva propia de la zona debido a la cimentación de la estructura de colectores, zanjas para la ubicación de conductores, etc. Se dice que la pérdida de dicha vegetación no es muy relevante ya que como ya se ha mencionado con anterioridad la zona presenta un grado de desertización bastante elevado.

Fase de explotación: Una vez la instalación esté en funcionamiento, difícilmente se verá comprometida la vegetación circundante. Se producirá una recuperación de la vegetación en las zonas de afección temporal.

Conclusiones: en ambos casos, la pérdida de vegetación se ha considerado como un impacto compatible.

7.3.5 Impacto sobre la fauna.

Fase de construcción: Los movimientos de tierras que serán necesario realizar, causan molestias a las escasas especies que pueden habitar en la zona. El impacto se considera compatible.

Fase de explotación: Se han detectado reacciones de sorpresa de algunos animales al ponerse en marcha instalaciones solares, si bien estas reacciones han desaparecido en poco tiempo, acostumbrándose los animales a la nueva situación. El impacto también se considera compatible en esta fase.

7.3.6 Impacto sobre el paisaje.

Fase de construcción: el tiempo de duración de las obras y el tiempo esperado de regeneración de la cubierta vegetal en las áreas alteradas determinará la magnitud del impacto sobre el paisaje intrínseco. Por otro lado la magnitud del impacto sobre el paisaje extrínseco dejará de tener efecto al finalizar las obras.

Operaciones como los movimientos de tierras, la presencia de maquinaria pesada y vehículos de obras, la colocación de los paneles, etcétera producen la modificación de los componentes del paisaje. Estos se realizarán en el área seleccionada para ello (unos 135000 m² de extensión), siendo la modificación del paisaje mínima.

Fase de construcción: La presencia de paneles solares y casetas de control no suponen una pérdida de calidad del paisaje en donde se ubican, ya que no son vistos desde muchos lugares. Además, por su singularidad pueden destacar dentro de un terreno homogéneo y árido que a priori no tiene ningún interés, aportando así un grado a la calidad del paisaje.

Conclusiones: una vez que las obras se den por finalizadas, el aspecto de emplazamiento de la instalación mejorará debido a la desaparición de la maquinaria pesada, materiales de obra sobrante, etc. Debemos tener en cuenta que se habrán introducido nuevos elementos tales como paneles fotovoltaicos, sin embargo el impacto que esto genera sobre el paisaje se estima como compatible.

7.3.7 Impacto socioeconómico.

Fase de construcción: Contando con el hecho de que tanto las empresas suministradoras de materiales como las arcas municipales se verán favorecidas, debemos tener en cuenta que la demanda de mano de obra puede absorber población activa local dentro del término municipal afectado.

El sector servicios se verá beneficiado al incrementar su demanda de forma moderada, por lo que puede considerarse un efecto positivo sobre el mismo. El impacto como se ha comentado es positivo.

Fase de explotación: el huerto solar fotovoltaico creado tendrá un impacto positivo durante la fase de funcionamiento, debido a que en la zona se crearán nuevos puestos de trabajo, aumentará el desarrollo del sector terciario en la zona afectada y a nivel local se producirán ingresos vía impuestos.

Por otro lado, tras la puesta en funcionamiento de la nueva tecnología, la población percibe que colabora en la conservación del medio ambiente de forma activa. El impacto se considera positivo.

7.4 Valoración global.

Como se puede observar, ninguna de las dos tecnologías propuestas que se pueden instalar en el antiguo campo militar de tiro de Almería supone la generación de impactos medioambientales de carácter severo, que son aquellos que para la recuperación de las condiciones del medio, exigen la adecuación de medidas protectoras o correctoras, y en los que, aun con esas medidas, la recuperación precisa de un periodo de tiempo dilatado, ni tampoco de carácter crítico, que son los que se producen una pérdida permanente de las condiciones ambientales, sin posible recuperación, incluso con la adopción de medidas protectoras o correctoras.

Las posibles afecciones que pueden repercutir a la naturaleza de la zona elegida para llevar a cabo nuestro proyecto se han calificado en todo caso como compatibles (la recuperación es inmediata tras el cese de la actividad, y no precisa medidas protectoras o correctoras) o moderadas (recuperación no precisa prácticas protectoras o correctoras intensivas, en donde la consecución de las condiciones ambientales iniciales requiere cierto tiempo), por lo que se puede decir que el daño que generan ambas tecnologías al

medio ambiente es prácticamente el mismo. El elemento diferenciador entre la torre solar y el huerto fotovoltaico son las dimensiones. La planta de generación eléctrica mediante torre solar, se estima que necesita una extensión de 78,5 hectáreas, mientras que el huerto solar se puede instalar en una finca de 13,5 hectáreas. Además debemos tener en cuenta la torre. Es un elemento que por su gran envergadura, el impacto visual que genera es mucho mayor que el que pueden generar los distintos elementos formadores del parque solar.

Por estas razones, en cuanto al ámbito medioambiental, se instalaría un parque solar fotovoltaico antes que una central eólico-solar.

8 Conclusiones generales.

Concluimos que uno de los objetivos de este trabajo, que era el de presentar una descripción exhaustiva de la chimenea solar y su aplicación para la generación de energía eléctrica, se cumplió de manera satisfactoria. Se expusieron las diversas ideas que dieron origen al desarrollo de la torre solar, poniendo en evidencia que la tecnología es más antigua de lo que se sugiere. El funcionamiento de la chimenea solar, así como los principios termodinámicos en que se basa, fueron expuestos y explicados. Se habló también sobre la única planta de torre solar funcional a gran escala construida hasta la fecha: la planta prototipo de Manzanares, España. Se expusieron diferentes variantes de la tecnología, pensadas para hacer más eficiente el funcionamiento de la planta o facilitar su construcción. Se expusieron los proyectos que se han desarrollado para la construcción de plantas a gran escala en diversas partes del mundo, bajo las ventajas que suponen las nuevas facilidades e incentivos que los gobiernos están otorgando a las energías alternativas.

Se observó que la chimenea solar surge como una alternativa al uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, en un intento por mitigar los efectos del calentamiento global y la disminución de recursos energéticos disponibles. La central eólico-solar hace uso de tres tecnologías perfectamente conocidas y las conjuga de una manera simple: el invernadero, la chimenea y el molino de viento.

Se determinó que fue el ingeniero alemán, profesor Jörg Schlaich, el desarrollador del concepto de chimenea solar, pero la idea ya había sido concebida con mucha anterioridad por el ingeniero español Isidoro Cabanyes. Es en los primeros años de la década de los años 80 cuando el concepto propuesto por Schlaich toma fuerza y se materializa con la construcción de una planta prototipo en la localidad de Manzanares, España, con el objetivo de realizar investigación y probar la factibilidad de la tecnología. El proyecto tuvo éxito y la planta operó satisfactoriamente generando una potencia alrededor de 50 kW, lo que demostró que el concepto es funcional.

El funcionamiento de la chimenea solar ha sido descrito y se encuentra entendido en su totalidad. Se estableció que la altura de la chimenea y el tamaño del colector son los dos factores que determinan la eficiencia de la chimenea solar, ya que la radiación solar no puede ser controlada. Mientras mayor sea la altura de la chimenea, mayor es la eficiencia de la planta y por lo tanto, mayor es la energía generada, ya que una chimenea de mayor altura proporciona al sistema una mayor diferencia de presión y temperatura para poder extraer trabajo. Algo similar ocurre con el colector, el cual debe ser lo más grande posible en extensión para poder captar la mayor cantidad de radiación solar y poder elevar la temperatura de un mayor volumen de aire.

Se observó que otro factor muy importante en el desarrollo de una chimenea solar, es el material con el que esté fabricado el colector. La calidad y las propiedades ópticas de este material determinan de manera directa la eficiencia del colector, es decir, la eficiencia con la cual la energía disponible en la radiación solar es transformada en calor sensible en el aire dentro del colector. El colector solar funciona bajo los mismos principios que un invernadero. El material que cubre el colector es transparente a la radiación solar de onda corta y ésta calienta el suelo debajo de él. El suelo emite radiación infrarroja de onda larga, la cual no puede atravesar el material y se refleja al suelo, lo que provoca que la energía quede atrapada dentro del colector. Para maximizar este efecto, el material debe

ser lo más transparente posible a la radiación de onda corta y lo más reflejante posible para la radiación infrarroja. Materiales como el vidrio poseen estas características de manera natural y si se fabrican de manera especial para tal objetivo, sus características pueden mejorarse.

Determinamos que la turbina eólica que se usará en una chimenea solar es diferente de las turbinas que se encuentran en los parques eólicos al aire libre. En un parque eólico, las turbinas funcionan con velocidades altas de aire y bajos diferenciales de presión, mientras que en una chimenea solar las velocidades de aire alcanzadas son bajas y el diferencial de presión es grande. Por lo tanto, la turbina de una chimenea solar debe trabajar con presión y no con velocidad, siendo el funcionamiento similar a, otra vez, una planta hidroeléctrica.

Descubrimos que la generación de potencia en la chimenea solar a lo largo del día sigue una curva creciente desde un valor mínimo, en de las horas frías de la mañana, llega a un valor máximo alrededor del mediodía para después disminuye al atardecer. Una de las ventajas de la chimenea solar es que parte de la radiación solar se almacena en el suelo del colector y se libera durante la noche, haciendo que la generación de electricidad sea continua, incluso de noche. Este efecto se puede maximizar si en el suelo del colector se instala algún sistema que absorba radiación solar y almacene calor para después liberarlo durante la noche, como tuberías pintadas de negro y llenas de agua. Esto tendería a aplanar la curva de potencia, haciendo que la cantidad de energía generada se mantenga relativamente constante a lo largo del día. De ésta forma, la salida de potencia de la planta puede ser manipulada para satisfacer los requerimientos energéticos del sitio.

Concluimos que esta tecnología tiene una gran ventaja, y es que a diferencia de la mayoría de las tecnologías térmicas convencionales, ésta no utiliza agua para su proceso, exceptuando el agua que se utiliza para limpiar el colector y que éste no pierda rendimiento y el agua con el que se llenan los tubos de almacenamiento térmico. Esta característica hace de la chimenea solar una opción muy atractiva. En contraposición la gran desventaja de la chimenea solar es que para poder generar cantidades significativas de energía, la planta debe tener dimensiones considerablemente grandes.

Se resalta el hecho de que existe un gran campo de investigación entorno a la chimenea solar, principalmente con el objetivo de aumentar su eficiencia y poder reducir sus dimensiones. Se necesita de investigación para desarrollar nuevos materiales para el colector solar, que permitan captar una mayor cantidad de radiación solar y convertirla en calor sensible en el aire dentro de él. En cuanto a la chimenea se necesita investigación que permita reducir sus dimensiones. Para la turbina se necesitan nuevos diseños y perfiles de las palas que le permitan trabajar eficientemente bajo condiciones de baja velocidad del viento y alta caída de presión.

Concluimos, con los datos obtenidos y presentados en el presente trabajo, que la tecnología de las torres solares es técnicamente factible, además sus principios de funcionamiento ya son conocidos y comprendidos a fondo, sin embargo, existen inconvenientes para la construcción de plantas de escala comercial. Mediante la comparativa que se ha realizado en este trabajo, nos damos cuenta que hoy por hoy es más rentable construir una instalación solar fotovoltaica que una planta eólico-solar (siendo ambas tecnologías de la misma potencia) debido a que tanto la inversión como el impacto generado en el medio ambiente (como se ha demostrado) es mucho menor para un huerto solar que para una torre solar.

9 Bibliografía.

E. Lorenzo. (2002). De los archivos históricos de la energía solar. Universidad Politécnica de Madrid, 2002.

JÖRG SCHLAICH. Ediciones Axel Menges (1995). The solar chimney: electricity from the sun.

ALCOR, E. Edición Progensa (2002). Instalaciones solares fotovoltaicas.

VICENTE CONESA FDEZ.-VITORIA (Dr. Ingeniero Agrónomo). 2010. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental.

M. TERESA ESTEBAN BOLEA. 1.989. Evaluación del Impacto Ambiental. Itsemat. Fundación MAPFRE.

Consultas en internet:

www.censolar.es

www.energias-renovables.com

www.soltechenergia.com

www.cubasolar.com

www.fotovoltaica.com

Otras referencias:

Academia de Artillería (biblioteca) Segovia.

Ayuntamiento de Fuente del Fresno. Archivo. Ciudad Real

Ayuntamiento de Manzanares. Archivo. Ciudad Real