



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

EVALUACIÓN DE ENERGÍA SOLAR-EÓLICA PARA RIO LAGARTOS

que para obtener el grado de
**Maestro en Ciencias y Tecnología del Agua
(Hidrometeorología)**

presenta
Manuel Antonio Morales Quiñones

Tutor: Dr. Efraín Mateos Farfán

Jiutepec, Morelos

2021





Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “EVALUACIÓN DE ENERGÍA SOLAR-EÓLICA PARA RIO LAGARTOS”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Manuel Antonio Morales Quiñones

Jiutepec, Morelos. A 28 de mayo del 2021.



MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

Ante el Jurado integrado por:

Presidente: Dr. Martín José Montero Martínez,
Secretario: Dr. Julio Sergio Santana Sepúlveda
Vocal 1: Dr. Efraín Mateos Farfán
Vocal 2: M.C. Roberto Ramírez Villa

Tutor de tesis

Dr. Efraín Mateos Farfán

Jiutepec, Morelos a 28 de mayo de 2021
Instituto Mexicano de Tecnología de Agua



Dedicatoria

Esta tesis está dedicada primeramente a mi Dios, cuya presencia en mi vida ha sido constante, nunca se apartó de mí, me protegió y cuidó en todo momento, le estoy eternamente agradecido, que mis logros sean para él.

A mi familia que siempre me han apoyado, tanto económicamente como emocionalmente y han sido un motor fundamental para mi autorrealización, sin ellos no hubiera elegido continuar con mis estudios, sus valores influenciaron en mí para mi formación profesional.

Por último, pero no menos importante a Blanca Inés Segura Aguilar, cuya compañía ha alegrado mis días, gracias por apoyarme los momentos donde más lo necesitaba y animarme para continuar mis proyectos.



Agradecimientos

A mi tutor, Dr. Efraín Mateos Farfán, por su apoyo, paciencia, su enseñanza, sus observaciones y comentarios que me ayudaron a concluir la maestría y sobre todo por enseñarme a ser un mejor profesional.

A mi comité tutorial por dedicarme su tiempo, sus observaciones y comentarios:

Dr. Martín José Montero Martínez

M.C. Roberto Ramírez Villa

Dr. J. Sergio Santana Sepúlveda

A mis amigos, que siempre me apoyaron, gracias a ustedes por sus enseñanzas y alegrías que me brindaron en este trayecto de mi vida, lo que aprendí de ustedes me hizo crecer como ser humano.



Resumen

La Reserva de la Biosfera de Río Lagartos se localiza en los municipios de San Felipe, Río Lagartos, Las Coloradas y El Cuyo, en el estado de Yucatán, junto al litoral del Golfo de México. Cuenta con una superficie total 60.347 hectáreas en los que se reproducen más de 250 especies de aves acuáticas. Río Lagartos es una localidad costera colindante con la reserva, existen cuatro comunidades humanas dentro del área protegida con un promedio de habitantes por comunidad entre 800 y 2500 personas, cuyas actividades económicas predominantes son el turismo y la pesca. Analizando datos de la estación meteorológica automática (EMA) presente en área, la base de datos de reanálisis del Centro europeo para pronósticos meteorológicos de mediano alcance (ECMWF) y la base de datos nacional de radiación solar (NSRDB) se realiza una climatología de la región, de las variables rapidez del viento, temperatura ambiente promedio, radiación solar y nubosidad, para determinar si existe el potencial energético suficiente para implementar un sistema multigeneración solar-eólico con tecnología de concentración de energía solar (CSP), específicamente la torre de energía solar (SPT) por su eficiencia, en complemento con un sistema de energía térmica eólica (WTES), que funciona con la energía cinética rotacional en el viento generada de la turbina eólica mediante el generador de calor por inducción electromagnética. La tecnología WTES permite una baja velocidad de rotación de las cuchillas debido al generador de calor, esto lleva a bajo ruido y baja vibración. Este sistema es posible dado que muchas partes de los elementos de almacenamiento y generación de energía se pueden compartir.



Tabla de contenido

1	Introducción	11
1.1	Energía solar concentrada	16
1.1.1	Tecnologías para concentrar energía solar (CSP)	22
1.2	Energía térmica eólica.....	27
1.3	Tipos de aprovechamiento y métodos	32
1.4	Generador de calor	34
1.5	Generación eléctrica.....	35
1.6	Situación en México.....	37
2	Objetivos	41
3	Hipótesis.....	41
4	Metodología	41
5	Resultados	43
6	Discusión.....	63
7	Conclusiones	67
	Bibliografía	68



Índice de figuras

Figura 1 Recurso solar para tecnologías CSP (DNI en KWh/m2/año)	17
Figura 2 Demanda global de la energía.....	17
Figura 3 Irradiación solar horizontal media global (W/m2)	18
Figura 4 Irradiación solar directa en México.....	19
Figura 5 Consumo final energético por sector, 2018	20
Figura 6 Plantas de generación de calor para procesos industriales en México	21
Figura 7 Proyectos mexicanos con energía termosolar para procesos industriales.....	21
Figura 8 Demanda de calor industrial de acuerdo con nivel de temperatura	22
Figura 9 Utilización de tecnologías de acuerdo con la aplicación y temperatura.....	23
Figura 10 Varias tecnologías CSP junto con sus proporciones instaladas.....	23
Figura 11 Planta central de la torre receptora: múltiples heliostatos se mueven en dos ejes para enfocar el sol en un receptor fijo montado en la torre (imagen de fondo, planta Gemasolar, propiedad de Torresol Energy, © Torresol Energy).....	24
Figura 12 Torre de energía solar PS-10 de 10MW en Sevilla, España.....	25
Figura 13 Concentrador de platos paraboloides: sigue al sol en dos ejes (imagen de fondo, Universidad Nacional de Australia, plato de 500 m2).....	26
Figura 14 Plato parabólico para la aplicación de energía de la aldea.	27
Figura 15 Esquema de la operación Solar Two que muestra dos tanques (tibios y calientes) de almacenamiento de sal fundida del fluido de transferencia de calor del receptor (Bechtel Group International).	27
Figura 16 Configuración de energía eólica (WTES), tipo térmico especializado.....	28
Figura 17 El diagrama esquemático del sistema integrado WTES propuesto.....	29
Figura 18 Concepto básico de WTES.	30
Figura 19 Estructura del sistema de almacenamiento de energía eólica-térmica de dos tanques (WTES).....	31
Figura 20 Estructura del modelo de sistema WTES propuesto.....	31
Figura 21 Descripción general de los conceptos de WTES para el suministro de calor y electricidad.	32
Figura 22 Principio de generador de calor.....	35
Figura 23 Representación esquemática de los componentes de un sistema de energía solar térmica.	36
Figura 24 Producción de energía primaria, 2018.	38
Figura 25 Distribución de la capacidad instalada nacional del servicio público por región y por tecnología, 2014.....	39
Figura 26 Área de estudio que comprenden las series temporales analizadas, cada punto es un conjunto de valores representativos a un área; los puntos azules representan las series de datos de ERA5, los puntos verdes representan las series de datos correspondientes al NSRDB y el punto rojo representa a la EMA. En la parte superior se representa la macro localización en la península donde se observan los puntos del ERA5 y la EMA.	44
Figura 27 Radiación solar promedio horario en superficie, los datos interpolados de NSRBD tienen una media de 243.0096 Wh/m ² , los datos de la estación meteorológica tienen una media de 209.9567 Wh/m ²	45



Figura 28 Radiación solar promedio mensual en superficie, los datos interpolados de NSRDB presenta una media de 5449.382 Wh/m²/día; los datos de la estación meteorológica una media de 5039.432 Wh/m²/día..... 46

Figura 29 Rapidez de viento promedio horario, la línea azul datos del ERA5 cuya media es 2.23 m/s, la línea roja de la estación meteorológica con media 3.06 m/s y la línea verde de NSRDB con media de 2.17 m/s. 48

Figura 30 Rapidez de viento promedio mensual, la línea azul datos del ERA5 cuya media es 2.23 m/s, la línea roja de la estación meteorológica con media 3.06 m/s y la línea verde de NSRDB con media de 2.17 m/s. 49

Figura 31 Nubosidad horaria, el valor la media por hora es 46.19%, la línea roja es la media y la línea verde su desviación estándar que es de 4.25%..... 50

Figura 32 Nubosidad mensual, la media tiene un valor de 46.17%, la línea verde representa la media y la línea verde la desviación estándar que es de 8.33%. 51

Figura 33 Temperatura promedio por hora, la media de ERA5 es 25.96 °C, media de la EMA es 25.72°C. 52

Figura 34 Temperatura promedio mensual a 2 m, en los datos de ERA5 la media es 25.96 °C, la media de la EMA es de 25.72 °C..... 53

Figura 35 La gráfica de radiación solar promedio en superficie con los datos de NSRDB la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 6043.25 Wh/m²/día, la línea roja representa los valores del cuadro 2 teniendo media de 5926.33 Wh/m²/día, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 5935.87 Wh/m²/día, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 5496.82 Wh/m²/día, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 5433.98 Wh/m²/día, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo valores de 5437.867 Wh/m²/día. 54

Figura 36 La gráfica de rapidez de viento promedio a 10 m de altura con los datos ERA5 donde la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 3.47 m/s, la línea roja representa los valores del cuadro 2 teniendo media de 3.34 m/s, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 3.27 m/s, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 2.21 m/s, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 2.11 m/s, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo media de 2.08 m/s. 55

Figura 37 La gráfica de rapidez de viento promedio a 10 m de altura con los datos NSRDB donde la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 2.21 m/s, la línea roja representa los valores del cuadro 2 teniendo media de 2.23 m/s, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 2.14 m/s, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 2.02 m/s, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 2.04 m/s, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo media de 1.97 m/s. 56

Figura 38 La gráfica de porcentaje de nubosidad con los datos ERA5 donde la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 44.64%, la línea roja representa los valores del cuadro 2 teniendo media de 43.87%, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 45.29%, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 47.48%, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 47.77%, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo media de 48.15%..... 58

Figura 39 La gráfica de temperatura a 2 metros promedio mensual con los datos ERA5 donde la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 25.76 °C, la línea roja representa



los valores del cuadro 2 teniendo media de 25.70 °C, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 25.80 °C, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 25.97 °C, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 25.83 °C, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo media de 25.81 °C..... 60

Índice de tablas

Tabla 1 DNI de datos de reanálisis.	54
Tabla 2 Rapidez de viento de datos de reanálisis.	57
Tabla 3 Diferencias entre datos de rapidez de viento de reanálisis.	57
Tabla 4 Nubosidad porcentual de datos de reanálisis.	58
Tabla 5 Temperatura a 2m de datos de reanálisis.	60
Tabla 6 Resumen de variables de reanálisis por cuadro.	61
Tabla 7 Resumen de variables de reanálisis toda el área.	62

Índice de abreviaturas

- WEC: convertidores de energía eólica.
- CSP: concentración de energía solar.
- PV: energía solar fotovoltaica.
- DNI: el factor de irradiación normal directo.
- SPT: torre de energía solar.
- SPD: sistema de plato parabólico solar.
- PTC: colector solar de cilindro parabólico.
- WTES: Sistema de energía térmica eólica.
- HTF: fluido de transferencia de calor
- TES: almacenamiento de energía térmica.



1 Introducción

Actualmente, gran parte de la energía del mundo se deriva de los combustibles fósiles, que son recursos perecederos. El agotamiento de los combustibles fósiles y el calentamiento global, debido a gases de efecto invernadero, son las dos preocupaciones más importantes para la sostenibilidad de los sistemas de energía en el futuro. La demanda de energía ha aumentado constantemente a pesar de la limitada disponibilidad de recursos de combustible no renovable. Las necesidades básicas como la calefacción, la electricidad y el transporte dependen en gran medida de la energía suministrada por los combustibles fósiles. La quema de combustibles fósiles provoca la emisión de gases que contaminan el medio ambiente y crean el calentamiento global. El crecimiento de la demanda energética mundial provoca un aumento de las emisiones de dióxido de carbono. Un número significativo de problemas ambientales se debe al uso de combustibles fósiles en los edificios. Se estima que el 32% del suministro mundial de energía se utiliza en edificios, incluido el 8% en edificios comerciales y el 24% en el sector residencial.

Las preocupaciones ambientales recaen o se relacionan con la producción, transformación y uso de energía. Existen varias formas de energía renovable, como la energía hidroeléctrica, la energía eólica, la energía solar, la energía geotérmica y la energía de biomasa. La baja eficiencia de un solo sistema basado en energía renovable puede mejorarse mediante la integración de la energía geotérmica y solar. Por ello los sistemas multigeneración con la combinación de dos fuentes de energía renovable pueden aumentar la eficiencia general de una planta convencional hasta en un 70% al proporcionar productos útiles como refrigeración, calefacción (y agua caliente), la generación de múltiples productos puede hacerse posible mediante la integración de diferentes sistemas. Por ejemplo, el calor rechazado durante la condensación del vapor expandido en una planta de energía puede calentar el agua de mar a una temperatura requerida para la desalinización térmica, otro ejemplo es la refrigeración urbana al integrar un proceso de enfriamiento por absorción con el ciclo Rankine para obtener el calor para el enfriamiento por absorción, así como para condensar el vapor desde la salida de la turbina hasta la forma de líquido saturado para repetir el ciclo de generación de energía.

La Tierra recibe aproximadamente 1366 W/m^2 de energía del sol y de esto solo el 60% llega a la superficie de la Tierra. La energía que recibe la Tierra del sol en 1 día puede satisfacer las necesidades energéticas de todo el mundo durante más de 20 años, ya que la velocidad de la energía solar que cayó a la superficie de la Tierra es de 120×10^5 vatios. Aprovechar menos del 1% de este potencial térmico solar disponible es suficiente para estabilizar el clima mundial en virtud de una reducción significativa de las emisiones de carbono.

El potencial de la energía solar lo hace favorable de varias maneras, tales como:

- Dado que las regiones tropicales y subtropicales reciben enormes cantidades de radiación solar, la energía solar es muy adecuada para generar electricidad en estas regiones.
- La aceptación social de la energía solar aumentó en los últimos años.



- La generación de electricidad con energía solar es relativamente asequible y es adecuada para las regiones rurales y urbanas.

La eficiencia de las células fotovoltaicas de silicio disponibles en el mercado sigue siendo baja (10-20%). Por un lado, la energía fotónica en la luz solar de longitud de onda más larga (espectro infrarrojo) es más baja que el intervalo de banda del silicio, y no puede excitar electrones en la célula; por lo tanto, se convierte completamente en calor disipado. Por otro lado, la luz solar en la longitud de onda más corta (espectro visible y ultravioleta) solo puede convertirse parcialmente en electricidad debido a los efectos fotoeléctricos subyacentes.

Las tecnologías de concentración de energía solar (CSP, por sus siglas en inglés) son un aspecto de las tecnologías de energía renovable que ayudan a resolver los desafíos ambientales del mundo en materia de combustibles fósiles en el sector de energía y energización eléctrica. Las tecnologías incluyen los concentradores parabólicos, los reflectores lineales de Fresnel, la torre solar y los concentradores parabólicos; que, junto con las tecnologías de la chimenea solar y la energía solar fotovoltaica (PV) generalmente forman las tecnologías de la energía solar térmica. Son capaces de convertir la energía solar (radiación solar) en energía térmica para la generación de electricidad utilizando los bloques de potencia adecuados.

El almacenamiento de energía eléctrica se considera un elemento clave para la integración de energías renovables variables (vRES) para abordar la volatilidad de vRES, para utilizar el exceso de energía y para equilibrar la oferta y la demanda para mantener un suministro de energía seguro, ya que este es el principal problema de este tipo de energía. Sin embargo, las nuevas tecnologías de almacenamiento enfrentan limitaciones tecnológicas o económicas y aún no están disponibles en el rango TWh requerido. Las soluciones de almacenamiento de energía eléctrica a gran escala, como el almacenamiento hidráulico por bombeo enfrentan limitaciones en el potencial físico. Una segunda opción importante es la optimización de la mezcla de capacidad de viento y energía solar fotovoltaica. La optimización de sus acciones permite explotar los patrones de producción complementarios de la energía eólica y solar fotovoltaica en diferentes escalas de tiempo. Se ha identificado una tercera opción para la integración de vRES en los convertidores de energía eólica (WEC) tecnológicamente avanzados y los sistemas solares fotovoltaicos, la cual se describe en el siguiente párrafo.

La CSP atrae la atención debido a su capacidad de envío. Algunas plantas pueden operar con generación de energía continua las 24 horas del día. La energía solar aprovechada durante el día debe almacenarse (térmica o eléctricamente) para su utilización durante la noche. La utilización de unidades de almacenamiento de energía generalmente resulta en un aumento de los costos de inversión y mantenimiento y, por lo tanto, en un aumento del costo nivelado de la electricidad generada. Actualmente, el almacenamiento de energía térmica ya es el segundo sistema de almacenamiento de energía más grande en los EE. UU. después de la energía hidráulica. Cuando se requieren temperaturas más altas, se utilizan colectores solares concentrados. La energía solar que cae sobre una gran superficie reflectante se refleja en un área más pequeña antes de que se convierta en calor. Esto se hace para que la superficie que absorba la energía concentrada sea más pequeña que la superficie que captura la energía y,

como resultado, pueda alcanzar temperaturas más altas antes de la pérdida de calor debido a la radiación.

Las plantas de energía solar parabólica y torre solar son ejemplos de tecnologías comerciales de CSP, sus colectores cilindro parabólicos ofrecen la última y más avanzada tecnología. En las plantas de energía solar cilindro parabólica, se utilizan grandes campos de colectores cilindro parabólicos, un sistema de generación de vapor/fluido de transferencia de calor (HTF), un ciclo de turbina/generador de vapor Rankine y sistemas opcionales de almacenamiento térmico y/o de respaldo de combustibles fósiles se utilizan en plantas de energía solar cilindro parabólica. La temperatura de funcionamiento está restringida por la estabilidad del aceite, que se limita a 400 °C. La generación directa de vapor se diseñó y mejoró para generar vapor sobrecalentado, por lo que es de vital importancia aumentar la temperatura y la presión para una mayor eficiencia. Este tipo de plantas solares de colectores cilindro parabólicos se vuelven económicamente factibles cuando se encuentra el tamaño óptimo para una salida eléctrica dada. Un colector solar de cilindro parabólico (PTC) recibe la energía solar radiante para convertirla en energía térmica en el HTF, que circula a través del campo solar.

La capacidad instalada global de los sistemas de energía eólica se ha incrementado significativamente entre los años 2000 al 2015. La capacidad instalada alcanzó los 432,419 MW en 2015, en comparación con los 17,400 MW en 2000, un aumento general de 2485.2 %. Esto contrasta con un aumento de sólo el 17% en la capacidad instalada en el año 2015 en comparación con 2014, es decir, de 369,695 MW en 2014 a 432,419 MW en 2015 (Global Wind Statistics, 2016). La energía eólica (en tierra y en alta mar) actualmente contribuye a casi el 24% de la capacidad global instalada de energía renovable.

Existen varios estudios previos que sirven como base de la propuesta que se hará más adelante. En seguida se mencionan algunos de ellos.

En el 2015 Ozlu propuso un sistema donde la energía solar se utiliza para producir electricidad, agua de calefacción doméstica, refrigeración e hidrógeno con un aerogenerador para alimentar el sistema y medir los efectos. El sistema utilizó un ciclo Rankine, un enfriador de absorción y un electrolizador, este sistema tiene un 43% de eficiencia energética máxima y un 65% de eficiencia de energía máxima. La potencia máxima de la turbina es de 48 kW, mientras que el efecto de enfriamiento es de 28 kW y el efecto de calefacción es de 298.5 kW, el sistema ahorra 1614 toneladas anuales de CO₂ y es capaz de suministrar al menos 49 viviendas (Ozlu, 2015).

Ese mismo año Okazaki introdujo un trabajo conceptual para la energía eólica utilizando la conversión de energía térmica directa y TES llamado almacenamiento de energía térmica eólica (WTES). La energía térmica se produce a partir de la energía cinética rotacional en el viento completamente en la parte superior de la torre de la turbina eólica mediante el generador de calor por inducción electromagnética con un tipo de freno eléctrico modesto y ligero. La parte restante del acuerdo es similar a la tecnología CSP en la estructura. Analizó plantas térmicas de tipo respaldo o con sistema de almacenamiento de energía, que son esenciales cuando se introduce una cantidad considerable de energía eólica en la red. En su



estudio comparó por primera vez los costos de energía del viento con respaldo térmico, el viento con almacenamiento de energía de la batería y el Sistema de energía térmica eólica (WTES), que emplea un generador de calor y un sistema de almacenamiento de energía térmica. WTES se vuelve mucho más atractivo cuando se construye además de la CSP y/o la planta de biomasa, ya que muchas partes de los elementos se pueden compartir. El empleo del generador eléctrico y de calor permite una operación flexible. Incluso puede absorber el excedente de energía en la red. El empleo del generador de calor superconductor produce una alta temperatura de trabajo, es decir, una alta eficiencia de conversión térmica a eléctrica (Okazaki, 2015).

Para 2016 Ozlu estudió un sistema completamente alimentado por energía solar. Los resultados del sistema son calefacción, refrigeración, electricidad e hidrógeno. Optó por utilizar un ciclo de Kalina para obtener electricidad debido a su alta eficiencia. Este sistema tiene una eficiencia energética máxima del 58% y una eficiencia de energía máxima del 36%, es capaz de suministrar al menos 94 viviendas. La carga de calentamiento máxima obtenida del sistema es de 153 kW, y la salida de la carga de enfriamiento máxima es de 128 kW. La producción máxima total de turbinas es de 92 kW, el ahorro de CO₂ es de 1398 toneladas por año. Lo que se demuestra que es posible mantener un edificio o comunidad con productos como electricidad, calefacción, refrigeración e hidrógeno utilizando ese sistema. Se llevaron a cabo análisis de energía y exergía, así como también optimización para evaluar el rendimiento del sistema para diferentes objetivos, como el rendimiento máximo, la eficiencia máxima, el costo mínimo y la cantidad máxima de CO₂ ahorrada. (Ozlu, 2016).

Ahmadi revisó varios estudios relacionados con la energía solar, comparó varias plantas de energía solar térmica. Concluyó que el concentrador parabólico es más eficiente en comparación con los reflectores lineales de Fresnel; sin embargo, requieren más costos de inversión. Introdujo otros métodos para obtener mayor energía del sol, como la aplicación de un concentrador parabólico que son dispositivos enfocados en un solo punto y se utilizaron para aplicaciones de alta temperatura. Además de las plantas de energía solar térmica, la energía solar se puede convertir directamente en electricidad utilizando módulos fotovoltaicos. Existen varios tipos de módulos fotovoltaicos y se clasifican en función de sus materiales semiconductores. La primera generación de módulos fotovoltaicos tiene una mayor participación en el mercado y en la eficiencia. Se compararon los sistemas fotovoltaicos y las plantas de CSP. Sobre la base del análisis de costos realizado para las plantas de energía fotovoltaica y CSP, se concluyó que el costo de inversión inicial de las plantas de energía CSP es mayor en comparación con las plantas fotovoltaicas. Sin embargo, los rendimientos económicos de las plantas de CSP son mejores en comparación con las plantas de energía fotovoltaica. El mayor costo de mantenimiento de las plantas de CSP se debe a su mecanismo más complicado. Los sistemas fotovoltaicos son más aplicables para la generación de energía a pequeña escala y tienen una mayor producción de electricidad en comparación con las plantas de CSP en la misma área de instalación. Sin embargo, las plantas de CSP tienen algunas ventajas, como un mejor rendimiento económico y una menor emisión de CO₂ (Ahmadi, 2018).

En el 2019 Sezer consideró un campo de heliostato de 1 km² concentra la luz solar en un divisor de espectro, donde el espectro de luz se separa en dos porciones según se refleja y se



transmite para ser utilizado como fuente de energía en la CSP y receptores fotovoltaicos concentrados (CPV), respectivamente. La energía eólica se propuso para generar electricidad (146 MW) o energía térmica (138 MW) para compensar la necesidad de energía cuando no hay suficiente energía solar. Además, múltiples productos, como 46 MW de electricidad, 12 m³/h de agua desalada y 69 MW de refrigeración, se generan utilizando un ciclo de Rankine y rechazan el calor de su condensador. El calor generado en las células CPV se recupera para una eficiente conversión fotovoltaica, y se utiliza para calefacción de espacios (34 MW) y producción de hidrógeno (239 kg/h). Los resultados del análisis de energía y exergía verificaron que el sistema propuesto puede funcionar para generar múltiples productos útiles de manera continua. Las eficiencias de energía y exergía del sistema general se calculan como 61.3% y 47.8%, respectivamente (Sezer, 2019).

Garrison analizó un sistema de energía integrado que contiene una estructura de energía eólica y solar integrada con dos técnicas de almacenamiento para tener al mismo tiempo recursos eólicos y solares despachables a través de la mayor demanda. De esta manera, pueden estar disponibles por períodos de tiempo más largos. Su sistema utilizaba el almacenamiento de energía de aire comprimido que se proporciona a partir de la energía eólica y el almacenamiento térmico proporcionado por la concentración de energía solar térmica para obtener energía segura de fuentes intermitentes y renovables. (Garrison, 2011)

Husband y Beyene realizaron un estudio sobre la viabilidad de un ciclo de Rankine impulsado por calor inferior para generar electricidad utilizando un expansor de desplazamiento, un poco de toxicidad, poca inflamabilidad y un fluido de trabajo neutro en ozono. Un examen de rentabilidad de la aplicación sugerida mostró las opciones de viabilidad para la producción de energía solar, aproximadamente 1/3 del costo de un sistema fotovoltaico similar. (Husband, 2008)

Sahin y col. realizaron análisis termodinámicos de un sistema de energía eólica. Se dice que los cambios típicos entre los rendimientos de energía y exergía son de aproximadamente el 40% a bajas velocidades del viento y hasta aproximadamente el 55% a altas velocidades del viento. (Şahin, 2006)

Al acoplar el almacenamiento de energía térmica (TES) con un generador de calor por viento de inducción electromagnética, la energía térmica podría mantenerse para su uso futuro para activar una turbina de vapor con el fin de generar energía eléctrica.

Karasu analizó termodinámicamente el sistema integrado de unidades de almacenamiento de energía térmica y calentamiento por inducción de turbinas eólicas, generando electricidad mediante el ciclo convencional de Rankine y el uso del calor almacenado en los tanques. El calentamiento por inducción puede incorporarse a las góndolas de la turbina eólica para calentar el fluido de transferencia de calor (sal fundida), que circula en el ciclo TES. Como resultado de esto, el sistema puede funcionar continuamente almacenando la energía eólica en forma de energía térmica utilizando tanques de almacenamiento de energía térmica y sal fundida. (Karasu, 2018)



1.1 Energía solar concentrada

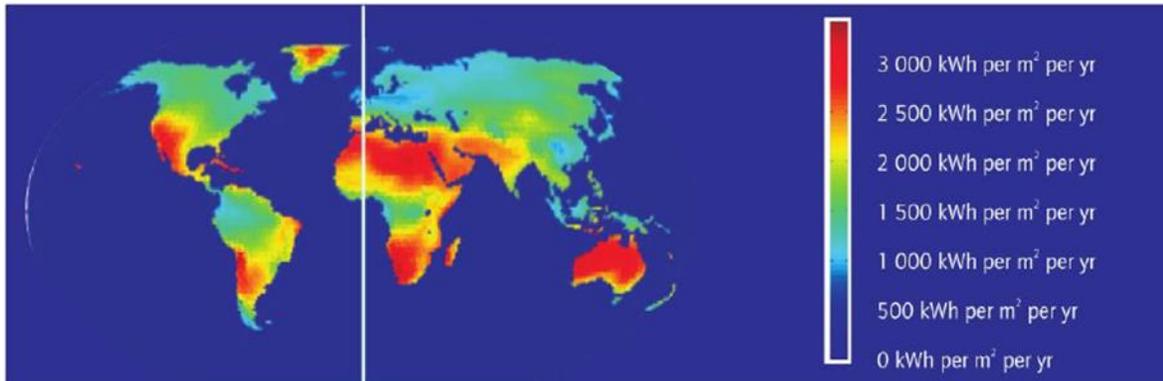
Los sistemas CSP utilizan combinaciones de espejos o lentes para concentrar la radiación solar de haz directo para producir formas de energía útil como calor, electricidad o combustibles mediante diversas tecnologías. La "concentración de energía solar" a menudo se usa como sinónimo de "concentración de energía solar térmica" o "termosolares". El calor se transmite a un fluido de trabajo para elevar su temperatura y utilizarlo en una diversidad de aplicaciones y servicios. El corazón de un sistema CSP es su mecanismo para concentrar la radiación solar a intensidades más altas.

La tecnología termosolar se usa ampliamente en todas las regiones del mundo para proporcionar agua caliente, calentar o enfriar espacios, secado de productos y dar calor, vapor o refrigeración para procesos industriales o comida.

Los sistemas CSP capturan el componente de haz directo de la radiación solar. A diferencia de las placas PV planas, no pueden utilizar la radiación que ha sido difundida por nubes o polvo u otros factores. Esto los hace más adecuados para áreas con un alto porcentaje de días de cielo despejado, en lugares que no tienen smog o polvo. La tecnología CSP se utiliza para la generación de electricidad, en este sentido cobra relevancia el factor de irradiación normal directo (DNI, por sus siglas en inglés), es la cantidad de radiación solar recibida por unidad de área por una superficie que siempre se mantiene perpendicular (o normal) a los rayos que vienen en línea recta desde la dirección del sol en su posición actual en el cielo, que corresponde a la energía que se recibe en la superficie perpendicular a los rayos del sol.

Las regiones con una DNI adecuada para la operación de plantas de concentradores solares de energía se encuentran típicamente en latitudes de 15° a 40° norte o sur del globo terráqueo. La DNI es significativamente mejor en latitudes altas, donde la absorción y la dispersión de la luz solar son mucho más bajos.

Las ubicaciones potenciales para las plantas de CSP en todo el mundo generalmente se identifican mediante el uso de la distribución global DNI, el "Cinturón del Sol", donde hay mayor radiación solar disponible del sol. Geográficamente, el cinturón es adecuado para plantas de CSP, ya que hay áreas terrestres masivas con irradiación solar extraordinaria, muy adecuadas para instalar una gran cantidad de sistemas de recolección de energía solar (Figura 1).



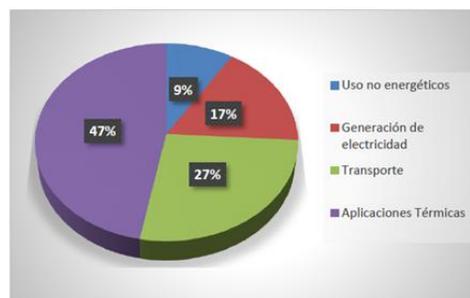
Fuente: MRT de CSP (IEA, 2010).

Figura 1 Recurso solar para tecnologías CSP (DNI en KWh/m2/año)

En general, las plantas CSP consisten en varios componentes como concentradores solares, receptores, turbinas de vapor y generadores eléctricos. Los sistemas de generación de energía CSP usan concentradores para enfocar la luz solar en un receptor que lleva un fluido de trabajo que se calienta a una temperatura alta, y este fluido calentado va a una turbina de vapor convencional que está conectada a un generador, por lo que se produce electricidad. El almacenamiento de energía térmica (es decir, el calor almacenado en un tanque) es una parte integrada de una planta de CSP, donde el calor almacenado se puede utilizar para el funcionamiento continuo de la planta de CSP durante la noche y en días nublados.

Con relación a las aplicaciones en el sector industrial, la tecnología utilizada permite alcanzar temperaturas requeridas por los procesos industriales que van de 60 a 280 °C, y hasta 400 °C para los sistemas de generación de electricidad.

De acuerdo con el reporte del estado global de las energías renovables REN21 (REN21, 2017) en el año 2016 se adicionaron 110MW de capacidad de CSP, con lo que capacidad instalada de esta tecnología a nivel mundial alcanzó los 4.8 GW. El crecimiento en el año 2018 representó el incremento más bajo de capacidad en los últimos 10 años con solamente un 2%.



Fuente: Elaborado a partir de datos de la IEA (IEA, 2010).

Figura 2 Demanda global de la energía

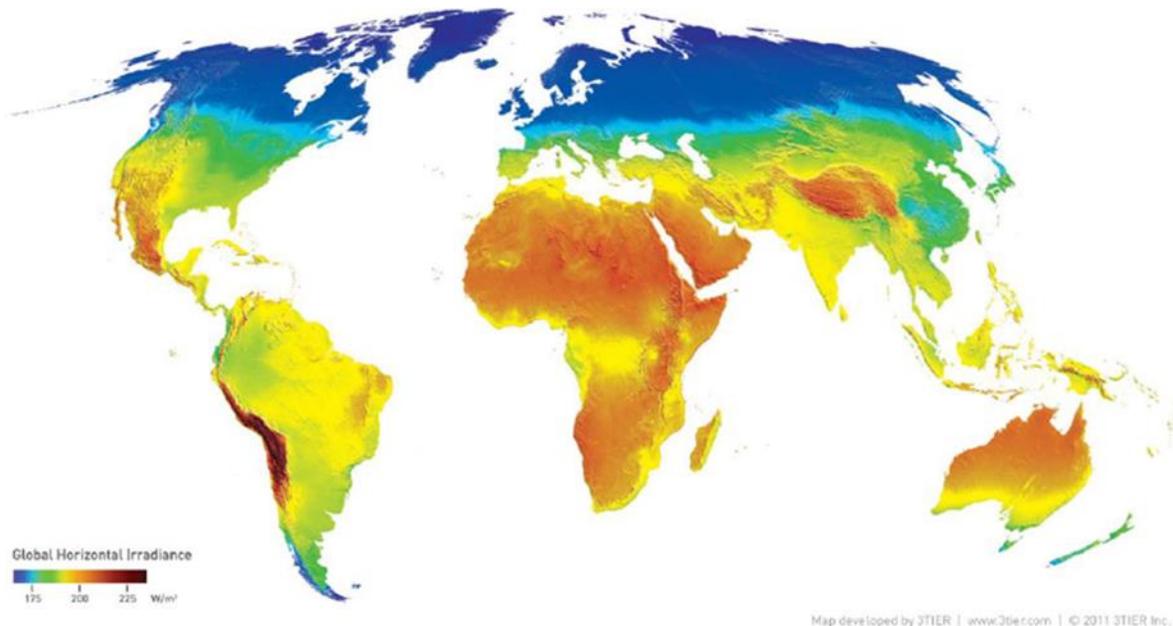
La radiación del Sol (radiación solar de onda corta) se refleja parcialmente en el espacio por las nubes y las partículas de la atmósfera (aerosoles) y parte de ella se absorbe. El resto incide en la superficie de la Tierra, donde parte de él se refleja.



Algunos países en donde menos radiación de energía solar hay es en donde actualmente más se está usando la energía solar. Alemania, recibe menos de 150 W/m² de energía solar mientras que en el área de Rio Lagartos encontramos 209.9763 W/m² promedio anual.

Ninguna ciudad europea supera a México en potencial solar. La capacidad instalada para producir electricidad a partir de energía solar de los alemanes es, por ejemplo, miles de veces más que la que tiene México, siendo un país con un territorio 72% más pequeño que el nuestro, su capacidad de producción eléctrica a partir del Sol equivale a una sexta parte de toda nuestra capacidad de generación eléctrica instalada.

Por lo general, puede maximizar la cantidad de irradiancia que recibe anualmente una superficie manteniéndola normal a la radiación entrante. Esta cantidad es de especial interés para las instalaciones solares térmicas de concentración e instalaciones que rastrean la posición del sol.



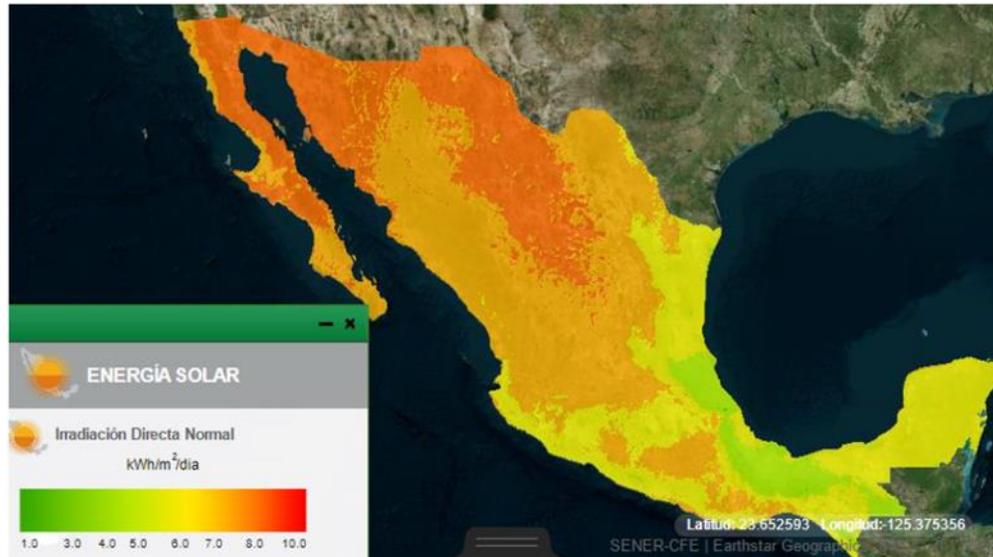
Fuente: <https://www.3tier.com/en/>

Figura 3 Irradiación solar horizontal media global (W/m²)

Los CSP requieren para su operación abundante DNI para generar electricidad dado que solo este tipo de radiación puede ser concentrada y con ello lograr las temperaturas requeridas para la generación de electricidad.

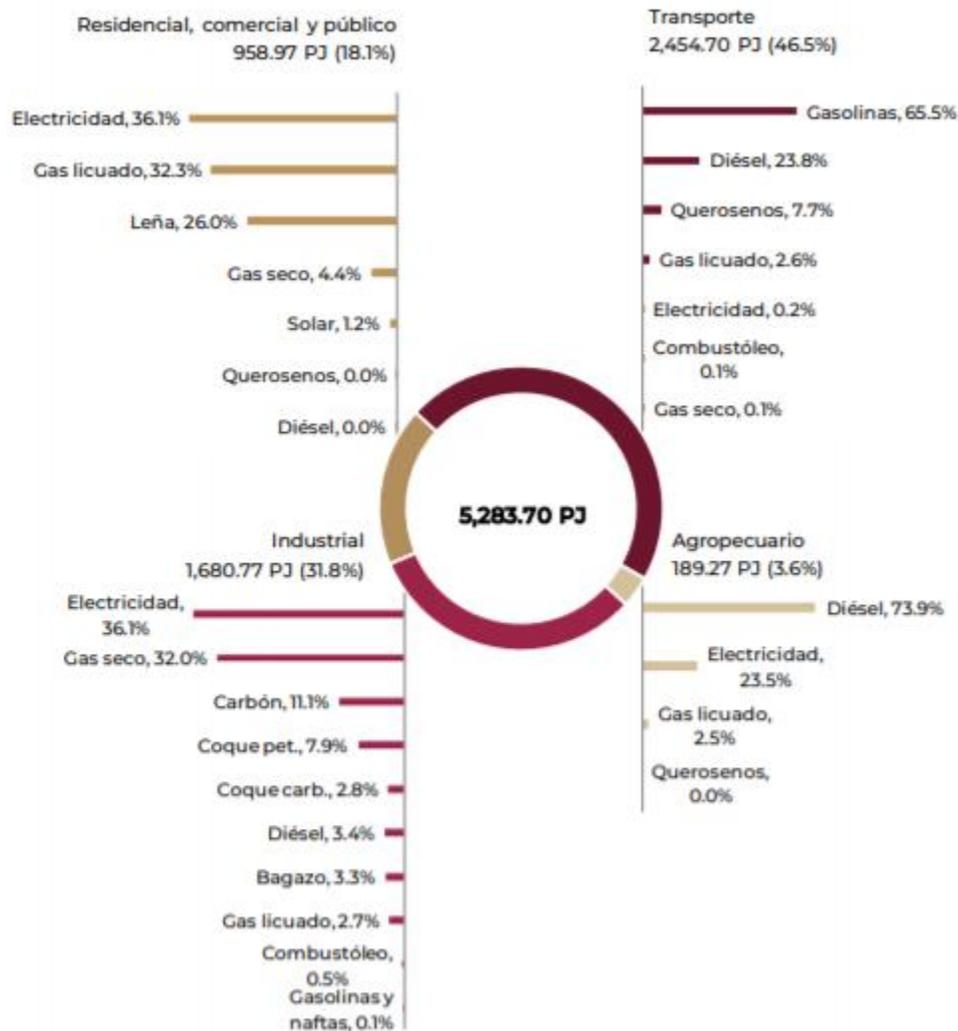
Se ha comprobado que esta tecnología es actualmente factible económicamente en regiones con niveles de DNI por encima de 2,000 kWh/m²/año; sin embargo, no hay ninguna razón técnica por la que las plantas con CSP no puedan trabajar con niveles de DNI inferiores. Varios autores plantean que las regiones con una DNI promedio de más de 1,750 kWh/m²/año en las que se focalizan la construcción de las centrales termosolares.

Debido a que México se localiza geográficamente entre los 14° y 33° de latitud septentrional, es un sitio ideal para el aprovechamiento de la energía solar, pues la irradiación global media diaria en el territorio, es de alrededor de 5.5 KWh/m²/d, siendo uno de los países con mayor potencial en el mundo.



Fuente: INERE (SENER, 2017a)
Figura 4 Irradiación solar directa en México

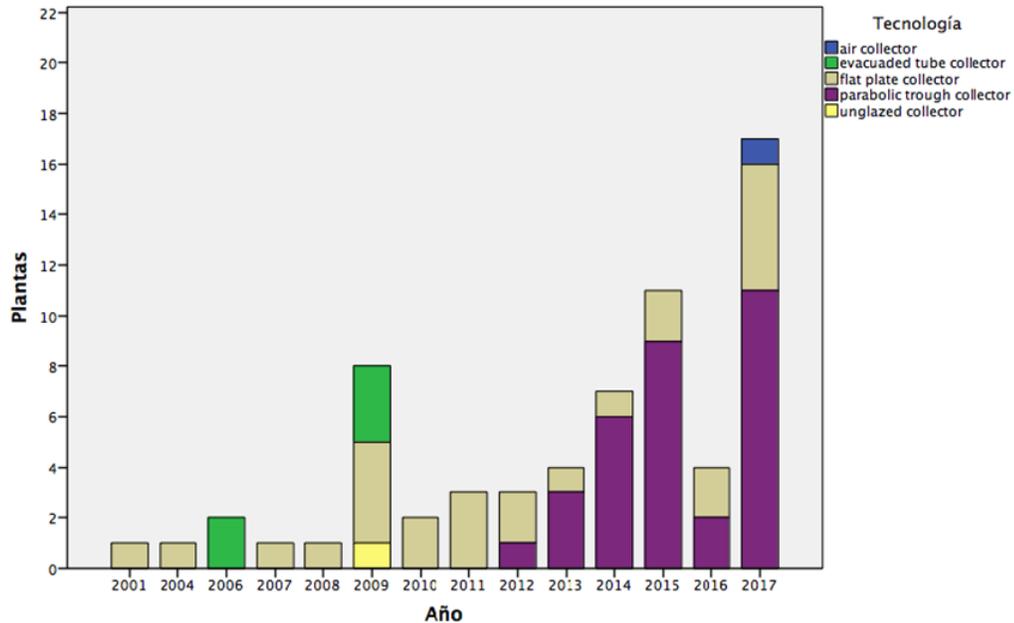
En México el sector que mayor energía consume después del transporte es el sector industrial; en la Figura 5 se puede observar que equivale a un 32% del total nacional, de acuerdo con el Balance Nacional de Energía (SENER).



Fuente: Sistema de Información Energética, SENER.

Figura 5 Consumo final energético por sector, 2018

A septiembre de 2017, México contaba con 65 proyectos de aplicaciones de calor solar en procesos industriales, con una capacidad instalada de 13.7 MW y una superficie de 22,353 m².



Fuente: Construida a partir de datos consultados en Solar Thermal Plants Database (SHIP-PLANTS, 2017).

Figura 6 Plantas de generación de calor para procesos industriales en México

Actualmente existen empresas mexicanas que desarrollan y comercializan concentradores solares de canal parabólico para la generación de energía térmica entre los 50 °C y 200 °C. Estos sistemas son utilizados principalmente en el sector alimenticio.

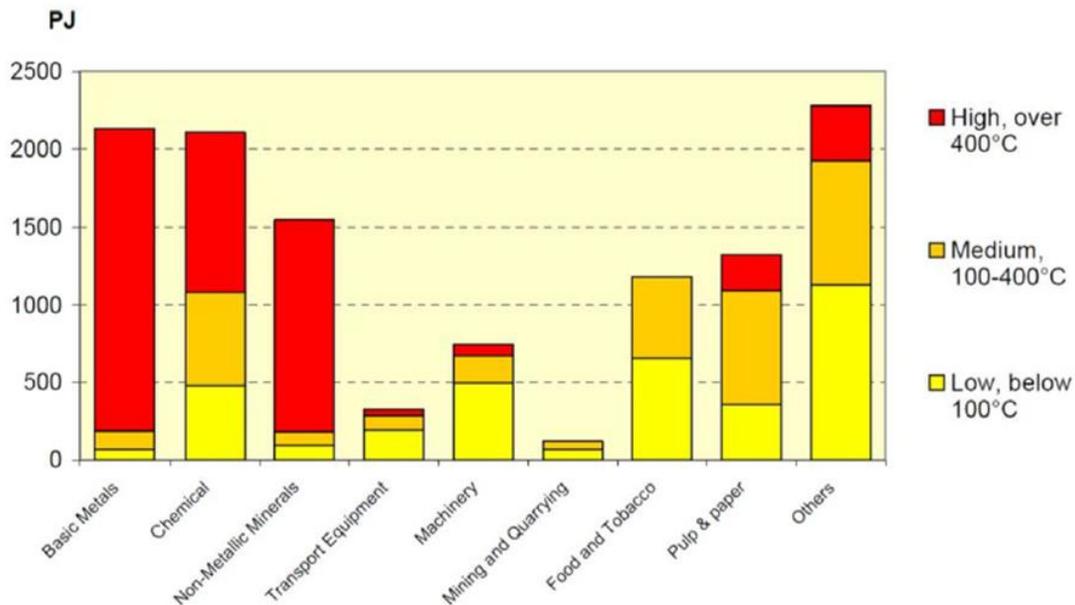


Fuente: El empleo de la energía solar térmica en México-CCEEA (CCEEA, 2017).

Figura 7 Proyectos mexicanos con energía termosolar para procesos industriales

Con relación a la generación de electricidad mediante la energía termosolar, a la fecha en México sólo se encuentra en operación la central termosolar Agua Prieta II de 14 MW, está localizada en el estado de Sonora, utiliza tecnología parabólica y está integrada a una planta de ciclo combinado, es la primer planta híbrida solar-gas en México.

La tecnología utilizada de los colectores termosolares y a las condiciones de irradiación solar del sitio donde se encuentran instalados, los dispositivos de energía termosolar obtienen diversos rangos de temperatura. La tecnología CSP es utilizada principalmente en plantas de generación de electricidad donde se logran alcanzar temperaturas superiores a los 500 °C. El rendimiento se mejora en la medida en que se incrementa o se mantienen niveles altos de temperatura, por ejemplo, en acuicultura, ganadería, acondicionamiento de biodigestores.



Fuente: El mercado del calor en Europa. (Werner, et. al., 2006)

Figura 8 Demanda de calor industrial de acuerdo con nivel de temperatura

1.1.1 Tecnologías para concentrar energía solar (CSP)

Las aplicaciones termosolares pueden ser clasificadas de acuerdo con la temperatura a la cual operan:

- Las aplicaciones de baja temperatura, es decir, menores a 100 °C, están relacionadas con tecnología de colectores planos, no cubiertos y tubos evacuados empleados principalmente para el calentamiento de agua sanitaria y de agua de albercas.
- Las aplicaciones de temperatura media (entre 100 °C y 400 °C), utilizan tecnologías de tubos evacuados, que alcanzan hasta 120 °C de temperatura y de concentradores solares para uso principalmente industrial, enfriamiento y calefacción de espacios.
- Las aplicaciones de alta temperatura (mayores a 400 °C) utilizan espejos para concentrar la energía y lograr temperaturas suficientes altas para la generación de electricidad y algunos procesos industriales.

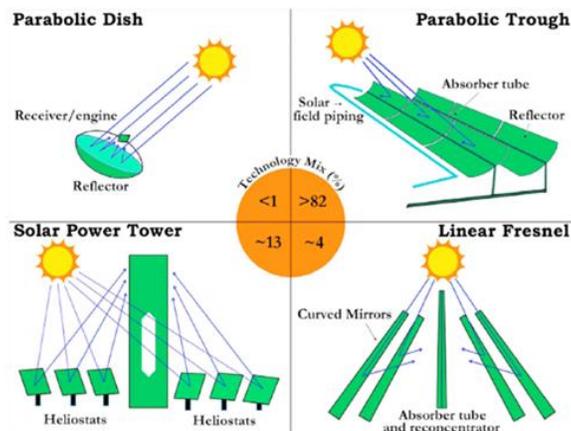


Fuente: El empleo de la energía solar térmica en México-CCEEA (CCEEA, 2017).

Figura 9 Utilización de tecnologías de acuerdo con la aplicación y temperatura

Actualmente existen cuatro familias de tecnologías CSP, las cuales la IEA categoriza de acuerdo con la forma en que enfocan los rayos solares y la tecnología utilizada para recibir la energía del sol (IEA, 2014). Las configuraciones que se utilizan comercialmente en orden de nivel de implementación son:

- Cilindro parabólico.
- Torre receptora central.
- Fresnel lineal.
- Platos parabólicos.



Fuente: A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends.

Figura 10 Varias tecnologías CSP junto con sus proporciones instaladas

Por su eficiencia se analizarán más detalladamente dos tecnologías de concentradores solares a continuación.



❖ Torre de energía solar (SPT) / receptor central

Un sistema de torre de receptor central involucra una serie de heliostatos (grandes espejos con seguimiento de dos ejes) que concentran la luz solar en un receptor fijo montado en la parte superior de una torre, como se ilustra en la figura 10. Esto permite una conversión de energía sofisticada de alta eficiencia en un único punto receptor grande. Se logran relaciones de concentración más altas en comparación con los sistemas de enfoque lineal y esto permite que los receptores térmicos funcionen a temperaturas más altas con pérdidas reducidas.

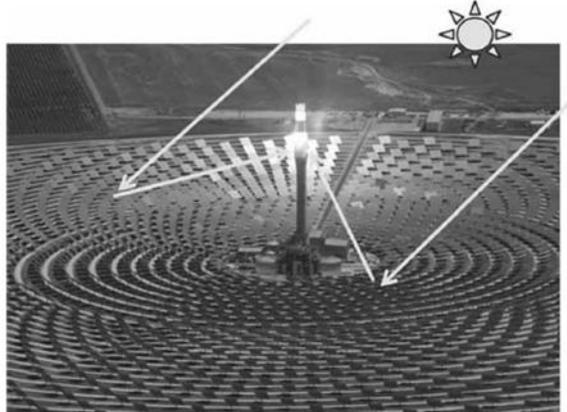


Figura 11 Planta central de la torre receptora: múltiples heliostatos se mueven en dos ejes para enfocar el sol en un receptor fijo montado en la torre (imagen de fondo, planta Gemasolar, propiedad de Torresol Energy, © Torresol Energy).

Los SPT son el sistema de generación de energía CSP que emplea grandes espejos planos para reflejar la luz solar en un receptor solar en la parte superior de la torre ubicada en el centro. Los materiales para el receptor son generalmente cerámicas o metales que son estables a temperaturas relativamente elevadas. El flujo solar promedio que incide en el receptor varía de 200 kW/m² a 1000 kW/m², lo que brinda la oportunidad de alcanzar una temperatura de trabajo alta. En el receptor, la temperatura del fluido de trabajo es lo suficientemente alta como para producir vapor, que finalmente hace girar una turbina convencional para generar electricidad. Se puede utilizar agua/vapor, sal fundida, sodio líquido o aire como fluido de trabajo en el sistema para plantas grandes con capacidad de 100 a 200 MW. Los heliostatos son la principal inversión de capital en una planta CSP de torre de energía. Estos espejos controlados por computadora se mueven para mantener un enfoque desde el amanecer hasta el anochecer.

En un SPT de vapor, el agua es impulsada al receptor donde la radiación solar concentrada calienta el agua a más de 537 °C. Una fracción del vapor supercaliente se almacena (en un tanque de almacenamiento de calor) mientras que la mayor parte del vapor se envía al bloque de alimentación para su uso posterior, como con un sistema de cilindro parabólico. Después de eso, el vapor a alta presión hace girar la turbina para producir electricidad. Si las nubes cubren la luz solar, el vapor que se almacenó previamente en el tanque se utiliza para producir electricidad hasta una hora. Por otro lado, en un SPT donde se usa sal fundida como fluido de trabajo, la sal fundida relativamente fría a 290 °C se bombea al receptor donde se calienta hasta 565 °C, y luego fluye al tanque de almacenamiento de agua caliente. La sal caliente luego fluye a través de un intercambiador de calor desde donde el calor se transfiere al agua,



produciendo vapor que hace girar un sistema convencional de turbina/generador de ciclo Rankine. El vapor agotado derivado de la turbina se condensa y luego el condensado se bombea al sistema del intercambiador de calor. Aquí la sal fundida que se ha enfriado nuevamente es calentada por el receptor solar y el proceso se repite continuamente. Finalmente, la sal fundida fluye de regreso al tanque de almacenamiento en frío. La sal caliente almacenada puede producir vapor y generar electricidad eficientemente durante horas. Para la salida continua de una turbina, los tanques de almacenamiento pueden diseñarse de manera que puedan suministrar suficiente calor como fuente de energía durante hasta 13 h. La eficiencia anual solar-eléctrica para este tipo de planta de energía varía del 20% al 35%. A diferencia de otras plantas de CSP, las plantas de torres de energía requieren un suministro considerable de agua y la mayor superficie terrestre. En general, la viabilidad económica y la rentabilidad se pueden lograr cuando la planta es capaz de producir una potencia de 50–100 MW. Existe el potencial de integrar un SPT, CSP con energía solar fotovoltaica.



Figura 12 Torre de energía solar PS-10 de 10MW en Sevilla, España.

❖ Sistema de plato parabólico solar (SPD)

Los sistemas de platos, como los canales, explotan las propiedades geométricas de una parábola, pero como un paraboloide tridimensional como se muestra en la figura 13. La radiación de haz directo reflejado se concentra en un receptor de foco puntual y en los sistemas SPD puede calentar esto a temperaturas de funcionamiento superiores a los 1000 °C, similar a los sistemas de torre.

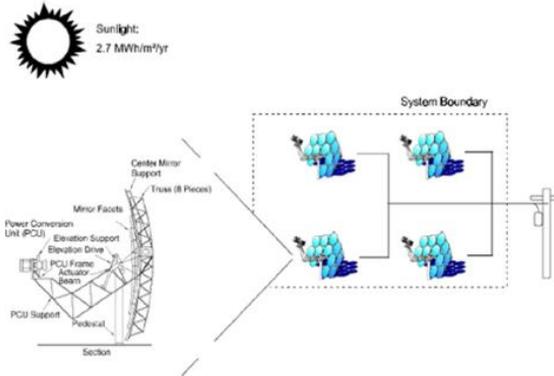
Los sistemas de plato ofrecen las eficiencias de conversión solar de mayor potencial de todas las tecnologías CSP, porque siempre presentan su apertura total directamente hacia el sol y evitan el "efecto de pérdida de coseno" que experimentan los otros enfoques.



Figura 13 Concentrador de platos paraboloïdes: sigue al sol en dos ejes (imagen de fondo, Universidad Nacional de Australia, plato de 500 m²).

En el sistema SPD-CSP, se utiliza un concentrador de foco puntual parabólico en forma de plato en un sistema que refleja la radiación solar en un receptor en el punto focal. Los concentradores se colocan en un conjunto con un sistema de seguimiento de dos ejes que sigue al sol. En el punto focal, para una conversión de potencia eficiente, se coloca un motor Stirling/Brayton con un generador eléctrico para utilizar el calor concentrado en el receptor. Con una relación de concentración de aproximadamente 2000 en el punto focal del SPD, la temperatura y la presión del fluido de trabajo generalmente alcanzan alrededor de 700–750 °C y 200 bar, respectivamente. En general, el diámetro del SPD varía de 5 a 10 m y la superficie es de 40-120 m².

Para operar un motor Stirling, la energía solar se recoge en forma de calor que fluye de una fuente caliente a un sumidero frío. La salida del ciclo de Stirling se utiliza para hacer funcionar el generador, por lo tanto, se genera energía eléctrica. La eficiencia del sistema SPD con motor Stirling varía entre 25% y 30%. La razón detrás de la eficiencia es que los espejos curvos utilizados en el sistema siempre apuntan directamente al sol, mientras que otras tecnologías como el PTC y el SPT sufren pérdidas de coseno (el área proyectada experimentará una reducción). Una de las ventajas únicas del SPD es que el sistema no necesita un terreno completamente nivelado y es fácilmente aplicable en redes aisladas remotas y pequeñas.



Fuente: A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends.

Figura 14 Plato parabólico para la aplicación de energía de la aldea.

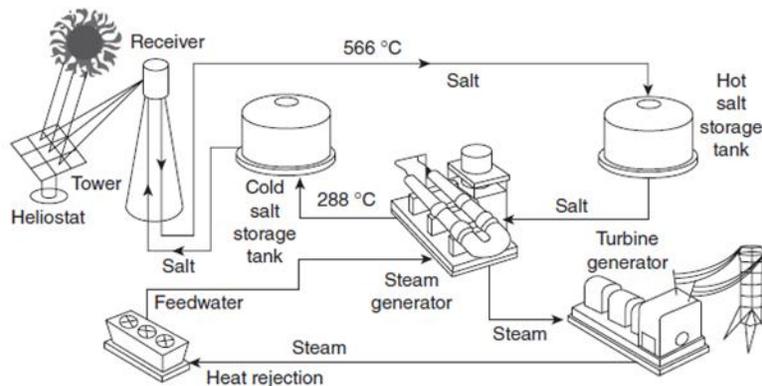


Figura 15 Esquema de la operación Solar Two que muestra dos tanques (tibios y calientes) de almacenamiento de sal fundida del fluido de transferencia de calor del receptor (Bechtel Group International).

1.2 Energía térmica eólica

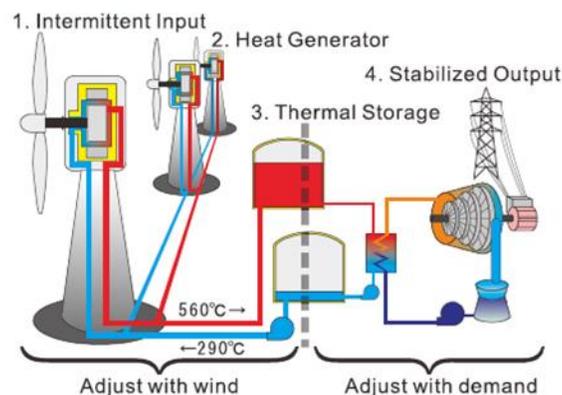
Los sistemas de energía térmica eólica (WTES, por sus siglas en inglés), se propone por primera vez, para resolver los problemas de la red, son la totalidad de todas las combinaciones concebibles que consisten en convertidores de energía eólica e instalaciones de almacenamiento de energía térmica. La novedad de estos conceptos se basa en la inclusión de la conversión in situ de la energía eólica en calor.

Debido a su capacidad para trabajar con calor de alta temperatura, WTES puede usarse potencialmente tanto para calor como para suministro de energía. Esto finalmente resulta en un espectro muy amplio de conceptos de implementación de WTES concebibles. Por ejemplo, WTES brinda la oportunidad de medidas de modernización o el desarrollo de alternativas renovables a las plantas combinadas de energía y calor (CHP) que funcionan con combustibles fósiles. En esta configuración, WTES combina las ventajas sistémicas de las plantas de energía de vapor (es decir, la masa giratoria) con el uso del viento de recursos renovables.

La energía CSP atrae la atención debido a su capacidad de envío. Algunas plantas pueden operar con generación de energía continua las 24 horas del día. El almacenamiento de energía térmica ya se convirtió en el segundo sistema de almacenamiento de energía más grande en los EE. UU. después de la energía hidráulica.

La energía eólica actual es intermitente y no se puede utilizar como fuente de energía de carga base. Okazaki estudió la energía eólica que utiliza la conversión de energía térmica directa y el almacenamiento de energía térmica denominado Sistema de energía térmica eólica (WTES). La energía térmica se genera a partir de la energía giratoria directamente en la parte superior de la torre mediante el generador de calor, que es un tipo de freno eléctrico simple y ligero. El generador de calor de luz reduce algunos problemas de la energía eólica, como el ruido y la vibración. (Okazaki, 2015)

La utilización de este almacenamiento de energía térmica y el empleo del generador de calor ligero y de bajo costo son los puntos clave de WTES. La configuración típica de WTES de "tipo térmico especializado" se muestra en la Fig. 16. La energía de rotación se convierte a la energía térmica en la parte superior de la torre directamente. El resto del sistema es el mismo que el tipo de torre CSP. La energía térmica producida se transfiere a la utilidad básica mediante el HTF y produce vapor para impulsar el generador de turbina cuando es necesario.

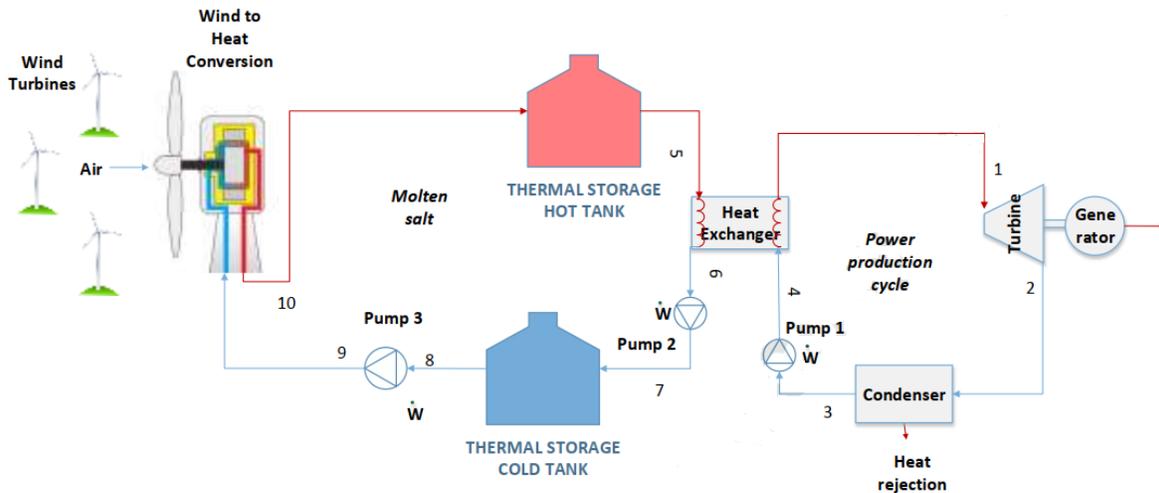


Fuente: Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage.

Figura 16 Configuración de energía eólica (WTES), tipo térmico especializado.

El sistema de almacenamiento de energía térmica eólica (WTES) consiste en generadores de calor eólico que utilizan inducción electromagnética, que se instalan en la parte superior de las torres de turbinas eólicas, circulación de sales fundidas y ciclo de almacenamiento, fluido de transferencia de vapor (agua), sistema de generación de vapor, una turbina de vapor ciclo Rankine generador y sistemas de respaldo de almacenamiento térmico.

La energía térmica producida en la parte superior de la torre se transfiere a la utilidad inferior mediante la circulación de HTF. El HTF calentado se almacena en el tanque de almacenamiento térmico y se saca de acuerdo con la demanda para producir electricidad utilizando una turbina de vapor. La sal fundida seleccionada está en estado líquido por encima de 390 °C y su punto de ebullición es de 1450 °C, 58% KF (Fluoruro de potasio), 42% ZrF4 (Tetrafluoruro de zirconio) se selecciona como el fundido para HTF y medio de almacenamiento de energía.



Fuente: Analysis and efficiency assessment of direct conversion of wind energy into heat using electromagnetic induction and thermal energy storage.

Figura 17 El diagrama esquemático del sistema integrado WTES propuesto.

Las tuberías altamente especiales realizan la circulación de la sal fundida a través del generador de calor eólico mediante inducción electromagnética, y la sal fundida se mantiene en tanques de almacenamiento mientras la demanda de electricidad es baja.

La sal fundida seleccionada se almacena a 560 °C hasta que se requiera trabajo eléctrico durante el día o la noche, independientemente del viento. A medida que se demanda energía eléctrica, la sal fundida se entrega desde el recipiente caliente a través de una unidad de intercambio de calor para producir vapor sobrecalentado, que luego ejecuta un ciclo estándar de Rankine. La pérdida de calor estimada es de aproximadamente 0.5 °C por día.

En el ciclo de Rankine, basados en la figura 17 en el punto de estado 3-4, el líquido de alta presión llega al intercambiador de calor desde la bomba-1 y el líquido se calienta hasta la temperatura de saturación. El suplemento adicional de calor induce la vaporización del agua hasta que se transforma por completo en vapor saturado (punto 1).

En el punto 1-2, en la turbina de vapor el vapor se expande, por lo tanto, genera trabajo mecánico, que convierte el trabajo mecánico en trabajo eléctrico. En el punto 2-3, la combinación vapor-líquido que sale de la turbina (punto 2), y se condensa a una presión más baja, en un condensador de superficie enfriando agua. En el punto 3-4 en la bomba-1, la presión del condensado se eleva.

Para entender mejor esto expliquemos que es la exergía, ya que mucho del aprovechamiento que se propondrá posteriormente son tecnologías que aprovechan esta propiedad termodinámica. La exergía es una medida de la disponibilidad de la energía. La idea es que parte de la energía de un sistema se puede aprovechar para realizar trabajo mecánico, eléctrico o de otro tipo. Pero existe además una limitación práctica en cuanto a que sólo se puede realizar trabajo si el sistema almacena una energía respecto al ambiente que le rodea.

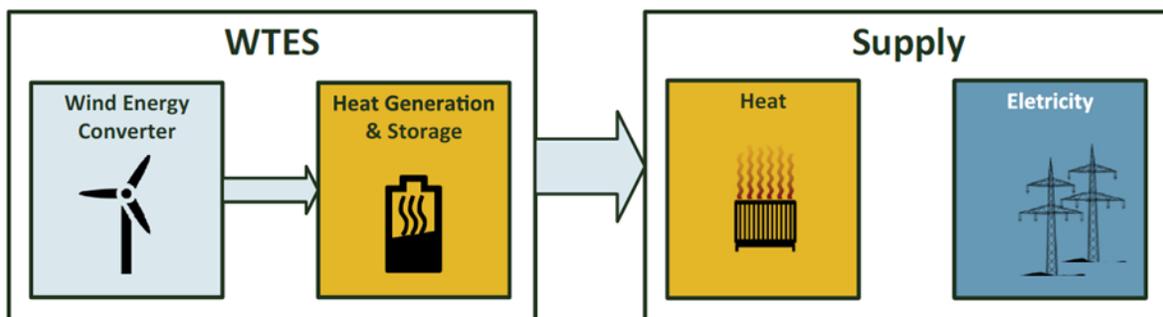
La exergía Φ de un sistema se define como la cantidad máxima de trabajo que podría realizarse útilmente mientras se equilibra el sistema (termodinámico) con su entorno.

Para WTES, el tamaño del almacenamiento es crucial ya que define posibles estrategias de operación. Por lo tanto, un dimensionamiento apropiado incluye la consideración de la temperatura y el rango de rendimiento, el medio de trabajo y los tiempos de reacción requeridos. Por ejemplo, para mantener bajas las pérdidas por reconversión eléctrica con motores térmicos (eficiencia de Carnot), el almacenamiento de energía térmica debe funcionar con calor de alta temperatura ($> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$). A esta temperatura, se puede lograr una reconversión de potencia con eficiencias de hasta el 25% mediante procesos de ciclo de rango orgánico (ORC).

Las plantas de almacenamiento de energía térmica eólica (WTES) con aplicación combinada de almacenamiento de energía de sales fundidas pueden funcionar de forma continua y pueden proporcionar energía eléctrica tanto para sistemas en red como fuera de la red.

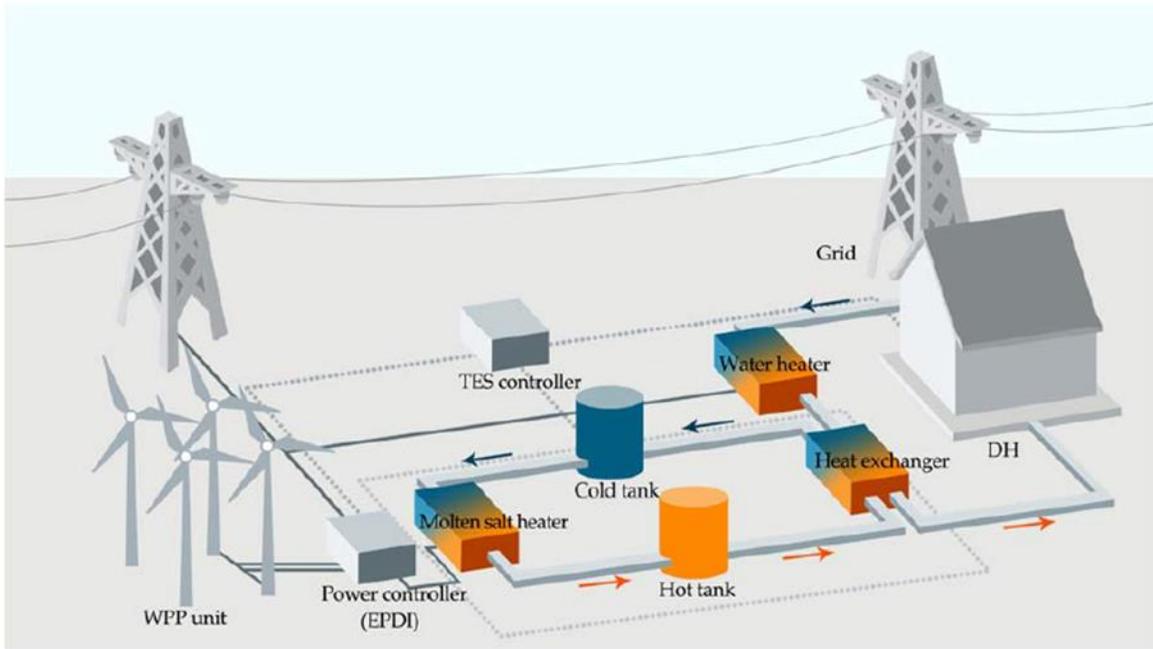
El almacenamiento de energía térmica (TES) ofrece muchos beneficios en comparación con los sistemas de almacenamiento mecánico o químico. TES generalmente tiene costos de inversión inferiores cuando se compara con otros sistemas de almacenamiento, además de sus muy altos rendimientos operativos. Las sales fundidas se consideran el HTF ideal para aplicaciones de almacenamiento térmico a temperaturas más altas.

La generación de calor en WTES se puede distinguir en conversión de energía directa e indirecta. El primero se basa principalmente en el uso de retardadores para la conversión de energía rotacional en calor dentro de una turbina eólica. Las realizaciones tecnológicas de los retardadores son, los retardadores hidrodinámicos. Debido a su amplia aplicación como frenos de camión, tienen costos y peso considerablemente menores en comparación con los generadores eléctricos. Por otro lado, los retardadores de inducción son similares a los frenos de corrientes parásitas. Los conceptos de generación indirecta de calor aún dependen de la generación de electricidad con un generador convencional y la posterior conversión en calor mediante bombas de calor o calderas eléctricas. El calor a alta temperatura se genera mediante bombas de calor eléctricas, lo que puede dar como resultado una eficiencia total del 54% para la reconversión de la electricidad.



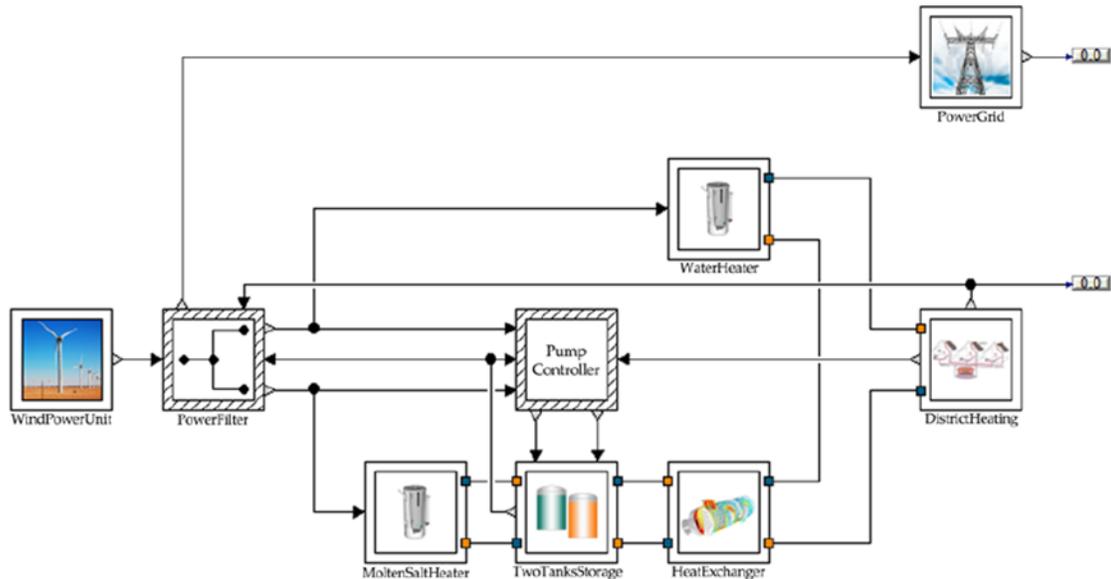
Fuente: Expanding the horizons of power-to-heat: Cost assessment for new space heating concepts with Wind Powered Thermal Energy Systems.

Figura 18 Concepto básico de WTES.



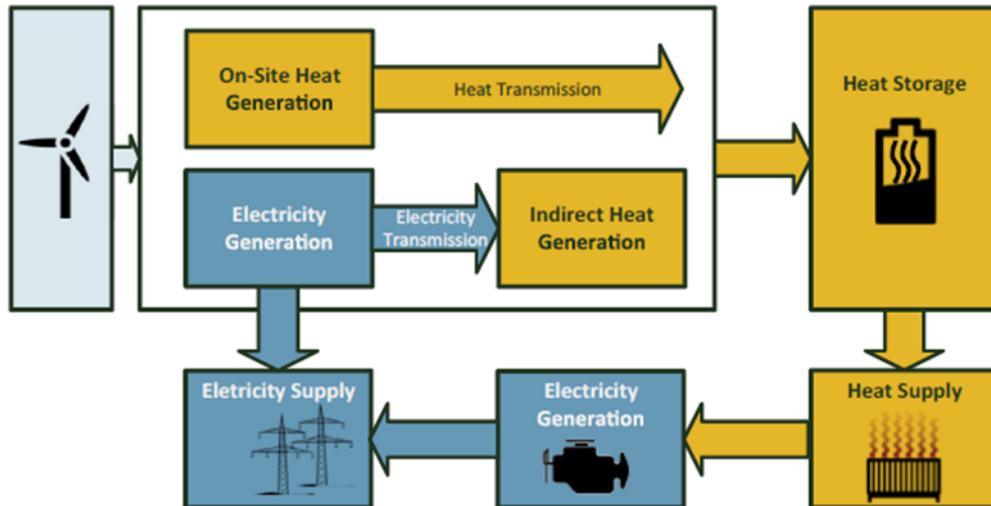
Fuente: A wind power plant with thermal energy storage for improving the utilization of wind energy.
Figura 19 Estructura del sistema de almacenamiento de energía eólica-térmica de dos tanques (WTES).

Cuando hay una demanda de suministro de calefacción, la sal fundida caliente se bombea desde el tanque de almacenamiento caliente para descargar energía térmica a través del intercambiador de calor de agua salada fundida. Después del intercambio de calor, la sal fundida enfriada vuelve a la temperatura inicial y fluye de regreso al tanque de almacenamiento en frío.



Fuente: A wind power plant with thermal energy storage for improving the utilization of wind energy.
Figura 20 Estructura del modelo de sistema WTES propuesto.

Las bombas de calor mecánicas impulsadas directamente por WEC parecen ser el concepto WTES más rentable para el suministro de calor, seguido de sistemas que utilizan bombas de calor eléctricas, bombas de calor de absorción, retardadores y calderas eléctricas, respectivamente.



Fuente: Expanding the horizons of power-to-heat: Cost assessment for new space heating concepts with Wind Powered Thermal Energy Systems.

Figura 21 Descripción general de los conceptos de WTES para el suministro de calor y electricidad.

Una unidad de almacenamiento térmico está igualmente restringida porque puede descargar al máximo el 12,5% de su capacidad de energía en una hora determinada.

1.3 Tipos de aprovechamiento y métodos

❖ Turbinas de vapor

La mayor parte de la electricidad del mundo se genera con turbinas de vapor, principalmente con vapor producido a partir de fuentes de calor fósiles o nucleares. Una de las ventajas de CSP es la facilidad con la que se puede aplicar una nueva fuente de calor a la tecnología dominante de generación de energía.

Una planta con un ciclo Rankine que utiliza una turbina de vapor funciona de la siguiente manera:

- comprimir agua de alimentación pura a alta presión (más de 10 MPa, por ejemplo);
 - vapor hirviendo y sobrecalentado en una caldera que puede estar en el punto focal, o puede calentarse usando un intercambiador de calor con otro fluido de transferencia de calor;
 - expandir el vapor a baja presión a través de una serie de turbinas que accionan un generador;
- y
- al final del proceso de expansión, condensando el vapor a baja presión con la ayuda de una torre de enfriamiento, para luego reutilizarlo en el ciclo.

El ciclo de Rankine tiene una mayor eficiencia de conversión para una temperatura y presión de vapor más altas en la entrada de la turbina.



Las turbinas de vapor de última generación más eficientes funcionan a una temperatura de entrada de vapor de hasta 700 °C. Sin embargo, los concentradores de Fresnel lineales y de canal están limitados a alrededor de 400 °C si se usa fluido de transferencia térmica de aceite térmico, y hasta 500 °C si se usa un HTF alternativo como la generación directa de vapor (DSG).

❖ Ciclos orgánicos de Rankine

Un ciclo orgánico de Rankine (ORC) es básicamente el mismo que un ciclo de vapor de Rankine; sin embargo, utiliza un fluido orgánico de punto de ebullición más bajo para que coincida mejor con su operación con las fuentes de calor a temperaturas más bajas.

❖ Motores Stirling

Un motor Stirling es un motor calentado externamente con pistones alternativos que funcionan con una cantidad fija y cerrada de fluido de trabajo gaseoso, generalmente hidrógeno o helio o posiblemente aire. El ciclo ideal está compuesto por una mezcla de temperatura constante y procesos adiabáticos (transferencia de calor cero).

Hay dos tipos de motores Stirling: tipos de cigüeñal de pistón contruidos de manera similar a los motores de combustión interna y motores de pistón libre que involucran un pistón oscilante conectado a un generador lineal, pero sin un enlace de restricción física. Ambos tipos se han usado en la práctica.

Los sistemas Dish-Stirling continúan manteniendo el récord de la mayor eficiencia de conversión solar a eléctrica de cualquier tecnología, con eficiencias eléctricas totales de energía solar a CA de alrededor del 30% en el punto de diseño DNI.

❖ Concentración fotovoltaica

Utilizan células costosas y de alta eficiencia para obtener la máxima ventaja de la inversión en sistemas concentradores. Se han utilizado células de silicio monocristalinas de alta calidad con eficiencias de alrededor del 20%.

Un problema clave con cualquier sistema fotovoltaico de alta concentración es el calor que resulta de los fotones que no se convierten directamente en electricidad. A 500 soles, una celda de triple unión se destruiría en unos segundos sin un sistema de enfriamiento altamente eficiente para extraer el calor.

❖ Otros

Hay otras formas de convertir la radiación solar en electricidad que eventualmente pueden ser competitivas, por ejemplo:



- El ciclo de Kalina es un ciclo de Rankine modificado que involucra mezclas de amoníaco y agua de concentración variable, que ofrece un mayor rendimiento para temperaturas entre 200 y 300 °C. Se está buscando aplicaciones de energía geotérmica comercialmente viables.
- Los convertidores termoelectricos producen electricidad directamente del calor. Los sistemas basados en semiconductores funcionan de manera análoga a las células fotovoltaicas, excepto que la excitación de electrones en la banda de conducción es a través de la excitación térmica en lugar de la absorción individual de fotones.
- Los convertidores termiónicos también producen electricidad directamente del calor; excitan electrones desde una superficie activa a través de una región evacuada hasta un colector.
- La energía fotovoltaica utiliza células fotovoltaicas adaptadas a las longitudes de onda de la radiación térmica para convertir la radiación reemitida desde las superficies calientes.
- Los convertidores magnetohidrodinámicos utilizan la expansión de gas ionizado calentado a través de un campo magnético para generar una diferencia de potencial.

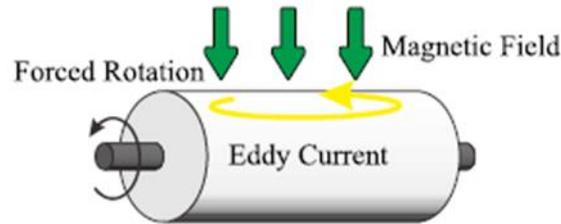
1.4 Generador de calor

Existen varios métodos que convierten la energía de rotación en energía térmica. Los métodos típicos son;

1. Fricción entre materiales sólidos.
2. Agitación del fluido.
3. Inducción electromagnética.

El sistema de fricción necesita mantenimiento frecuente y reemplazo de partes. La agitación del fluido puede no requerir un mantenimiento frecuente como la fricción, pero la temperatura producida está restringida por las características del fluido.

Parece que el uso de la inducción electromagnética es el mejor método para convertir la energía de rotación en energía térmica. El principio más simplificado del calentamiento por inducción electromagnética se muestra en la Fig. 22. El campo magnético estático se imprime sobre el conductor. La corriente de Foucault es inducida y calienta el conductor cuando el conductor es forzado a rotar.



Fuente: Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage.

Figura 22 Principio de generador de calor.

El retardador, que se emplea ampliamente para el freno auxiliar de los vehículos pesados, es una de las tecnologías prometedoras para el generador de calor. La temperatura del retardador alcanza más de 600 grados Celsius, aunque la temperatura del imán permanente equipado se mantiene por debajo de los 100 grados centígrados. La capacidad del retardador es de alrededor de varios cientos de kW, que está cerca de la capacidad del aerogenerador popular de 2 MW. El peso del retardador es casi una décima parte del motor/generador eléctrico de la misma capacidad. El retardador ya tiene suficiente robustez ya que está diseñado para soportar cargas intermitentes, nieve, calor, sal y humedad.

1.5 Generación eléctrica

La generación de electricidad se logra mediante el ciclo convencional de Rankine mediante el uso del calor almacenado en los tanques.

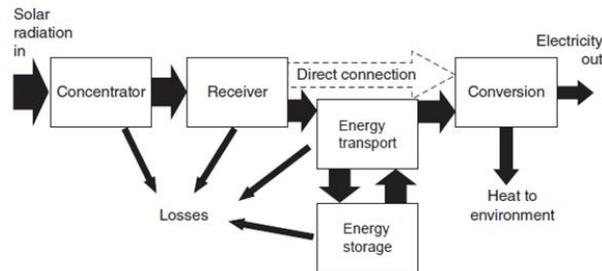
Los principales hallazgos se expresan de la siguiente manera:

- Las eficiencias de energía y ejercicio del sistema general se obtienen como 7.0% y 8.6% respectivamente.
- La eficiencia energética y de eficiencia del ciclo de Rankine que genera energía se calcula como 32.5% y 54.8%, respectivamente.
- Las tasas de destrucción de exergía más altas dentro del sistema integrado propuesto se producen en los procesos de energía eólica a electricidad, almacenamiento de energía térmica y electricidad a calor.
- El calentamiento por inducción es un método eficaz para convertir el trabajo eléctrico en energía térmica.
- La velocidad del viento y el radio del rotor son los dos parámetros críticos que afectan la ganancia de calor general del calentamiento por inducción en las turbinas eólicas.

La sal fundida se elige para el almacenamiento de energía porque es reconocida como una de las mejores HTF en TES, como una forma de almacenamiento de energía renovable se aplica en aproximadamente la mitad de las plantas CSP en todo el mundo.

Sin costos de combustible, el costo de la energía CSP está dominado por la amortización de la inversión de alto costo de capital inicial durante la vida útil de la planta.

La radiación concentrada debe ser interceptada por un receptor que la convierta a otra forma, típicamente energía térmica. Después del receptor, hay dos opciones: la energía se convierte aún más a la forma final deseada (como la electricidad) o se transporta a otra ubicación para la conversión final.



Fuente: Fundamental principles of concentrating solar power (CSP) systems.

Figura 23 Representación esquemática de los componentes de un sistema de energía solar térmica.

Si la conversión de energía se lleva a cabo remotamente desde los receptores, la energía térmica recolectada se lleva en un HTF. La generación directa de vapor se ha utilizado con todos los tipos de concentradores y tiene la ventaja de que el fluido de trabajo HTF y el ciclo de potencia son uno y el mismo, eliminando la necesidad de un intercambiador de calor. La sal fundida como HTF fue pionera en sistemas de torre y también se ha introducido para canales. Tiene la ventaja de que el HTF también es un medio favorable de almacenamiento de energía. El enfoque comercial dominante actual es utilizar sal fundida en tanques aislados a alta temperatura. La etapa final en un sistema CSP es la generación de energía eléctrica.

Existen sistemas de receptor central que constan de una serie de espejos de seguimiento, o heliostatos, que están espaciados en un campo para evitar interferencias mecánicas u ópticas entre sí mientras pivotan para reflejar la luz solar incidente del haz directo sobre un receptor elevado o un reflector secundario. El receptor está diseñado para interceptar efectivamente la luz solar entrante concentrada (energía solar) y (generalmente) absorberla como calor a una temperatura elevada. Esta energía es recolectada por un fluido de trabajo y almacenada como energía térmica, utilizada para impulsar un generador eléctrico o utilizada como calor de proceso.

La entrega de energía solar como calor termodinámicamente útil para ciclos de energía requiere temperaturas significativamente superiores a los 100 °C disponibles de los colectores de placa plana, por lo que se requieren colectores de concentración de seguimiento. Para suministrar cantidades comerciales significativas de energía solar, ya sea como electricidad o calor de proceso, las áreas totales de colector pueden ser del orden de un kilómetro cuadrado.

Un aerogenerador o turbina eólica está compuesto por el rotor de la turbina que adquiere parte de la energía cinética del viento y la transforma en energía mecánica rotatoria, un sistema de engranajes que incrementa la velocidad de rotación del rotor para adaptarla a la



velocidad del generador eléctrico, y un generador eléctrico que transforma la energía mecánica en energía eléctrica con una eficiencia del 59%.

Mientras que las eficiencias de la tecnología WTES específicamente de energía y exergía con el ciclo de Rankine son de aproximadamente 32% y 54%, respectivamente. De acuerdo con los criterios de Betz, se puede alcanzar teóricamente una eficiencia máxima del 59,2% del viento que sopla. Sin embargo, en la tecnología actual, se puede alcanzar el rango de eficiencia energética del 40-45%.

A pesar de ser inferior la tasa de conversión la WTES tienen la ventaja de usarse como complemento de la energía solar, utilizan la misma tecnología de almacenamiento térmico para su posterior conversión y utilización. Esto hace que toda la energía eólica se almacene durante el día para su utilización en la noche, donde no se genera energía solar térmica, haciendo más versátil la aplicación de esta tecnología.

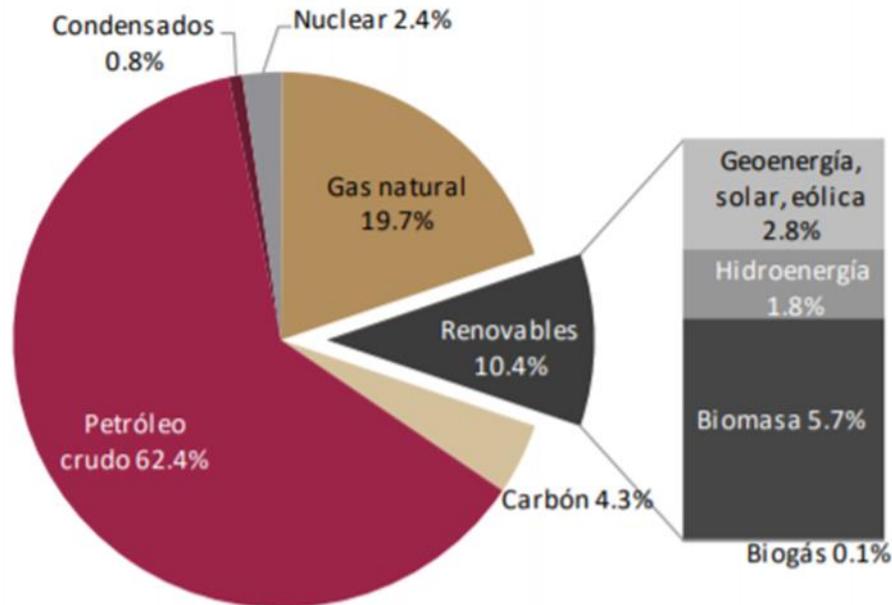
El campo solar tiene eficiencias de energía y exergía de 83.6% y 85.4%, respectivamente. Las altas eficiencias registradas del campo solar se deben a la utilización eficiente del espectro de luz solar. En la operación de CPV, para eliminar el desajuste entre la energía del fotón y el intervalo de banda de las células solares y para aumentar la eficiencia de conversión fotovoltaica, el espectro de luz se separa en dos porciones según su longitud de onda utilizando un divisor de espectro. Solo los fotones de menos de 750 nm se transmiten a las células fotovoltaicas, y el resto del espectro se refleja en el receptor de CSP. Dado que el receptor CSP no tiene una selectividad espectral, tiene un 100% de eficiencia energética y un 72,9% de eficiencia de energía. Los módulos CPV operan con un sistema de refrigeración para recuperar el calor generado durante la conversión fotovoltaica. Las eficiencias energéticas y exergéticas de los módulos fotovoltaicos son del 70% y 72,6%, respectivamente. El noventa por ciento de la energía perdida durante la conversión fotovoltaica es recuperado por el sistema de refrigeración.

La tecnología solar son las torres de energía solar generan energía eléctrica a partir de la luz solar al enfocar la radiación solar concentrada en un receptor montado en la torre. El sistema utiliza de cientos a miles de espejos de seguimiento solar llamados heliostatos para reflejar la luz solar incidente en un receptor. La eficiencia de la central termosolar (STPP) todavía es de alrededor del 12-18%, que es bastante baja y necesita mucha atención. La razón principal es que el medio portador de calor limita la temperatura de funcionamiento de la central térmica, lo que conduce a una menor eficiencia. Las principales ventajas del receptor volumétrico, en comparación con el receptor actual de última generación (estos receptores usan sal de nitrato fundido que fluye en los tubos) están relacionadas con la simplicidad inherente de usar aire como fluido de trabajo.

1.6 Situación en México

En México, los más de 11 mil kilómetros de costas acogen a casi un tercio de la población del país, a lo que hay que añadir los miles de turistas que visitan los destinos de playa cada año. Esto provoca una fuerte presión sobre los ecosistemas costeros, generando problemas de pérdida de hábitat y contaminación.

En 2014, la generación total de energía se ubicó en 301,462.0 GWh, incluyendo la generación reportada de los permisos, de los cuales el 85.6% provino del servicio público. A lo largo de diez años, la generación mediante fuentes fósiles como el carbón, gas natural, combustóleo, entre otros, presentaron una reducción en la participación de generación bruta con tres puntos porcentuales, para concentrar 82.1% del total, mientras que la generación mediante fuentes no fósiles fue de 17.9%.



Fuente: Sistema de Información Energética, SENER.

¹Incluye grandes hidroeléctricas

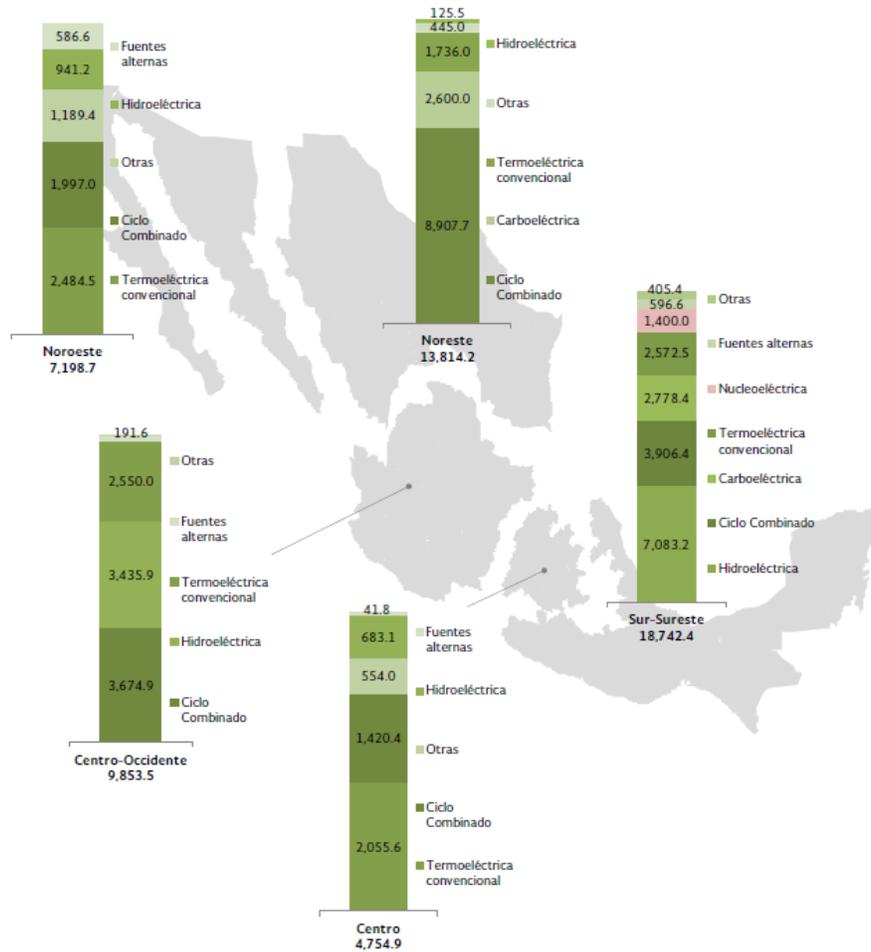
Nota: Todos los porcentajes son respecto al total de la producción de energía primaria.

El biogás representó 0.1%.

La suma de los parciales puede no coincidir con el total debido al redondeo de cifras.

Figura 24 Producción de energía primaria, 2014.

Uno de los cambios importantes en los últimos años fue el menor uso de combustóleo para la producción de energía eléctrica, con una reducción aproximada de 14,502.4 GWh, con lo que se ubicó, al cierre de 2014, en 26,598.6 GWh presentando una tasa de decrecimiento de -8.5%. Por el contrario, el gas natural tomó mayor relevancia al incrementarse en 6,226.6 GWh, y generar en ese año 171,877.1 GWh, concentrando el 57.0% del total de generación por fuente de energía y posicionándose como el principal energético empleado. Cabe mencionar que, dentro de las fuentes de energías renovables, la energía eólica ha tenido una fuerte participación y un incremento considerable en la última década. Hoy en día tiene el 2.1% de participación y su crecimiento medio anual es el más alto de todas las fuentes de energía con el 100.3%. La generación por energía hidráulica permanece dentro de las primeras posiciones, manteniendo un crecimiento anual de 4.5%



Fuente: SENER con información de CFE.

Figura 25 Distribución de la capacidad instalada nacional del servicio público por región y por tecnología, 2014.

La información generada por este estudio pretende dar un panorama de la cantidad de energía solar y viento. Todo esto con el fin de diseñar un sistema mixto de generación de energía sustentable que abastezca las necesidades de la población y del turismo que va en aumento año con año.

La población se vería beneficiada con propuesta de aprovechamiento energético con energía limpia, así como la percepción ecológica de la región podría captar más atención del ecoturismo al poner al visitante en contacto con la naturaleza y preservar el medio ambiente. Además de ser importante para mejorar el bienestar de las poblaciones locales pues resulta una importante actividad complementaria para su subsistencia, existen amplias oportunidades para desarrollar una industria de ecoturismo robusta y sostenible mediante la capacitación y las inversiones adecuadas.

Ría Lagartos, también llamado Parque Natural Reserva Ría Lagartos, abarcando una superficie de 47,820 ha, es el nombre de un estero, pantano generalmente en zonas planas con drenaje imperfecto, dentro de una reserva ambiental protegida, ubicado en el litoral norte de la península de Yucatán, dentro del estado del mismo nombre en México, la población dentro de los límites de la reserva es de 4,616 personas aproximadamente.



La pesca ribereña es la actividad económica más importante, pues proporciona ingresos a 1,000 familias aproximadamente, en las cuatro comunidades incluidas en el área (San Felipe, Río Lagartos, Las Coloradas y El Cuyo), a pesar de que el esfuerzo pesquero supera cada vez de manera más evidente la capacidad de carga de las pesquerías convencionales.

En la reserva tenemos varias especies representativas y muy importantes para el ecosistema y una gran variedad de flora y fauna, muchas en peligro de extinción o que hacen de este lugar su punto de anidación.

En Ría Lagartos, las lagunas costeras presentan altas salinidades que permite soportar en sus márgenes una industria salinera. La condición general de la laguna, calificada como regular, está en función de los síntomas de contaminación y cambio de uso del suelo de sus márgenes por el avance no regulado de actividades ganaderas.

La ocupación física del litoral y la reserva, la urbanización descontrolada de la franja costera a la que hay que sumar actividad hotelera e instalaciones portuarias, más las actividades económicas de la población puede desdibujar las costas y alterar irreversiblemente la dinámica litoral.

Una forma de ayudar a la comunidad es dándoles una propuesta de aprovechamiento energético con fuente de energía sustentable que pueda favorecer su aprovechamiento a escala comunitaria y mejorar su apreciación ecoturística del área.



2 Objetivos

Generar una propuesta de aprovechamiento energético a partir de la climatología de las variables: rapidez de viento, radiación solar en superficie, nubosidad y temperatura ambiente, para determinar el potencial energético de la zona que provea un sistema multigenerativo para el manejo de los recursos naturales, específicamente el recurso solar y eólico.

3 Hipótesis

En la localidad de Rio Lagartos, Yucatán, existe el potencial energético aprovechable provenientes de la radiación solar y del viento. Esta condición es posible debido a su localización geográfica.

4 Metodología

Establecida la necesidad de aprovechamiento energético sustentable en el área circundante a la reserva de la biosfera de Ria Lagartos se requirió la mayor cantidad de datos climatológicos que se pudieran obtener, esto dio como resultado la obtención de información de las siguientes fuentes ECMWF, NSRDB, estación meteorológica Rio Lagartos. Cabe señalar que para el proceso de obtención, manejo y procesamiento de datos se empleó el lenguaje de programación R.

Los archivos climáticos de Centro europeo para pronósticos meteorológicos de mediano alcance (ECMWF) de la base de datos ERA5, que proporciona estimaciones por hora de una gran cantidad de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. Los datos cubren la Tierra en un mallado de 0.28125° , aproximadamente 30 km, y que resuelven la atmósfera utilizando 137 niveles desde la superficie hasta una altura de 80 km. (ERA5-Land hourly data from 1981 to present, 2021)

La base de datos nacional de radiación solar (NSRDB) es una colección completa en serie de mediciones de radiación solar derivadas de satélites (irradiancia horizontal global, normal directa y horizontal difusa) y datos meteorológicos. Estos datos se han recopilado en un número suficiente de ubicaciones y escalas temporales y espaciales para representar con precisión los climas regionales de radiación solar. (The National Renewable Energy Laboratory (NREL), s.f.)

La Estación Meteorológica Automática (EMA) “RIOLAGARTOS”, administrada por el servicio meteorológico nacional (SMN), situada en la latitud: 21.57111111° y longitud: -88.16027778° , está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas Variables Meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, entre ellas, velocidad del viento, temperatura ambiente promedio y radiación solar.



Los registros de la estación meteorológica de Rio Lagartos genera un promedio de las variables meteorológicas cada 10 min, y se obtuvo datos desde el 2000 hasta el año 2019. Con esta información se crearon climatologías horarias de las variables: velocidad del viento, temperatura ambiente promedio y radiación solar.

La base de datos ERA5 datan del año 1981 hasta el presente, por lo que se incluyó información hasta el 2019, que representaría más de 37 años. Se extrae el área requerida, comprendida entre -88.5° a -87.75° de longitud, y de 21.25° a 21.75° de latitud respectivamente, dando en total 12 puntos de malla del modelo. Las series de datos, de los 12 puntos de malla, se acumularon de forma anual. Posteriormente se obtuvo el valor promedio de cada hora de un año, para crear una climatología horaria que contenía las variables Componentes zonal y meridional del viento, temperatura a 2 metros y nubosidad.

Los datos obtenidos del NSRDB proporcionan el recurso solar total diario promedio, mensual y anual, promediado sobre celdas de superficie de 0.038° tanto en latitud como en longitud (aproximadamente 4 km). Esto representa aproximadamente 264 series de datos por año en el área de estudio, obteniendo datos del 2010 al 2019, con resolución temporal de 30 min. Los datos fueron promediados de forma horaria, para posteriormente generar la climatología horaria de la irradiancia normal directa y la velocidad del viento.

Teniendo en cuenta la resolución máxima de los datos del ERA5 y por la localización geográfica se dividió el área rectangular en 6 partes cuadradas según las coordenadas de aproximadamente 28 km por lado, cada una identificada con un número que se presentará posteriormente, sin embargo, esta división del área de estudio servirá para identificar en que región del área de estudio es óptimo para la propuesta.

El DNI se usa normalmente en los estudios de aprovechamiento energético en unidades de $w/m^2/día$ o $w/m^2/año$ por lo que es necesario para el manejo de la información realizar una sumatoria por día para la conversión de unidades. Del resultado anterior se sumaron los 366 días para tener el valor anual.

De la información de viento zonal (componente U) y meridional (componente V) se calculó la rapidez del viento de la siguiente manera:

$$Rapidez\ de\ viento = \sqrt{viento\ zonal^2 + viento\ meridional^2}$$

Esto se realiza para cada dato temporal de ambas series temporales hasta obtener la resultante con la que se manejarán los datos posteriormente.

Para la validación de las diversas fuentes de datos con la EMA se utilizó la interpolación de la distancia inversa ponderada (IDW) que estima los valores de los puntos de malla calculando promedios de los valores de los puntos de datos de muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio, en este caso se tomaron los 4 puntos más cercanos, según sus coordenadas, a la estación de cada base de datos.



$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)}$$

Donde Z_p es el valor de la variable en el punto que se desea calcular, Z_i es el valor de un punto cercano entre d_i la distancia de ese valor con respecto al punto a calcular y utilizando $p = 2$.

Esto se efectuó para cada valor de la serie temporal, dando los valores representativos de ERA5 y NSRDB en el mismo punto donde se toman los valores de la EMA, haciendo posible comparar los datos reconstruidos con los observados.

5 Resultados

Con las climatologías construidas, del área de estudio que fue dividida en 6 cuadros como se puede observar en la Figura 26, está dada por la resolución de la malla del ERA5 que es menor que la de NSRDB, una vez dividida el área en 6 se analizan los puntos que las comprenden dentro de sus límites y se obtuvieron series temporal con diversas variables como: radiación solar en superficie, componente U de viento a 10 metros, componente V de viento a 10 metros, temperatura a 2 metros y nubosidad; sin embargo, esto varía dependiendo de la fuente.

La estación automática más cercana se encuentra situada en la latitud: 21.57111111° y longitud: -88.16027778° , operada por el SMN, los sensores que integran la estación (Figura 26):

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura y Humedad relativa
- Radiación solar
- Precipitación

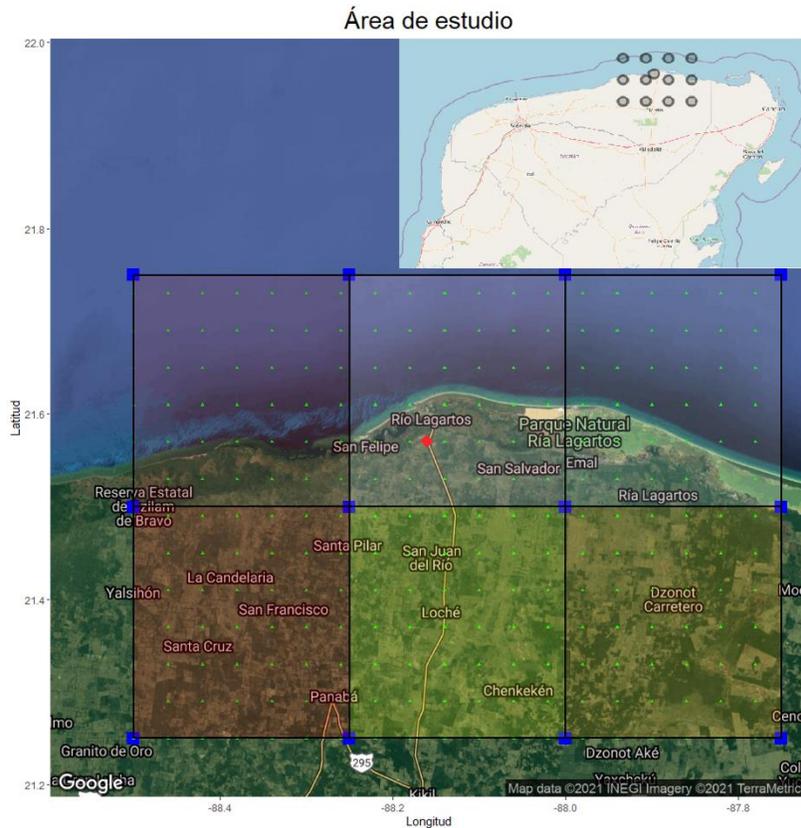


Figura 26 Área de estudio que comprenden las series temporales analizadas, cada punto es un conjunto de valores representativos a un área; los puntos azules representan las series de datos de ERA5, los puntos verdes representan las series de datos correspondientes al NSRDB y el punto rojo representa a la EMA. En la parte superior se representa la macro localización en la península donde se observan los puntos del ERA5 y la EMA.

Se observaron 9 horas útiles que serán la fuente de energía térmica que se almacenará en los tanques de almacenamiento térmico y energía fotovoltaica tradicional. La radiación por mes nos dará los periodos de tiempos con más energía a lo largo del año, ya que las variaciones intra-anales de la DNI pueden afectar fuertemente en las previsiones de energía neta anual producida. Si la DNI es alta, se necesitará menos cantidad de heliostatos. El problema radica en tener un valor de diseño cercano a la realidad, puesto que, si la DNI real es mucho menor que la de diseño, el campo de heliostatos en invierno (menor DNI) no conseguirá suministrar la potencia térmica necesaria para la potencia eléctrica de diseño, debido a que no habrá suficientes heliostatos.

Para medir el DNI se utiliza un pirheliómetro que siempre debe estar perpendicular a la radiación proveniente del disco solar a lo largo del día, se hace indispensable emplear un sistema de seguimiento solar (solar tracker), lo cual permite obtener datos de la componente DNI de la radiación solar.

La información proveniente de NSRDB se crearon utilizando propiedades de la nube que se generan utilizando los algoritmos AVHRR Pathfinder Atmospheres-Extended (PATMOS-x)(Andy Heidinger, NOAA STAR). El modelo rápido de radiación de todo el cielo para aplicaciones solares (FARMS) junto con las propiedades de la nube y la profundidad óptica

del aerosol (AOD) y el vapor de agua precipitable (PWV) de una fuente auxiliar se utilizan para estimar el DNI. La irradiancia normal directa (DNI) se calcula para cielos despejados utilizando el modelo REST2. Para las escenas de nubes, FARMS se utiliza para calcular el DNI. El DNI para escenarios con nubes se calcula utilizando el modelo DISC. Los datos se promedian a partir de la producción del modelo por hora durante 19 años (1998-2016). El modelo PATMOS-X utiliza imágenes de radiación cada media hora en canales visibles e infrarrojos de la serie GOES de satélites meteorológicos geoestacionarios, datos diarios de la capa de nieve del NSIDC y perfiles de relación de mezcla, temperatura y presión del Análisis retrospectivo de la era moderna (MERRA- 2) conjunto de datos. El modelo REST2 utiliza la profundidad óptica de aerosol por hora de MERRA-2 para calcular el DNI; El vapor de agua y otras entradas para REST 2 se obtienen del MERRA-2.

Con la información de NSRDB y la EMA obtenida y con lapsos de información de una hora se acumulan por días y se promedian los 366 días para poder generar el día representativo, que posteriormente muestra en la Figura 27, el comportamiento de la radiación solar, así como la semejanza de los modelos de reanálisis con los datos observados obtenidos in situ, en ambos casos observamos 10 horas con valores mayores de sus medias respectivas. Los datos de NSRDB tienen una media de 243.0096 Wh/m², un máximo de 622.5287 Wh/m² a las 12 pm; los datos del EMA es 209.9567 Wh/m² con un máximo de 687.2304 Wh/m² a las 12 pm, una variación del 15.74% entre las medias, y entre los máximos del 9.41%.

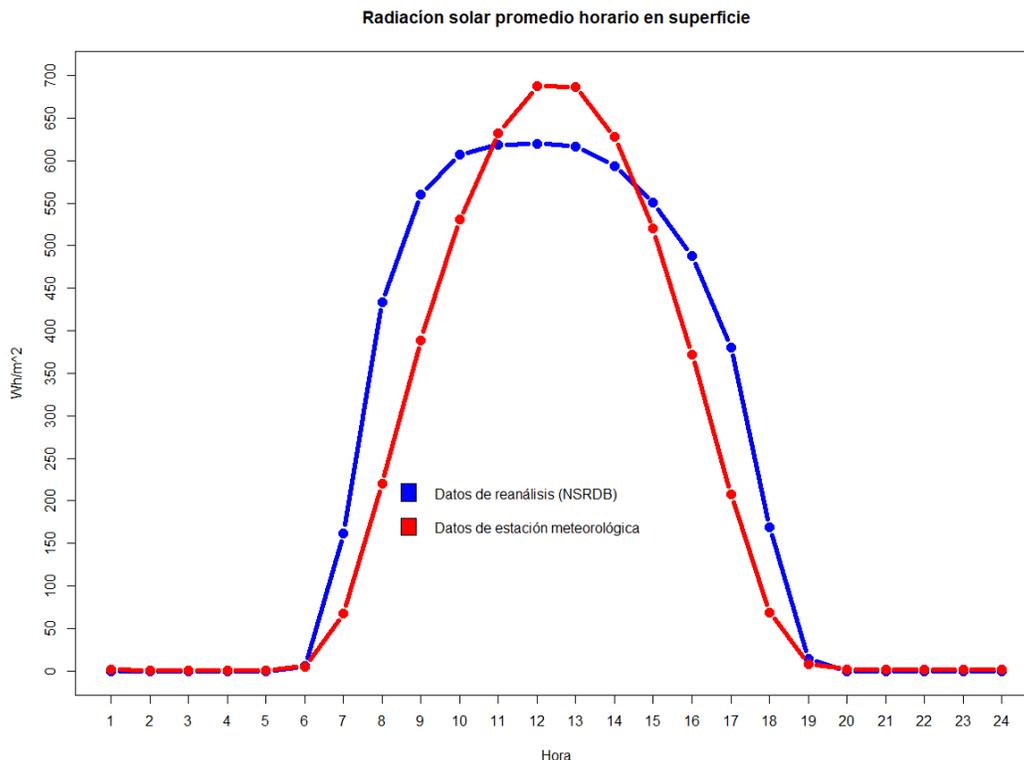


Figura 27 Radiación solar promedio horario en superficie, los datos interpolados de NSRDB tienen una media de 243.0096 Wh/m², los datos de la estación meteorológica tienen una media de 209.9567 Wh/m².

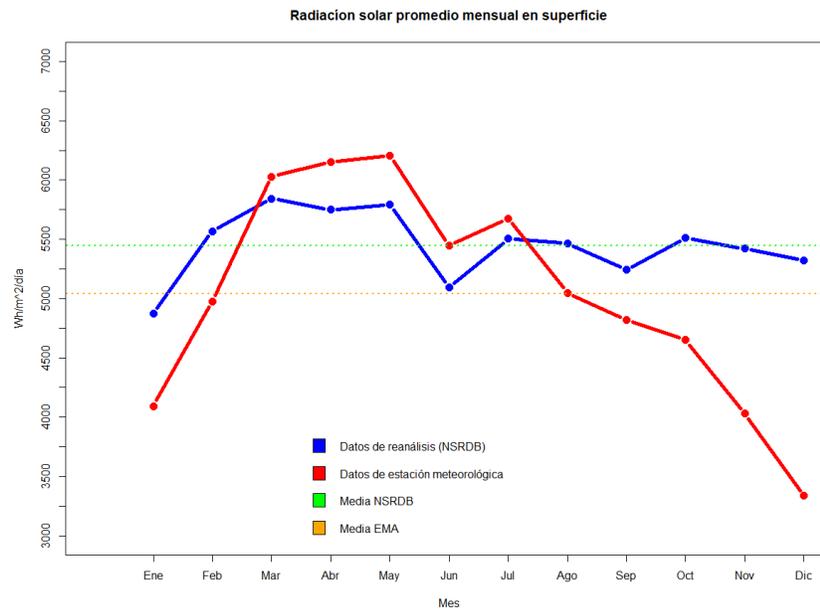


Figura 28 Radiación solar promedio mensual en superficie, los datos interpolados de NSRDB presenta una media de 5449.382 Wh/m²/día; los datos de la estación meteorológica una media de 5039.432 Wh/m²/día.

En la Figura 28 la radiación solar promedio mensual se tiene para los datos de NSRDB presenta una media de 5449.382 Wh/m²/día con un valor máximo de 5843.275 Wh/m²/día en marzo y un valor mínimo de 4875.728 Wh/m²/día en enero, los datos del EMA una media de 5039.432 Wh/m²/día con un valor máximo de 6206.079 Wh/m²/día en mayo y un valor mínimo de 3336.71 Wh/m²/día en diciembre. Con una variación entre los valores promedio de 8.13%, entre los valores máximos de 5.84% y entre los valores mínimos de 46.12%. la desviación estándar de los datos de NSRDB es de 288.007 Wh/m²/día y el del EMA es de 912.5939 Wh/m²/día que es un 69.44% de diferencia entre ambas.

La órbita elíptica de la Tierra (excentricidad 0.0167) nos acerca más al Sol en enero y lo aleja más en julio. Esta variación anual se traduce en una variación de la irradiación solar de la Tierra de $\pm 3\%$. La variación de la distancia Tierra-Sol causa una variación típica en la radiación solar extraterrestre (ETR) de unos 1,415 W/m², alrededor del 3 de enero; a unos 1,321 W/m², alrededor del 4 de julio. Esto se ve reflejado en la Figura 28 y Figura 35 donde se debe tener principal atención en enero, junio, noviembre, diciembre, cuyo DNI decae a menos de 4500 Wh/m²/día.

El mes de enero es en el que recibimos menor cantidad de radiación solar; aunque en ese mes la distancia de la tierra respecto al sol no es la máxima, el ángulo de inclinación de la Tierra provoca que precisamente en esa época del año los rayos solares no lleguen directamente al hemisferio norte (región donde se encuentra México), teniendo el invierno en esta zona del planeta y el verano en el hemisferio sur.

Lo contrario pasa en el mes de mayo cuando en México se tiene el mes de máxima insolación, a pesar de que en esta época del año se tiene la distancia máxima entre la Tierra el Sol la inclinación de la Tierra respecto al plano solar permite que los rayos solares impacten



directamente en el hemisferio norte teniendo el verano en esta región del planeta y el invierno en el hemisferio sur.

Aunque el valor medio y el valor máximo tienen valores muy cercanos respecto a el NSRDB y la EMA, el modelo utilizado por la primera tiende a suavizar los cambios generados por las variaciones interanuales explicadas anteriormente. El valor de la energía acumulada anualmente supera 1.8444 MW/m² /año según la EMA y 1.9969 MW/m² /año según el NSRDB.

La energía eólica, transforma el viento en energía mecánica, ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala desde mediados de la década de los 70 en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles.

La velocidad del viento mínima para el funcionamiento de un aerogenerador suele ser entre 3-4 m/s, aunque para poder plantear un proyecto eólico la velocidad del viento media anual debe situarse como mínimo en los 5 m/s.

Como normas generales, debemos saber que:

- La rapidez del viento aumenta con la altitud por la disminución de la fricción causada por los obstáculos y la propia superficie terrestre
- La rapidez del viento media es menor durante la noche, aumenta a partir de la salida del sol con un máximo entre las 12 y las 16h.

El calor es una forma de energía rentable para un almacenamiento de energía a gran escala por lo que sería más eficiente que una conversión directa a energía eléctrica. Estamos desarrollando un WTES que puede convertir la energía eólica de manera eficiente en energía térmica para ser almacenada para una generación de energía eléctrica estable y de bajo costo. El estudio de Okazaki demostró que el calentamiento por inducción puede ser la generación de calor más eficiente para el WTES, ya que puede realizar una máquina rotativa muy ligera y robusta. WTES se vuelve mucho más atractivo cuando se construye además de la CSP, ya que muchas partes de los elementos se pueden compartir. El empleo del generador eléctrico y de calor permite una operación flexible. Incluso puede absorber el excedente de energía en la red.

La velocidad del viento es el promedio aritmético de las velocidades medidas en un lapso de 10 minutos, su unidad de medición para EMAs es en km/h, por lo que se acumuló en lapsos de una hora y se convirtieron a m/s para un mejor manejo y fácil comparativa, particularmente en el área de estudio solo hay una EMA por lo que se toma como valor representativo de toda el área de estudio.

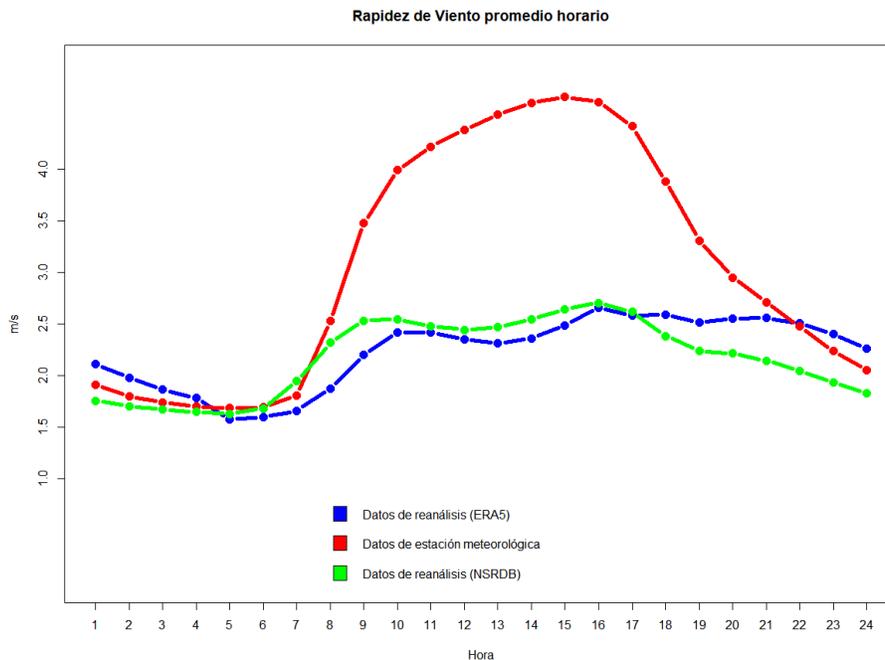


Figura 29 Rapidez de viento promedio horario, la línea azul datos del ERA5 cuya media es 2.23 m/s, la línea roja de la estación meteorológica con media 3.06 m/s y la línea verde de NSRDB con media de 2.17 m/s.

Como se observa en la Figura 29, el valor promedio de la rapidez de viento de la base de datos de ERA5 es de 2.23 m/s, un valor máximo de 2.66 m/s a las 4 pm, un valor mínimo de 1.57 m/s a las 5 am y tiene una desviación estándar de 0.34 m/s. La EMA tiene el valor promedio de la rapidez de viento de 3.06 m/s, un valor máximo de 4.70 m/s a las 3 pm, un valor mínimo de 1.68 m/s a las 5 am y tiene una desviación estándar de 1.16 m/s. La base de datos NSRDB tiene el valor promedio de 2.17 m/s, un valor máximo de 2.70 m/s a las 4 pm, un valor mínimo de 1.63 m/s a las 5 am y tiene una desviación estándar de 0.37 m/s.

La rapidez de viento de los datos de reanálisis subestima los datos observados obtenidos por la estación meteorológica, con unas variaciones entre los datos del ERA5 y la estación meteorológica de valores medios de 27.12%, un 43.4% entre los valores máximos, un 6.55% entre los valores mínimos y finalmente un 70.69% entre sus desviaciones estándar; la variación entre la NSRDB y la EMA con valores medios de 29.08%, un 42.55% entre los valores máximos, un 2.98% entre los valores mínimos y finalmente un 68.1% entre sus desviaciones estándar.

La variación de promedios entre las fuentes de datos podría no ser muy relevante dado que para el funcionamiento de una turbina de viento de conversión eléctrica convencional es de entre 3-4 m/s, aunque para poder plantear un proyecto eólico la velocidad del viento media anual debe situarse como mínimo en los 5 m/s. Sin embargo, en este trabajo se plantea el uso de WTES que puede ser utilizado con velocidades de viento menores a 4 m/s, velocidad inferior a las turbinas convencionales.

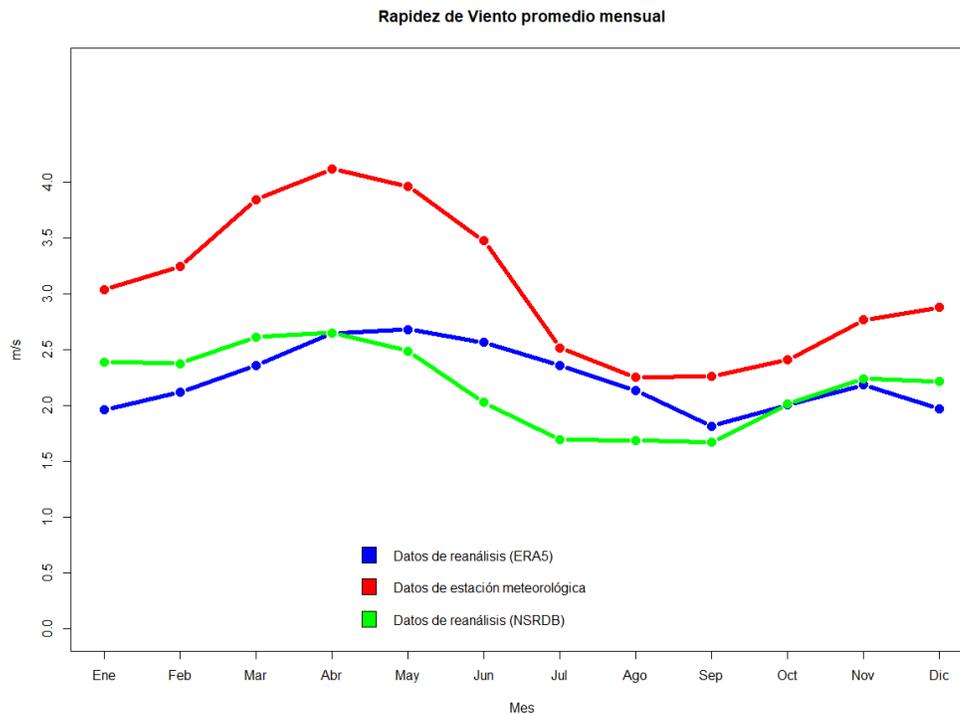


Figura 30 Rapidez de viento promedio mensual, la línea azul datos del ERA5 cuya media es 2.23 m/s, la línea roja de la estación meteorológica con media 3.06 m/s y la línea verde de NSRDB con media de 2.17 m/s.

Los valores de promedio correspondientes a los valores mensuales de cada base de datos según la Figura 30 es la misma que sus valores diarios, con las variaciones porcentuales igual que los diarios, valor promedio de los datos de ERA5 es de 2.23 m/s, el valor máximo 2.68 m/s en mayo, su valor mínimo promedio de 1.81 m/s en septiembre y una desviación estándar de 0.29 m/s. El valor promedio de los datos de la estación meteorológica es 3.06 m/s, el valor máximo 4.12 m/s en abril, su valor promedio mínimo de 2.25 m/s en agosto y una desviación estándar de 0.67 m/s. El valor promedio de los datos de la NSRDB 2.17 m/s, el valor máximo es 2.65 m/s en abril, su valor mínimo de 1.67 m/s en septiembre y una desviación estándar de 0.35 m/s.

La diferencia de los datos como base a los datos de la estación meteorológica con los valores del ERA5 es para las medias 27.12%, un 34.95% en referencia a los valores máximos y 19.55% entre los valores mínimos y 56.72% de su desviación estándar. La variación de los datos de la estación meteorológica contra el NSRDB es para las medias 29.08%, un 35.68% en referencia a los valores máximos y 25.78% entre los valores mínimos y 47.76% de su desviación estándar.

La nubosidad es un factor muy importante para energía solar concentrada, porque esta aprovecha la radiación directa y no la difusa, por lo que a mayor nubosidad menor cantidad de energía se captara, sin embargo, también se propone el divisor de espectro el cual es para la energía fotovoltaica y no es afectado por la nubosidad.

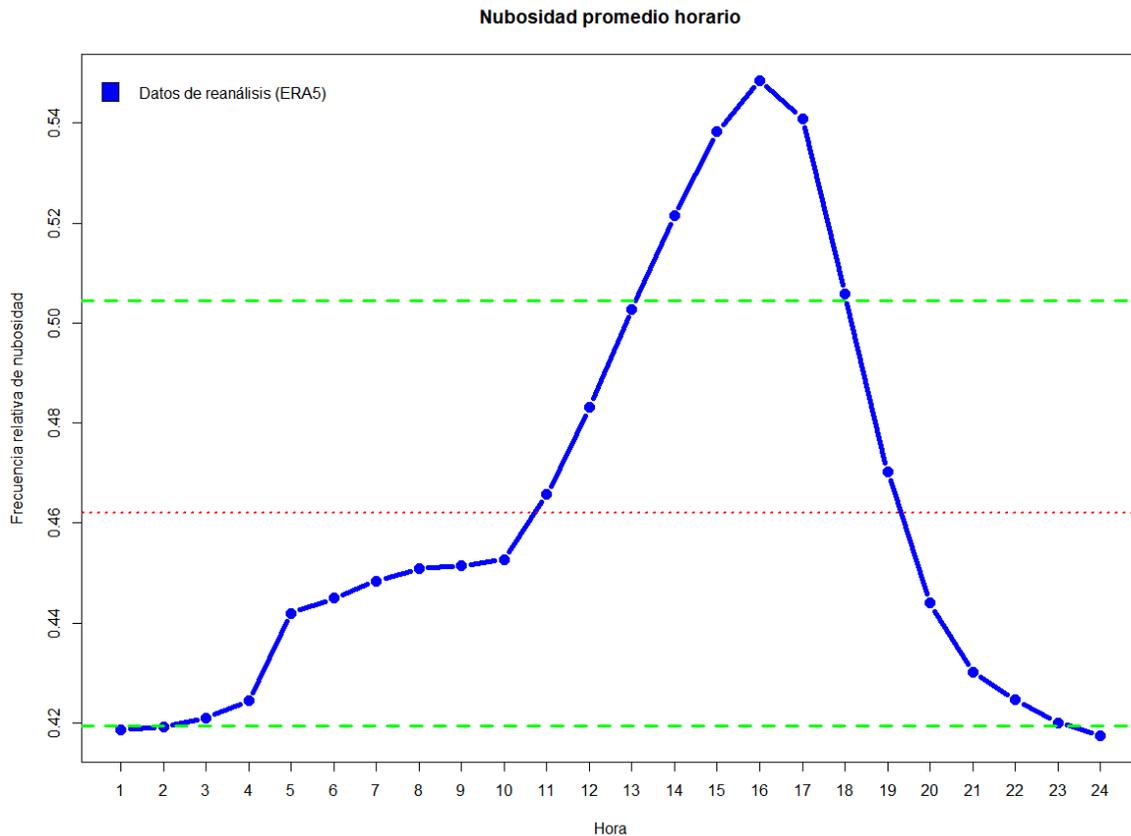


Figura 31 Nubosidad horaria, el valor la media por hora es 46.19%, la línea roja es la media y la línea verde su desviación estándar que es de 4.25%.

El valor medio de la nubosidad diaria representado en la figura 31 es de 46.19% con un valor máximo de 54.84% a las 4 pm. y un mínimo de 41.74% a las 12 am., la variación entre los mismos datos o desviación estándar es 4.25%.

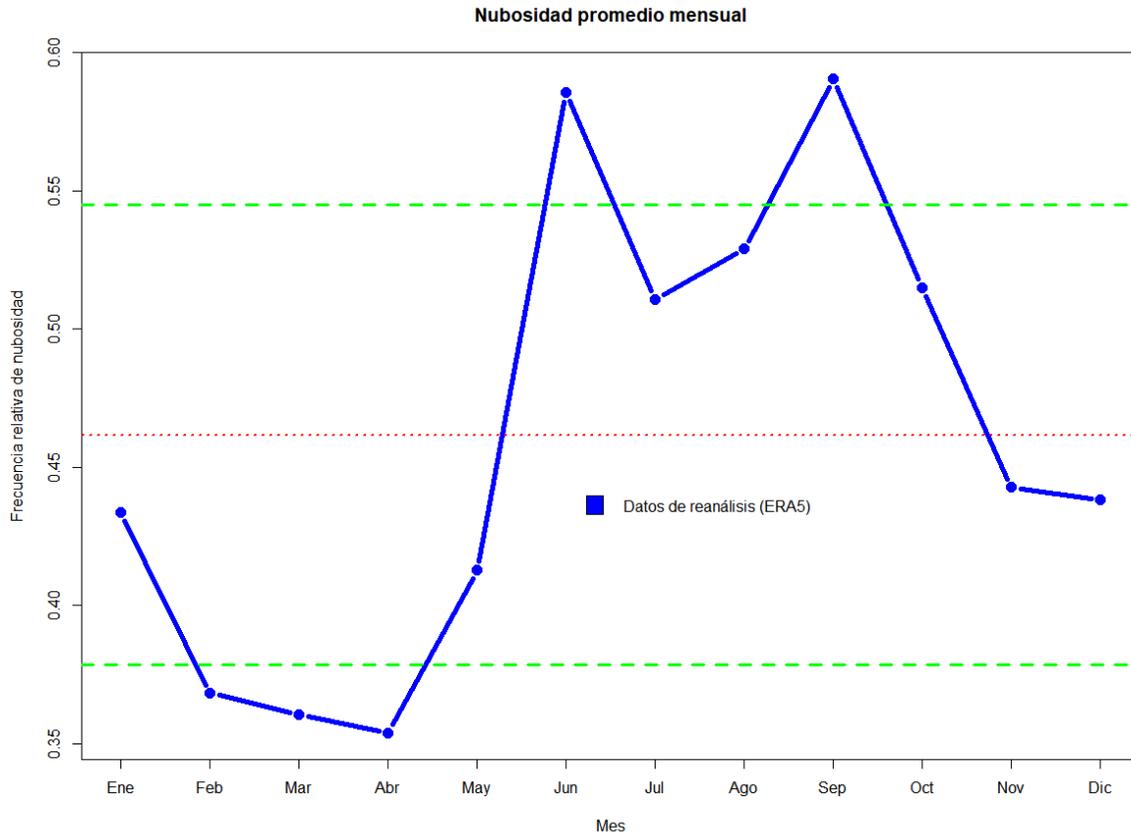


Figura 32 Nubosidad mensual, la media tiene un valor de 46.17%, la línea verde representa la media y la línea verde la desviación estándar que es de 8.33%.

La nubosidad mensual en la Figura 32 nos muestra una media de 46.17% con un valor máximo de 59.06% en septiembre y un mínimo de 35.39% en abril, la variación entre los mismos datos o desviación estándar es 4.25%.

La temperatura por otro lado es un factor que afecta las celdas fotovoltaicas ya que a mayor temperatura es menor la eficiencia de la celda. En 1m^2 es cuando se obtiene el 100% de rendimiento de esas células fotovoltaicas. según la mayoría de los fabricantes a $40\text{ }^\circ\text{C}$ el rendimiento del panel solar suele estar por el 80%.

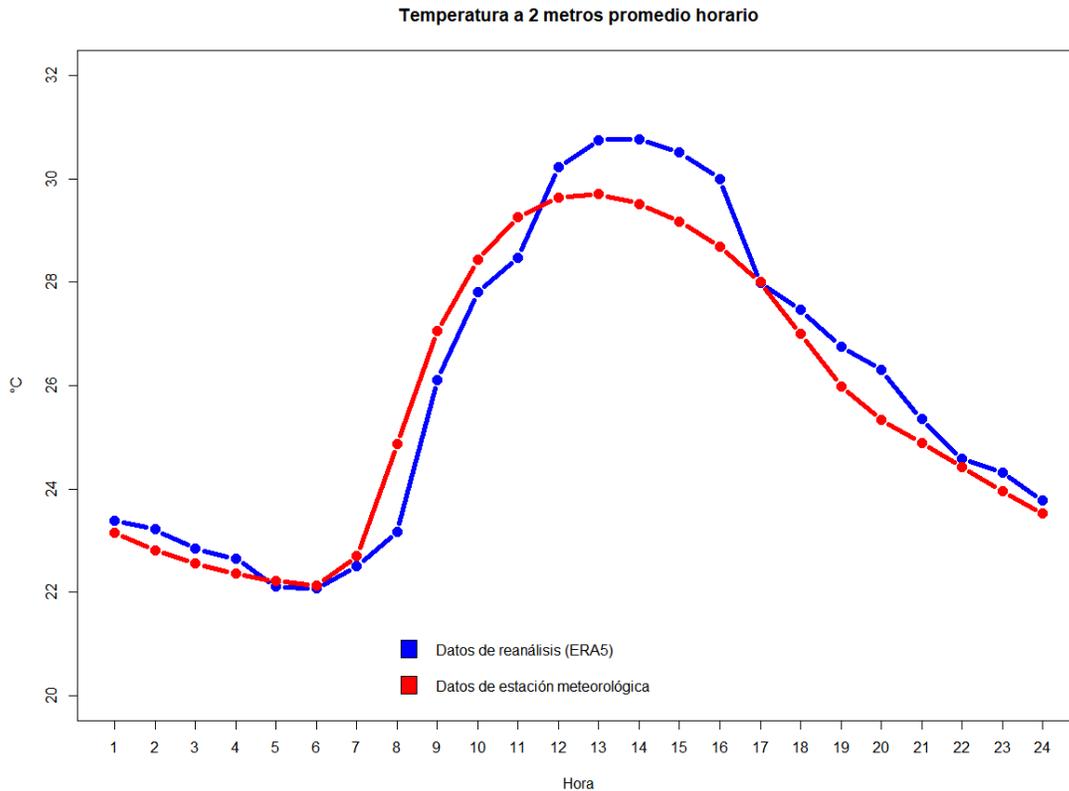


Figura 33 Temperatura promedio por hora, la media de ERA5 es 25.96 °C, media de la EMA es 25.72°C.

Los datos de temperatura promedio por hora se encuentran en la Figura 33 donde podemos encontrar que para el ERA5 una media de 25.96 °C, un valor máximo de 30.77 °C a la 2 pm y un valor mínimo de 22.07 °C a las 6 am, mientras que la EMA cuenta con una media de 25.72 °C, con un valor máximo de 29.70 °C a la 1 pm y un valor mínimo de 22.13 °C a las 6 am. El porcentaje de variación entre las medias es de 0.93%, la diferencia entre los máximos es de 3.6% y entre los valores mínimos de 0.27%. La desviación estándar del ERA5 es de 3.04 °C mientras que la variación del EMA es de 2.77 °C que es una diferencia de 9.75%.

La potencia pico de una placa solar, dada para el momento en el que el sol produce 1000W en 1 m² a 25° (concepto denominado como hora Solar Pico), ahí y solamente ahí es cuando se obtiene el 100% de rendimiento de esas células fotovoltaicas. Con el calor, la producción disminuye, según la mayoría de los fabricantes a 40 °C el rendimiento del panel solar suele estar por el 80%. La temperatura de la célula posee un efecto importante sobre el valor de la tensión en circuito abierto (Voc, que es el máximo valor de tensión en extremos de la celda y se da cuando esta no está conectada a ninguna carga). Así, al aumentar la temperatura, la tensión de circuito abierto disminuye del orden de unos pocos milivoltios por cada grado centígrado que aumenta la temperatura (2.3 mV/°C para el silicio y entre 2 y 2.2 mV/°C en el caso de arseniuro de galio). La eficiencia de la célula disminuye al aumentar la temperatura (se reduce entre el 0.4 y 0.5% por °C en las células de silicio y alrededor de 0.3% por °C en las de arseniuro de galio).

Temperatura a 2 metros promedio mensual

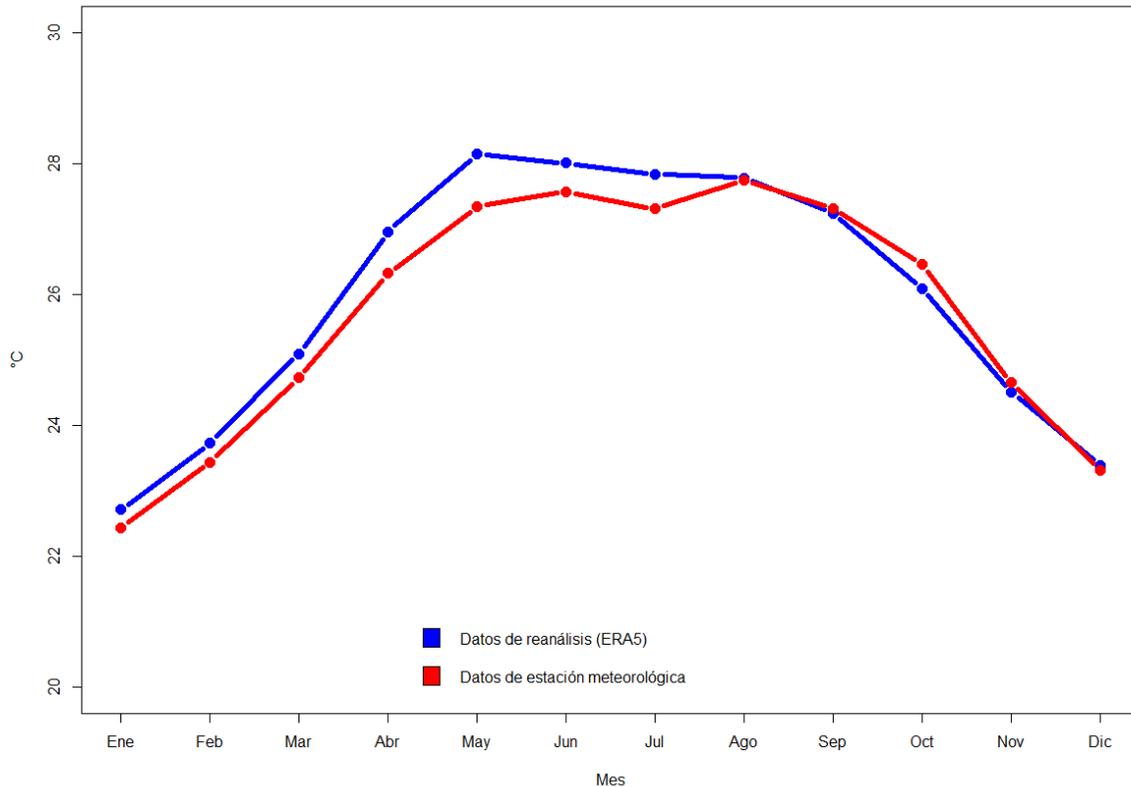


Figura 34 Temperatura promedio mensual a 2 m, en los datos de ERA5 la media es 25.96 °C, la media de la EMA es de 25.72 °C.

La temperatura promedio por mes está representada en la Figura 34, los datos de ERA5 tiene una media de 25.96 °C, con un valor máximo de 28.14 °C en mayo y un valor mínimo de 22.71 °C en enero; los datos del EMA tienen una media de 25.72 °C, con un valor máximo de 27.75 °C en agosto y un valor mínimo de 22.43 °C en enero, la diferencia entre los valores de media es de 0.93%, una variación de los valores máximos de 1.40% y de valores mínimos de 1.25%. Los datos de ERA5 tienen una desviación estándar de 1.99 °C mientras que los datos del EMA 1.91 °C que representa una diferencia de 4.19%.

La comparación de radiación solar entre la EMA y NSRDB nos muestra que los datos de este último sobreestima ligeramente el Valor observado con respecto a su media y su máximo, por lo que es factible usar los datos de reanálisis para representar las diferentes áreas; en cuanto a la comparación de los datos de rapidez de viento entre EMA, NSRDB y ERA5 se muestra que las bases de datos de reanálisis son bastante similares entre sí, sin embargo subestima la rapidez del viento tanto de forma horaria como de forma mensual, por lo que se recomendaría usar los datos de la EMA, pero al solo contar con una estación en el área se utilizara los datos de reanálisis, teniendo en cuenta lo antes mencionado; en cuanto a la temperatura entre la EMA y ERA5 se observa que este último sobreestima ligeramente los datos de la estación por lo que se utilizaran los datos de reanálisis para toda el área.

Radiación solar promedio en superficie (NSRDB)

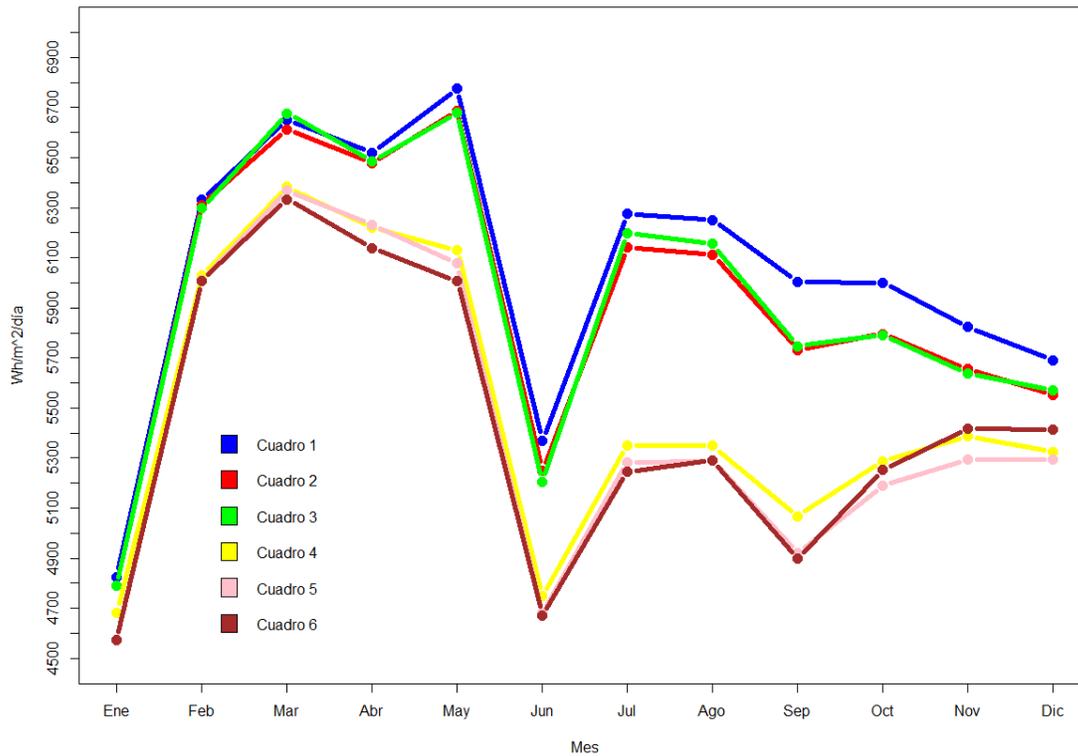


Figura 35 La gráfica de radiación solar promedio en superficie con los datos de NSRDB la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 6043.25 Wh/m²/día, la línea roja representa los valores del cuadro 2 teniendo media de 5926.33 Wh/m²/día, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 5935.87 Wh/m²/día, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 5496.82 Wh/m²/día, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 5433.98 Wh/m²/día, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo valores de 5437.867 Wh/m²/día.

Tabla 1 DNI de datos de reanálisis.

DNI (NSRDB) Wh/m ² /día						
Área	Promedio	Máximo	Mes MAX	Mínimo	Mes min	σ
Cuadro 1	6043.25	6775.99	Mayo	4825.27	Enero	558.03
Cuadro 2	5935.87	6687.50	Mayo	4789.10	Enero	572.16
Cuadro 3	5926.33	6680.03	Mayo	4789.26	Enero	586.43
Cuadro 4	5496.82	6382.53	Marzo	4683.61	Enero	566.30
Cuadro 5	5433.98	6368.82	Marzo	4569.21	Enero	601.34
Cuadro 6	5437.87	6333.72	Marzo	4573.60	Abril	576.89

Para poder observar el comportamiento del DNI en toda el área de estudio se generaron las gráficas de la Figura 35, solo se graficaron los datos de la NSRDB puesto que esta base de datos cuenta con mayor número de series temporales, así al promediar con mayor cantidad de información podría generar mejores resultados, los datos del EMA tienen representatividad en un área más limitada teóricamente sin embargo como se comprobó con la comparación con los datos de interpolación de los reanálisis, en varios parámetros como

DNI y temperatura tiene valores muy similares a toda el área de estudio y siendo subestimada en cuanto a rapidez de viento.

Como se puede observar el cuadro 1 representa un área cercana a la costa y tiene el mayor promedio de DNI y la menor desviación estándar haciéndola idónea de manera preliminar para la implementación de la tecnología CSP.

La rapidez del viento como se explicó antes es vital para la tecnología WTES por lo que encontrar el área (cuadro) con mayor potencial de aprovechamiento será necesaria para demostrar que esta región es apta para la aplicación de esta tecnología propuesta.

El recurso eólico en México es competido, como lo demuestran los numerosos proyectos llevados a cabo por el sector privado en la modalidad de autoabastecimiento, así como por la CFE bajo la modalidad de Productor Independiente de Energía, según la publicación de asociación mexicana de energía eólica en su publicación “El Potencial eólico mexicano: Oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico”.

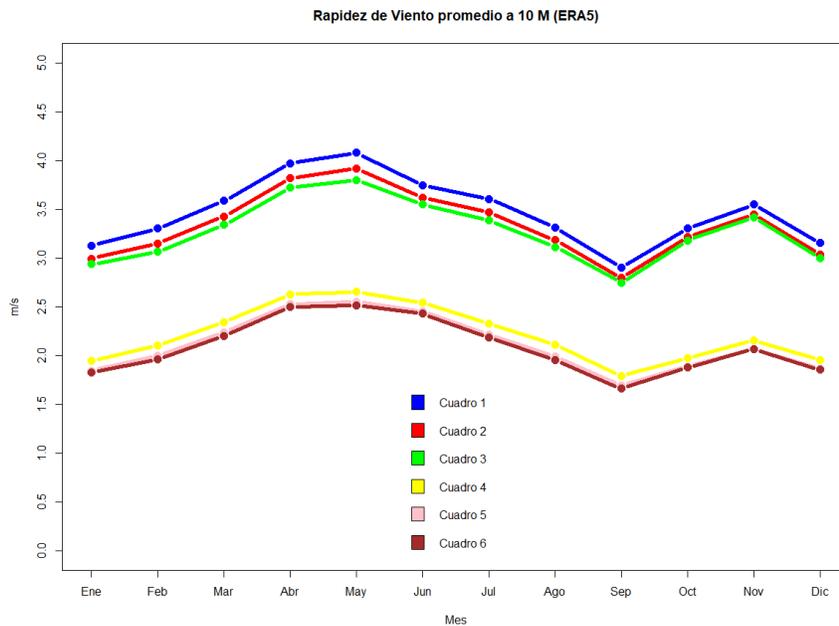


Figura 36 La gráfica de rapidez de viento promedio a 10 m de altura con los datos ERA5 donde la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 3.47 m/s, la línea roja representa los valores del cuadro 2 teniendo media de 3.34 m/s, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 3.27 m/s, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 2.21 m/s, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 2.11 m/s, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo media de 2.08 m/s.

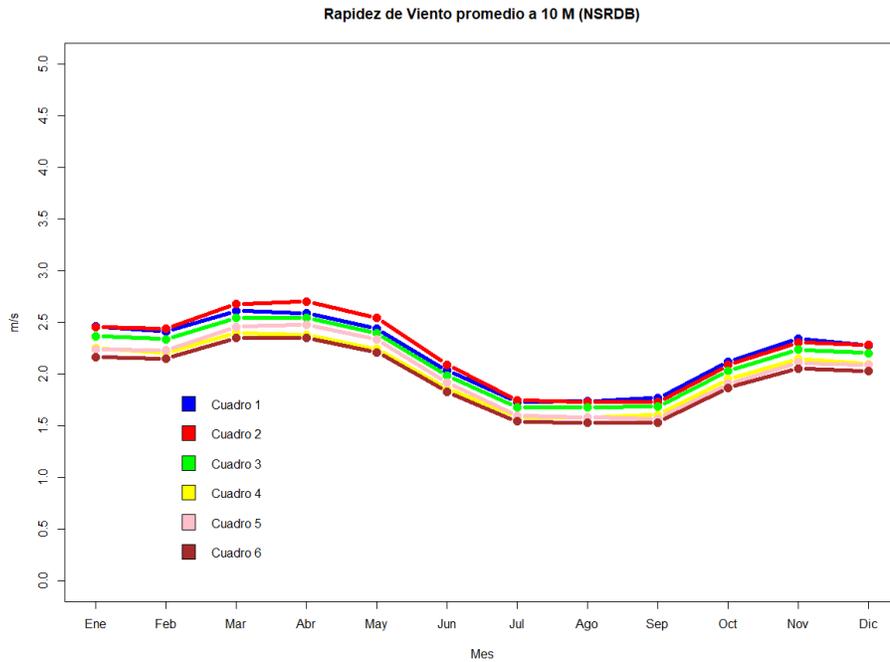


Figura 37 La gráfica de rapidez de viento promedio a 10 m de altura con los datos NSRDB donde la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 2.21 m/s, la línea roja representa los valores del cuadro 2 teniendo media de 2.23 m/s, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 2.14 m/s, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 2.02 m/s, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 2.04 m/s, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo media de 1.97 m/s.



Tabla 2 Rapidez de viento de datos de reanálisis.

Rapidez de viento (ERA5) m/s						
Área	Promedio	Máximo	Mes MAX	Mínimo	Mes min	σ
Cuadro 1	3.47	4.07	Mayo	2.90	Septiembre	0.35
Cuadro 2	3.34	3.92	Mayo	2.79	Septiembre	0.34
Cuadro 3	3.27	3.80	Mayo	2.75	Septiembre	0.32
Cuadro 4	2.21	2.65	Mayo	1.79	Septiembre	0.29
Cuadro 5	2.11	2.55	Mayo	1.69	Septiembre	0.28
Cuadro 6	2.09	2.51	Mayo	1.66	Septiembre	0.28

Rapidez de viento (NSRDB) m/s						
Área	Promedio	Máximo	Mes MAX	Mínimo	Mes min	σ
Cuadro 1	2.21	2.61	Marzo	1.73	Julio	0.32
Cuadro 2	2.23	2.70	Abril	1.73	Septiembre	0.36
Cuadro 3	2.14	2.54	Marzo	1.67	Julio	0.33
Cuadro 4	2.02	2.40	Marzo	1.58	Agosto	0.30
Cuadro 5	2.04	2.48	Abril	1.57	Septiembre	0.33
Cuadro 6	1.97	2.35	Abril	1.53	Septiembre	0.30

Como sucedió con los datos de DNI, los datos del EMA no son representativos para toda la extensión del área de estudio por lo que no se toman en cuenta para la elaboración de las gráficas de la Figura 36.

Tabla 3 Diferencias entre datos de rapidez de viento de reanálisis.

Diferencias de Rapidez de viento %				
Área	Promedio	Máximo	Mínimo	σ
Cuadro 1	36.31	35.87	40.34	8.57
Cuadro 2	33.23	31.12	37.99	5.88
Cuadro 3	34.56	33.16	39.27	3.12
Cuadro 4	8.60	9.43	11.73	3.45
Cuadro 5	3.31	2.74	7.10	15.15
Cuadro 6	5.29	6.37	7.83	6.66

Los datos revelan que el cuadro 1 es el que mayor rapidez de viento tiene, esto es estar en la costa y no haber obstáculos, y lo segundo que se observa es que el modelo del NSRDB al tener más puntos de datos los valores de viento cambian moderadamente unos con otros, por lo que al promediarse la rapidez de viento da un valor bajo en comparación al ERA5, en particular con los datos de ERA5 se observa claramente 2 regiones separadas, la costa que comprende en cuadro 1, 2 y 3, y el área continental que comprende los cuadros 4, 5 y 6; los valores costeros son superiores por más del 30% a los continentales.

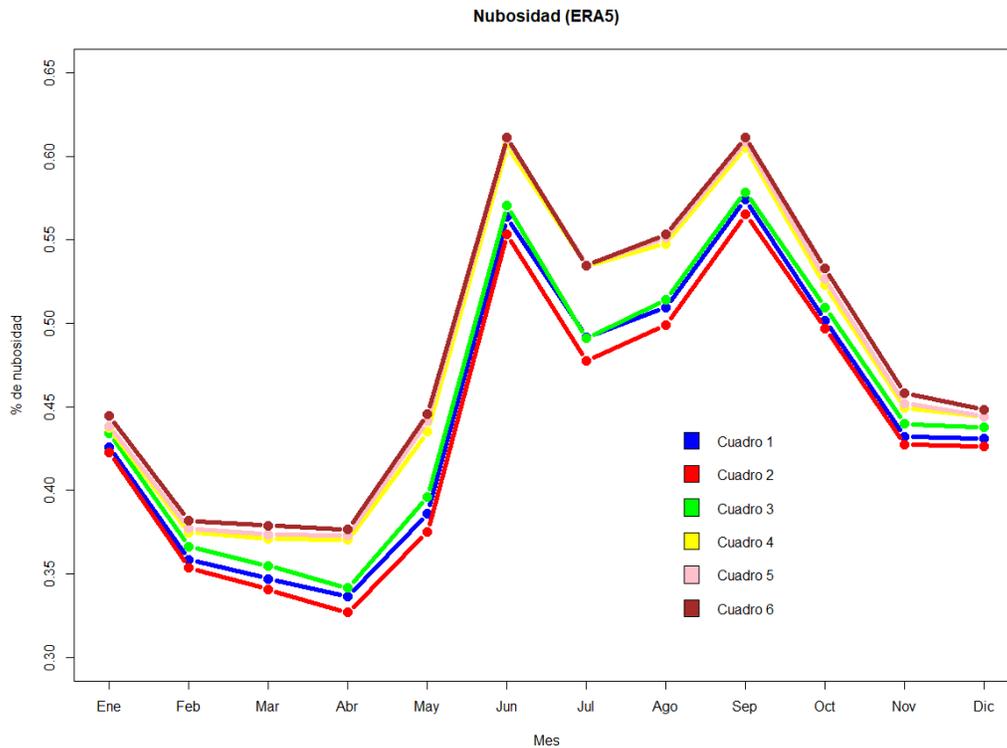


Figura 38 La gráfica de porcentaje de nubosidad con los datos ERA5 donde la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 44.64%, la línea roja representa los valores del cuadro 2 teniendo media de 43.87%, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 45.29%, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 47.48%, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 47.77%, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo media de 48.15%.

Tabla 4 Nubosidad porcentual de datos de reanálisis.

Nubosidad (ERA5) %						
Área	Promedio	Máximo	Mes MAX	Mínimo	Mes min	σ
Cuadro 1	44.64	57.41	Septiembre	33.64	Abril	8.16
Cuadro 2	43.87	56.54	Septiembre	32.69	Abril	8.07
Cuadro 3	45.29	57.86	Septiembre	34.16	Abril	8.07
Cuadro 4	47.48	60.64	Junio	37.02	Abril	8.62
Cuadro 5	47.77	61.02	Junio	37.33	Abril	8.64
Cuadro 6	48.15	61.15	Junio	37.66	Abril	8.53

Se puede observar que el periodo con mayor nubosidad es junio mayormente coincidiendo con picos de menor DNI, así mismo en abril que se tiene el mínimo de nubosidad se tienen los picos más altos de DNI y rapidez de viento, en este caso el cuadro 2 es el de menor nubosidad, sin embargo, tomando en cuenta los valores en conjunto el cuadro 1 sigue siendo mejor, teniendo la segunda menor nubosidad promedio.

En los días nublados disminuirá considerablemente la intensidad de la radiación y por lo tanto el aporte energético que pueda recibir una instalación de energía solar térmica. Aunque la relación entre las variaciones en la nubosidad y la radiación solar es compleja, probablemente



este factor es el más importante a la hora de poder calcular la energía que llega a un punto concreto de la superficie terrestre. Sin embargo, los datos recabados con la estación y con los modelos de reanálisis se toman en superficie, por lo que los efectos de la nubosidad ya se tomaron en cuenta al momento de procesar los datos. Además, que los sistemas de energía solar térmica pueden generar electricidad en climas nubosos o durante la noche usando el calor almacenado en los tanques de sal caliente. Los tanques se encuentran equipados con aislamiento y son capaces de almacenar el calor durante una semana.

Las nubes comprenden fenómenos de reflexión y absorción, afectando la radiación incidente en las celdas solares, y así mismo su desempeño. En un día nublado los paneles solares pueden producir entre un 10 % y un 15 % de su rendimiento típico de los días soleados. Obviamente la cantidad de electricidad producida por estos será inferior al de los días soleados y sin nubes.

Sin embargo, la nubosidad parcial incrementa la generación de energía fotovoltaica, según los resultados de los últimos estudios llevados adelante por investigadores holandeses quienes han concluido que dichas condiciones son más favorables por la forma como la luz se refleja en las nubes, así como la reducción de temperaturas de los módulos que se generan a consecuencia de las sombras intermitentes en los conjuntos, lo que en definitiva contribuye a elevar los picos de energía.



Temperatura a 2 metros (ERA5)

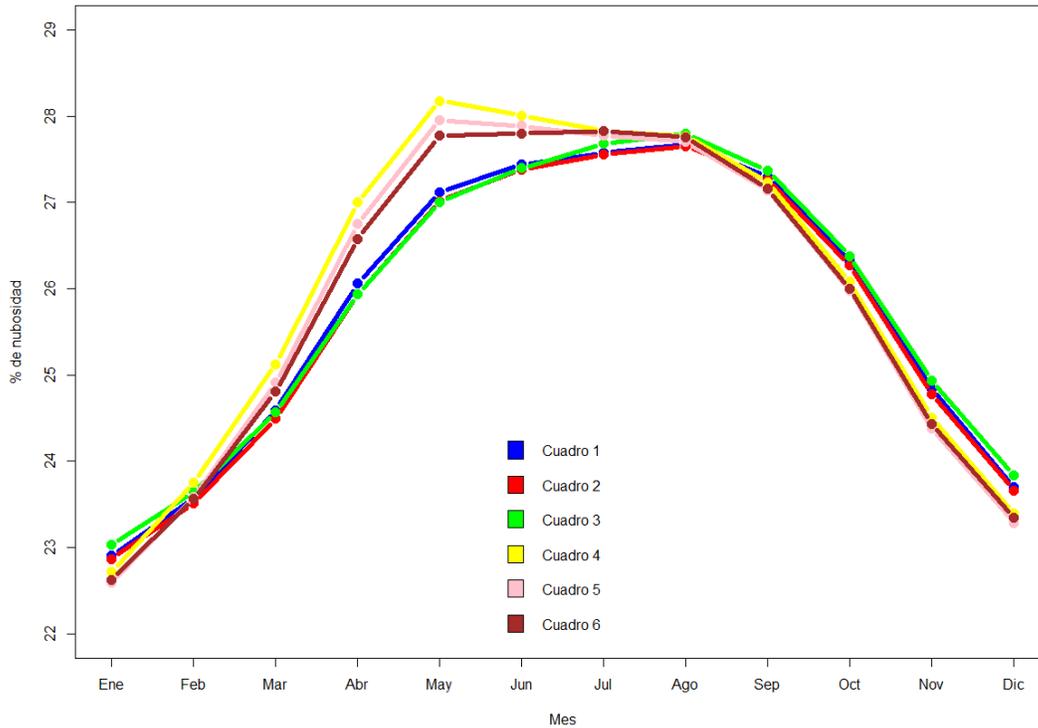


Figura 39 La gráfica de temperatura a 2 metros promedio mensual con los datos ERA5 donde la línea azul representa los valores del cuadro 1 teniendo media de 25.76 °C, la línea roja representa los valores del cuadro 2 teniendo media de 25.70 °C, la línea verde representa los valores del cuadro 3 teniendo media de 25.80 °C, la línea amarilla representa los valores del cuadro 4 teniendo media de 25.97 °C, la línea rosa representa los valores del cuadro 5 teniendo media de 25.83 °C, la línea café representa los valores del cuadro 6 teniendo media de 25.81 °C.

La temperatura de operación de la célula es la temperatura que alcanzan las células solares dependiendo de la temperatura exterior y la irradiación solar. Este valor suele estar entre 43 y 47°C, cuanto menor sea mejor.

Todas las células solares tienen un coeficiente de temperatura, a medida que la temperatura de un panel fotovoltaico aumenta, la potencia generada por el panel disminuye. En general, las células solares monocristalinas tienen un coeficiente de temperatura de $-0,5\% \text{ } ^\circ \text{C}$. Esto significa que un panel solar perderá un 0,5% de su potencia para cada grado superior 25 grados centígrados

Tabla 5 Temperatura a 2m de datos de reanálisis.

Temperatura (ERA5) °C						
Área	Promedio	Máximo	Mes MAX	Mínimo	Mes min	σ
Cuadro 1	25.76	27.67	Agosto	22.90	Enero	1.75
Cuadro 2	25.70	27.65	Agosto	22.87	Enero	1.76
Cuadro 3	25.80	27.80	Agosto	23.03	Enero	1.73
Cuadro 4	25.97	28.18	Mayo	22.72	Enero	1.99
Cuadro 5	25.83	27.96	Mayo	22.60	Enero	1.99
Cuadro 6	25.81	27.82	Julio	22.63	Abril	1.96



Los cuadros 1, 2 y 3 que representan el área costera tiene su máxima temperatura en agosto mientras que el área tierra adentro (cuadro 4, 5 y 6) es en el mes de mayo, toda el área tiene una temperatura mínima en enero.

Con toda la información de las variables presentadas previamente se generaron 7 tablas, una por cada cuadro o área y la ultima de toda el área de estudio en conjunto, con esta presentación de información será más practica la comparación de los datos.

Tabla 6 Resumen de variables de reanálisis por cuadro.

Cuadro 1					
Variabes	Promedio	Máximo	Mínimo	σ	Unidades
DNI	6043.25	6775.99	4825.27	558.03	Wh/m2/día
Rapidez de viento (ERA5)	3.47	4.07	2.90	0.35	m/s
Rapidez de viento (NSRDB)	2.21	2.61	1.73	0.32	m/s
Nubosidad	44.64	57.41	33.64	8.16	%
Temperatura	25.76	27.67	22.90	1.75	°C

Cuadro 2					
Variabes	Promedio	Máximo	Mínimo	σ	Unidades
DNI	5935.87	6687.50	4789.10	572.16	Wh/m2/día
Rapidez de viento (ERA5)	3.34	3.92	2.79	0.34	m/s
Rapidez de viento (NSRDB)	2.23	2.70	1.73	0.36	m/s
Nubosidad	43.87	56.54	32.69	8.07	%
Temperatura	25.70	27.65	22.87	1.76	°C

Cuadro 3					
Variabes	Promedio	Máximo	Mínimo	σ	Unidades
DNI	5926.33	6680.03	4789.26	586.43	Wh/m2/día
Rapidez de viento (ERA5)	3.27	3.80	2.75	0.32	m/s
Rapidez de viento (NSRDB)	2.14	2.54	1.67	0.33	m/s
Nubosidad	45.29	57.86	34.16	8.07	%
Temperatura	25.80	27.80	23.03	1.73	°C

Cuadro 4					
Variabes	Promedio	Máximo	Mínimo	σ	Unidades
DNI	5496.82	6382.53	4683.61	566.30	Wh/m2/día
Rapidez de viento (ERA5)	2.21	2.65	1.79	0.29	m/s
Rapidez de viento (NSRDB)	2.02	2.40	1.58	0.30	m/s
Nubosidad	47.48	60.64	37.02	8.62	%
Temperatura	25.97	28.18	22.72	1.99	°C



Cuadro 5					
Variables	Promedio	Máximo	Mínimo	σ	Unidades
DNI	5433.98	6368.82	4569.21	601.34	Wh/m ² /día
Rapidez de viento (ERA5)	2.11	2.55	1.69	0.28	m/s
Rapidez de viento (NSRDB)	2.04	2.48	1.57	0.33	m/s
Nubosidad	47.77	61.02	37.33	8.64	%
Temperatura	25.83	27.96	22.60	1.99	°C

Cuadro 6					
Variables	Promedio	Máximo	Mínimo	σ	Unidades
DNI	5437.87	6333.72	4573.60	576.89	Wh/m ² /día
Rapidez de viento (ERA5)	2.09	2.51	1.66	0.28	m/s
Rapidez de viento (NSRDB)	1.97	2.35	1.53	0.30	m/s
Nubosidad	48.15	61.15	37.66	8.53	%
Temperatura	25.81	27.82	22.63	1.96	°C

Tabla 7 Resumen de variables de reanálisis toda el área.

Toda el área					
Variables	Promedio	Máximo	Mínimo	σ	Unidades
DNI (NSRDB)	5712.35	6504.30	4705.01	560.21	Wh/m ² /día
DNI (EMA)	5039.43	6206.08	3336.71	912.59	Wh/m ² /día
Rapidez de viento (ERA5)	2.89	3.41	2.39	0.32	m/s
Rapidez de viento (EMA)	3.06	4.12	2.25	0.67	m/s
Rapidez de viento(NSRDB)	2.10	2.51	1.64	0.32	m/s
Nubosidad (ERA5)	46.18	59.06	35.39	8.33	%
Temperatura (ERA5)	25.76	27.66	22.81	1.80	°C
Temperatura (EMA)	25.72	27.75	22.43	1.91	°C

Los valores máximos de DNI, según la Tabla 1, se encuentran entre marzo y mayo, esto coincide con la rapidez de viento máximo en esta región, así mismo los meses de diciembre a enero el DNI es el más bajo registrado, teniendo un impacto con la menor temperatura registrada, la rapidez de viento tiene un impacto en la nubosidad, entre abril y mayo que hay una mayor rapidez de viento hay menor nubosidad y con menor rapidez de viento en agosto, la nubosidad aumenta. Estas variables también se ven muy influenciadas por los efectos de rotación y traslación de la tierra.

6 Discusión

La radiación normal directa es el único componente de la radiación solar que es verdaderamente intermitente ya que puede variar desde su valor máximo de $1\text{kW}/\text{m}^2$ a cero en cuestión de minutos. Esto se debe a que a la radiación directa normal le afectan los factores variables como la posición, la profundidad óptica o la velocidad de las nubes, con el rayo solar directo, así que es extremadamente difícil prevenir su precisión.

Debido a que la energía solar concentrada y la energía solar fotovoltaica utilizan la misma fuente de energía, el sol, son a menudo se comparadas entre sí. La CSP experimentó un gran crecimiento de un 139% en los últimos años, desde el 2012 al 2019, debido a la caída de los precios de la fabricación de paneles y el crecimiento modular, según fuentes de Energía Estratégica.

Sin embargo, existen notables diferencias entre la CSP y la PV, lo que da como resultado que la termosolar esté en un mercado competitivo contra el gas para la generación en la noche, en lugar de competir contra PV durante el día.

La termosolar utiliza una forma diferente de insolación que la fotovoltaica, el DNI, que se encuentra mejor en regiones desérticas, mientras que PV utiliza la radiación horizontal global (GHI), que está más ampliamente disponible a nivel mundial, incluso en latitudes más altas.

Una central eléctrica generadora de energía térmica, la termosolar tiene más en común con las centrales térmicas como el carbón o el gas o la energía geotérmica. Una central termosolar puede incorporar almacenamiento de energía térmica, que almacena energía en forma de calor sensible o como calor latente (por ejemplo, usando sales fundidas), lo que permite que estas centrales continúen generando electricidad cuando sea necesario, de día o de noche, a diferencia de la energía eólica y la fotovoltaica.

Para comprobar la viabilidad del uso de este tipo de tecnologías se comparará la información obtenida con las plantas termosolares que actualmente están operando en el mundo y el tipo específico de tecnología CSP que emplea cada una

- El proyecto Noor Energy 1, Incluye una planta de energía termosolar de torre, de 100 MW, tres con tecnología cilindro parabólica, de 200 MW, y otros 250 MW de capacidad fotovoltaica. Localizada en Dubai, UAE. Con un de DNI $5.2041\text{ kWh}/\text{m}^2/\text{día}$. (ACWA power)
- El complejo Ivanpah formado por más de 300,000 espejos, a plena capacidad, el trío de torres elevadas de 137.16 metros de altura cada una, producen en conjunto un total de 392 MW de energía, una electricidad suficiente para suministrar energía limpia a 140,000 hogares californianos. Localizada en California, Con un DNI $7.3680\text{ kWh}/\text{m}^2/\text{día}$. (The Department of Energy's Loan Programs Office)
- La planta termosolar de torre central con heliostatos y receptor de sales Noor Ouarzazate III tiene una capacidad de producción bruta de 150 MW y un sistema de almacenamiento de 7.5 horas de producción. Como elemento clave de la planta, destaca el receptor solar de alta potencia de SENER, con más de 600 MW térmicos, ubicado en la torre de 250 m de altura. Combina canal



parabólico y torre en tres secciones para un total de 510 MW. localizada en Marruecos con un DNI 7.0102 kWh/m²/día. (SENER Energy)

- NOOR Midelt I proyecto termosolar en Midelt, con 800 MW, con 5 horas de almacenamiento de energía térmica al día, y combinando CSP y fotovoltaica. Localizada en Midelt, Marruecos con un DNI 6.3802 kWh/m²/día. (European commission)
- El proyecto CSP Dhursar de India Reliance Power la planta de energía solar concentrada es parte de la primera fase del ambicioso programa indio, la Misión Solar Nacional Jawaharlal Nehru, que tiene como objetivo establecer 22 MW de capacidad de energía solar para 2022. Con un DNI 4.9522 kWh/m²/día. (The National Renewable Energy Laboratory is a national laboratory of the U.S. Department of Energy)
- Planta termosolar de Alvarado Conectada a red en septiembre de 2009, la de Alvarado fue la primera de las cinco plantas termosolares. Sus 50 MW de potencia pueden generar electricidad limpia equivalente al consumo de unos 28.000 hogares, a partir de la energía calorífica del sol. Situada en Alvarado, Badajoz, España con un DNI 6.0440 kWh/m²/día. (Acciona)

Se ha demostrado que la tecnología CSP es actualmente factible económicamente en regiones con niveles de DNI por encima de 2,000 kWh/m²/año; sin embargo, no hay ninguna razón técnica por la que las plantas con CSP no puedan trabajar con niveles de DNI inferiores. Varios autores plantean que las regiones con una DNI promedio de más de 1,750 kWh/m²/año en las que se focalizan la construcción de las centrales termosolares. Según los datos de la EMA, presente en el área de estudio, se tendría 1844.64 kWh/m²/año, pero según NSRDB se tiene 2089.86 kWh/m²/año por lo que según los datos es factible una implementación de tecnología CSP en la región, cabe señalar que los valores anuales resultan de la multiplicación de sus respectivos valores de DNI diarios por 366 días.

Existen un nuevo tipo de tecnologías fotovoltaicas como El MF45 es un sistema fotovoltaico ultra-plano de alta concentración y muy alta eficiencia, con potencial para convertir el equivalente a un 45% de la radiación solar directa en electricidad. La alta eficiencia se logra gracias a la simplicidad y alto rendimiento del sistema óptico, más la utilización de técnicas de división del espectro solar y captación de radiación global difusa, empleando para ello dos tipos de células: multiunión (MJ) de alta concentración/eficiencia, y silicio (Si) de bajo coste. Este sistema patentado, es rentable por la reducida inversión en materiales (reducido número y realizables por técnicas de producción en masa), pero sobre todo por su alta eficiencia, un 30% superior a los mejores módulos de concentración.

También hay que tener en cuenta los requisitos para el emplazamiento de una planta eólica tradicional que son:

- Respetar la avifauna del entorno, estableciendo si es preciso un paso para aves migratorias entre grupos de aerogeneradores, esto requiere una manifestación de impacto ambiental.
- Lejanía de más de un kilómetro con núcleos urbanos para evitar la contaminación acústica de los parques eólicos.
- La energía eólica debe estar instalada en suelo no urbanizable, generalmente.
- No interferencia con señales electromagnéticas del entorno, ya que señales de televisión, radio o telefonía se pueden ver perjudicadas si no se instalan otros dispositivos que lo eviten.



En la península de Yucatán existen 2 plantas eólicas tradicionales que pueden sustentar la implementación de esta tecnología en el área de estudio.

- El Parque Eólico de Dzilam (Eólica del Golfo 1) cuenta con una capacidad de generación de 70 MW, que dota al sistema eléctrico peninsular de aproximadamente 270 GWh año, equivalente al abastecimiento de 170 mil hogares por ese mismo tiempo. La velocidad promedio del viento por hora en Dzilam de Bravo tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año. La parte más ventosa del año dura 7.5 meses, del 13 de octubre al 29 de mayo, con velocidades promedio del viento de más de 9.9 km/h. El día más ventoso del año es el 14 de marzo, con una velocidad promedio del viento de 11.6 km/h. El tiempo más calmado del año dura 4.5 meses, del 29 de mayo al 13 de octubre. El día más calmado del año es el 26 de agosto, con una velocidad promedio del viento de 8.2 km/h.
- Parque Eólico Progreso, con 90 MW de capacidad de generación de energía eléctrica, que produce más de 303 GWh año, con una vida útil de aproximadamente 30 años. La velocidad promedio del viento por hora en Progreso tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año. La parte más ventosa del año dura 7.7 meses, del 16 de octubre al 5 de junio, con velocidades promedio del viento de más de 13.4 km/h. El día más ventoso del año es el 22 de marzo, con una velocidad promedio del viento de 15.5 km/h. El tiempo más calmado del año dura 4.3 meses, del 5 de junio al 16 de octubre. El día más calmado del año es el 26 de agosto, con una velocidad promedio del viento de 11.4 km/h.

Según los datos de la EMA en el área de estudio hay una rapidez de viento de 11.02 km/h, mientras que los datos del ERA5 dan un valor de 10.40 km/h, sin embargo, la NSRDB que cuenta con más datos arroja un valor de solo 7.56 km/h. como se aprecia existe una relativa baja rapidez de viento para utilizar una planta eólica tradicional, pero existe la propuesta de usar WTES.

Con respecto a la energía eólica la diferencia de temperaturas entre una superficie marina y la del aire circundante es mucho menor que la diferencia presente en tierra, sobre todo, durante el día implica una menor turbulencia que en tierra, por tanto, un menor nivel de fatiga mecánica, que se manifiesta en una mayor duración de los componentes. Dicha duración podría estimarse en torno a los 25-30 años, mientras que en tierra la duración sería de 20 años. Los componentes del aerogenerador han sido diseñados para trabajar en un rango de temperaturas. Si los límites de temperaturas se sobrepasan, es probable que existe un fallo o una sobrecarga en el sistema. Algunos componentes cuya temperatura se monitoriza continuamente son: temperatura del aceite de los engranajes de la multiplicadora, temperatura de los devanados del transformador de potencia, temperatura del generador, temperatura de los frenos del rotor, etc. (Amada)

Muchos elementos empleados en WTES pueden adquirirse localmente ya que los elementos empleados en WTES se clasifican en una clase de cosas de "baja tecnología". El material más voluminoso para el almacenamiento de energía térmica puede obtenerse localmente cuando se emplea el sistema de almacenamiento de energía térmica de tipo sólido. Los trabajos de construcción y mantenimiento amplían el empleo local y la economía.

El material más voluminoso utilizado en WTES es el medio de almacenamiento térmico, almacenamiento necesario para el uso de CSP por lo que un sistema híbrido es muy factible, que consiste en nitratos. Los

nitratos son también conocidos como materia prima para el fertilizante. Pocos materiales químicos peligrosos se emplean en WTES. WTES permite una baja velocidad de rotación de las cuchillas debido al generador de calor, esto lleva a bajo ruido y baja vibración. El generador de calor puede realizar el sistema sin engranajes, que es confiable y silencioso, con un costo razonable.

Dado que se propone la utilización de un divisor de espectro o en su defecto la utilización de energía fotovoltaica tradicional para complementar la energía termosolar es necesario tomar en cuenta la nubosidad y sus repercusiones con este tipo de energía.

Frank Kreuvel, científico de datos de la compañía holandesa, afirma que el reflejo de la luz causado por las nubes origina unas condiciones óptimas para la generación de energía solar. Además, cuando las nubes crean sombras encima de los paneles durante poco tiempo, se ayuda a su proceso de reducción de temperatura, así como aumentan su rendimiento. Su investigación afirma que el frecuente intervalo de 15 minutos utilizado para analizar la producción de energía solar, la investigación encontró que el mayor pico de potencia a alta resolución se registró en un sistema fotovoltaico residencial, llegando a ser un 22% más alto que el promedio de 15 minutos. También dijeron que la correspondiente irradiación observada era también más alta en alrededor del 18%. (Kreuvel, 2020)

Las celdas solares fotovoltaicas están elaboradas a base de silicio puro, material cristalino semiconductor, con adición de impurezas de ciertos elementos químicos; dispositivos sólidos excitables al recibir la luz solar y que son capaces de generar pequeñas cantidades de electricidad debido al flujo de electrones del interior de los materiales y la diferencia de potencial. Las células reaccionan tanto con luz solar directa como con luz difusa por lo que pueden seguir produciendo electricidad en días nublados.

7 Conclusiones

La tecnología CSP que se propone es torre de energía solar (SPT) puesto que la eficiencia solar-eléctrica para este tipo de planta de energía varía del 20% al 35%. Estos sistemas tienen relaciones de concentración más altas en comparación con los sistemas de enfoque lineal y esto permite que los receptores térmicos funcionen a temperaturas más altas con pérdidas reducidas.

Por medio de comparación teórica se demuestra que el área de estudio tiene un potencial de aprovechamiento mayor de lo estimado para los cálculos de varios estudios en los que se basa esta tesis, cubriendo prácticamente todo el requerimiento con la tecnología de almacenamiento térmico solar. Los sistemas de almacenamiento térmico pueden proporcionar la combinación de una gran independencia de ubicación y rentabilidad.

Se sugiere que se use un divisor de haz para dividir la energía en el receptor en dos o tres bandas de longitud de onda, de modo que cada haz se pueda usar de manera más efectiva, especialmente donde el rendimiento del dispositivo de conversión de energía es sensible a la longitud de onda. Una posible motivación para hacer esto sería aplicar longitudes de onda seleccionadas a un proceso de conversión fotovoltaica y usar el resto para la conversión térmica. La aplicación más simple sería montar células solares transparentes frente al receptor, con toda la luz no utilizada por las células fotovoltaicas transmitidas al receptor. Un receptor térmico es generalmente un absorbente de banda ancha, y absorbería todo el haz solar de manera bastante efectiva: realmente no se desperdiciará nada.

Con respecto a la energía eólica, sabemos que la velocidad promedio de las turbinas de viento comerciales trabajan de 4 m/s a 25 m/s, teniendo un valor inferior a este se propone el uso de WTES porque permite una baja velocidad de rotación de las cuchillas debido al generador de calor de luz de par completo. Esto lleva a bajo ruido y baja vibración.

Al igual que los sistemas fotovoltaicos, las turbinas eólicas pueden ampliarse con sistemas de almacenamiento de energía para garantizar una generación de energía orientada a la demanda.

Se determina que el área denominada cuadro 1 tiene el potencial suficiente para la implementación local de todas las tecnologías anteriores, teniendo un potencial solar bastante elevado.

Estos se resumen a continuación.

- a) Aprovechamiento energético total de la energía eólica física.
- b) Bajo impacto ambiental.
- c) Efectos en la economía local.

Bibliografía

(12 de 04 de 2021). Obtenido de ERA5-Land hourly data from 1981 to present:

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=form>

Acciona. (s.f.). Obtenido de <https://www.acciona-mx.com/proyectos/energia/termosolar/termosolar-alvarado/>

ACWA power. (s.f.). Obtenido de <https://www.acwapower.com/en/projects/noor-energy-1/>

Ahmadi, M. H. (2018). Solar power technology for electricity generation: A critical review. *Energy Science & Engineering*, 1–22.

Amada, J. M. (s.f.). CURSO DE ENERGÍA EÓLICA. *Master Europeo en Energías Renovables y Eficiencia Energética*. Zaragoza: Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.

ANES. (2017). *Asociación Nacional de Energía Solar*. Obtenido de <http://www.anes.org/cms/index.php>

Cao, K.-K. (2018). Expanding the horizons of power-to-heat: Cost assessment for new space heating concepts with Wind Powered Thermal Energy Systems. *Energy*, 925e936.

Chadegania, E. A. (2018). Comprehensive assessment of a multi-generation system integrated with a desalination system: Modeling and analysing. *Energy Conversion and Management*, 20-32.

European commission. (s.f.). Obtenido de https://ec.europa.eu/eu-external-investment-plan/projects/noor-midelt-i-and-ii-solar-power-plants_en

Ficha SIMEC. (25 de 04 de 2019). Obtenido de Ría Lagartos:
<https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=57®=9>

Garrison, J. (2011). An integrated energy storage scheme for a dispatchable solar and wind powered energy system. *J. Renew. Sustain. Energy*, 1–13.

Global Wind Statistics. (4 de Marzo de 2016). Obtenido de GWEC: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR_corrected.pdf.

Heidinger, A. K. (3 de julio de 2014). *NOAA Climate Data Record (CDR) of Reflectance and Brightness Temperatures from AVHRR Pathfinder Atmospheres - Extended (PATMOS-x), Version 5.3*. Obtenido de National Centers for Environmental Information:
<https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00837>

Hu, Y. (2017). A Chance-Constrained Economic Dispatch Model in Wind-Thermal-Energy Storage System. *energies*, 326.

Husband, W. (2008). Low-grade heat-driven Rankine cycle, a feasibility study. *Int. J. Energy Res*, 1373–1382.

IEA. (2010). *Technology Roadmap Concentrating Solar Power*. París.

IEA. (2012). *Technology Roadmap: Solar Heating and Cooling*. Paris.

IEA. (2014). *Technology Roadmap Solar Thermal Electricity*. París.

Iqbal, M. (1983). *AN INTRODUCTION TO SOLAR RADIATION*. Vancouver, British Columbia, Canada: ACADEMIC PRESS.



- Islam, M. T. (2018). A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 987–1018.
- Islam, S. (2017). Development of a novel solar-based integrated system for desalination with heat recovery. *Applied Thermal Engineering*.
- Jones, B. W. (2015). Evaluation of distributed building thermal energy storage in conjunction with wind and solar electric power generation. *Renewable Energy*, 699–707.
- Karasu, H. (2018). Analysis and Efficiency Assessment of Direct Conversion of Wind Energy into Heat Using Electromagnetic Induction and Thermal Energy Storage. *Journal of Energy Resources Technology*.
- Kreuevel, F. (2020). Analysis of high frequency photovoltaic solar energy fluctuations. *Solar Energy*.
- Liu, C. (2017). A Wind Power Plant with Thermal Energy Storage for Improving the Utilization of Wind Energy. *Energies*, 2126.
- Lovegrove, K. (2012). Fundamental principles of concentrating solar power (CSP) systems. En K. Lovegrove, *Concentrating solar power technology Principles, developments and applications* (págs. 16-67). Australia: Woodhead Publishing Limited.
- Lovegrove, K. (2012). Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. En K. Lovegrove, *Concentrating solar power technology Principles, developments and applications* (págs. 3-15). Australia: Woodhead Publishing Limited.
- Okazaki, T. (2015). Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy*, 332-338 83.
- Ozlu, S. (2015). Development and analysis of a solar and wind energy based multigeneration system. *Solar Energy*, 1279–1295.
- Ozlu, S. (2016). Analysis and evaluation of a new solar energy-based multigeneration system. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*.
- Ramos-Zapata, J. (2017). *Ecología funcional de la Reserva de la Biósfera de Ría Lagartos*. Mérida: Secretaría de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del Estado de Yucatán.
- Reddy, V. S. (2014). Exergetic analysis and economic evaluation of central tower receiver solar thermal power plant. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, 38:1288–1303.
- REN21. (2017). *Renewables 2017: Global Status Report*. París.
- Şahin, A. (2006). Thermodynamic analysis of wind energy. *Int. J. Energy Res*, 553–566.
- SENER. (s.f.). Obtenido de <https://www.energy.sener/es/proyecto/planta-termosolar-torre-central-nooro-iii>
- SENER. (2016a). *Comité de Gestión por Competencias de Energía Renovable y Eficiencia Energética*. México.
- SENER. (2016b). *Balance Nacional de Energía 2015*. México.
- Sezer, N. (2019). Design and analysis of an integrated concentrated solar and wind energy system with storage. *International Jurnal of Energy Research*, 1–21.



SHIP-PLANTS. (4 de septiembre de 2017). *SHIP= Solar Heat for Industrial Processes*. Obtenido de <http://ship-plants.info/solar-thermal-plants>

The Department of Energy's Loan Programs Office . (s.f.). Obtenido de <https://www.energy.gov/lpo/ivanpah>

The National Renewable Energy Laboratory (NREL). (s.f.). Obtenido de https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/?aL=x8Cl3i%255Bv%255D%3Dt%26VRLt_G%255Bv%255D%3Dt%26VRLt_G%255Bd%255D%3D1%26ozt_aP%255Bv%255D%3Dt%26ozt_aP%255Bd%255D%3D2&bL=clight&cE=0&IR=0&mC=21.392983408567293%2C-88.18244934082031&zL=10

The National Renewable Energy Laboratory is a national laboratory of the U.S. Department of Energy. (s.f.). Obtenido de <https://solarpaces.nrel.gov/dhursar>

Vant-Hull, L. L. (2012). Central tower concentrating solar power (CSP) systems. En K. Lovegrove, *Concentrating solar power technology Principles, developments and applications* (págs. 240-283). USA: Woodhead Publishing Limited.

Weiss, W. (2017). *Solar Heat Worldwide Global Market Development and Trends in 2016*. Austria.

Werner, S. (s.f.). *The European heat market, work package 1*. Obtenido de Final Report: https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/02/Ecoheatcool_WP1_Web.pdf

Yilmaz, S. (2016). Modeling and Designing of the Solar Thermal Parabolic Trough Concentrator and Its Environmental Effects. *Environmental Progress & Sustainable Energy*.

Yue, C.-D. (2019). Prediction of Power Generation by Offshore Wind Farms Using Multiple Data Sources. *Energies*, 12, 700.