

Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería de la Energía

Viabilidad de una Planta Desaladora Híbrida: Energía
Fotovoltaica y Gradiente Térmico Oceánico (OTEC)

Autor: Manuel Rodriguez Bermudez

Tutor: Dra. Lourdes Garcia Rodriguez

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de la Energía

Viabilidad de una Planta Desaladora Híbrida: Energía Fotovoltaica y Gradiente Térmico Oceánico (OTEC)

Autor:

Manuel Rodríguez Bermúdez

Tutor:

Dra. Lourdes García Rodríguez

Catedrática de Universidad

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Proyecto Fin de Carrera: Viabilidad de una Planta Desaladora Híbrida: Energía Fotovoltaica y Gradiente
Térmico Oceánico (OTEC)

Autor: Manuel Rodríguez Bermudez

Tutor: Lourdes García Rodríguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mi profesora Lourdes

Agradecimientos

Hacer este proyecto ha sido un proceso más de aprendizaje, con acelerones, frenadas... y aunque ha habido ciertos baches en este proceso, ya puedo decir que finalizo una etapa de mi vida que me ha enseñado mucho en distintos aspectos de la vida. Una vez finalizado mi trabajo de fin de grado, sólo me queda agradecer, ante todo, a mi tutora, Lourdes García Rodríguez, por su confianza, paciencia y comprensión conmigo, durante este proceso. Sus conocimientos, generosidad y experiencia me han servido de gran ayuda para poder realizar este trabajo de fin de grado. Ha sido un fuerte apoyo y pilar de comprensión, paciencia por lo que les estaré eternamente agradecido.

Manuel Rodríguez Bermudez

ETSI Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

La hibridación de la energía por gradiente térmico oceánico y la energía solar fotovoltaica puede ser una solución interesante para abastecer de energía eléctrica a una planta desalinizadora. El gradiente térmico oceánico se basa en la diferencia de temperatura entre la superficie del mar y las capas más profundas, que puede aprovecharse para generar electricidad mediante el uso de un ciclo termodinámico. Por otro lado, la energía solar fotovoltaica es una tecnología ampliamente utilizada y probada que convierte la energía del sol en electricidad mediante el uso de células fotovoltaicas.

La combinación de ambas tecnologías puede proporcionar una fuente de energía más fiable y estable, ya que el gradiente térmico oceánico se produce de manera constante durante todo el año, mientras que la energía solar fotovoltaica es más variable dependiendo de la hora del día, la época del año y las condiciones climáticas. Además, la hibridación permite aprovechar las ventajas de cada tecnología y reducir las limitaciones y desventajas que ofrecen cada una.

La viabilidad de este sistema dependerá de varios factores, como la ubicación de la planta desalinizadora, la disponibilidad de recursos energéticos renovables en la zona, la demanda de agua y energía eléctrica. Es importante realizar un análisis detallado de estos factores para determinar la viabilidad de la hibridación de la energía por gradiente térmico oceánico y la energía solar fotovoltaica para abastecer una planta desalinizadora en una ubicación específica.

The hybridization of ocean thermal gradient energy and photovoltaic solar energy can be an interesting solution to supply electrical energy to a desalination plant. The ocean thermal gradient is based on the temperature difference between the sea surface and the deeper layers, which can be used to generate electricity through the use of a thermodynamic cycle. On the other hand, solar photovoltaics is a widely used and proven technology that converts the sun's energy into electricity through the use of photovoltaic cells.

The combination of both technologies can provide a more reliable and stable energy source, since the ocean thermal gradient occurs constantly throughout the year, while solar photovoltaic energy is more variable depending on the time of day, season of the year and climatic conditions. Furthermore, hybridization makes it possible to take advantage of the advantages of each technology and reduce the limitations and disadvantages that each one offers.

The viability of this system will depend on several factors, such as the location of the desalination plant, the availability of renewable energy resources in the area, the demand for water and electrical energy. A detailed analysis of these factors is important to determine the feasibility of hybridizing ocean thermal gradient energy and solar photovoltaics to power a desalination plant at a specific location.

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	14
Índice de Figuras	15
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivo</i>	1
1.2 <i>Energía Solar Fotovoltaica</i>	1
1.3 <i>Energía Maremotérmica</i>	3
1.3.1 Sistema (OTEC) Ciclo Abierto	3
1.3.2 Sistema (OTEC) Ciclo Cerrado	4
1.3.3 Sistema (OTEC) Ciclo Híbrido	5
2 Localización del emplazamiento	9
2.1 <i>Localización</i>	9
2.2 <i>Recursos Energéticos del Emplazamiento</i>	10
2.2.1 Energía Solar Fotovoltaica	10
2.2.2 Energía por Gradiente Térmico Oceánico.	11
3 Estudio Tecnología Fotovoltaica	11
4 Estudio Termodinámico de la planta OTEC	16
4.1 <i>Modelación del sistema</i>	18
4.2 <i>Consideraciones Iniciales</i>	18
4.2.1 Flujo Frío	18
4.2.2 Flujo Caliente	19
4.2.3 Eficiencia de turbinas, bombas y generador.	19
4.3 <i>Ciclo Híbrido</i>	20
4.3.1 Resultados Ciclo Rankine.	25
4.3.2 Resultado Ciclo Híbrido (OTEC)	28
5 Resultados Hibridación Fotovoltaica y OTEC	33
6 Consumo Planta Desaladora	41
7 Conclusión	44
Referencias	45
ANEXO	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del Recurso Solar “Irradiación Directa Normal”.	2
Figura 2. Mapa de Recurso Solar “Irradiación Global Horizontal”.	2
Figura 3. Esquema del ciclo abierto OTEC. Elaboración Propia.	4
Figura 4. Esquema del ciclo cerrado OTEC. Elaboración Propia.	5
Figura 5. Esquema del ciclo híbrido OTEC. Elaboración Propia.	6
Figura 6. Geolocalización de la central.	9
Figura 7. Irradiación Global en Filipinas.	10
Figura 8. Variación de la temperatura con la profundidad.	11
Figura 9. Distribución de los gradientes temperatura del océano.	11
Figura 10. Localización del emplazamiento de la planta fotovoltaica “PVSyst”.	11
Figura 11. Introducción de los datos meteorológicos del emplazamiento. “PVSyst”.	11
Figura 12. Parámetros de simulación. “PVSyst”	12
Figura 13. Parámetros del campo. “PVSyst”	12
Figura 14. Diagrama de Sankey.”PVSyst”	13
Figura 15. Tabla Sumas mensuales por hora de energía entregada a la red [MWh].	14
Figura 16. Gráfica sumas mensuales por hora de energía entregada a la red [MWh].	14
Figura 17. Diagrama Potencia [MWh] – Meses.”PVSyst”	15
Figura 18. Balances y Resultados principales de la simulación. “PVSyst”.	15
Figura 17. Ciclo Híbrido OTEC. Elaboración Propia	17
Figura 18. Eficiencias en turbinas, bombas y generador.	20
Figura 19. Ciclo termodinámico Rankine.	25
Figura 20. Resultados propiedades termodinámicas con fluido de trabajo R717. Simulación Cyclepad.	26
Figura 21. Resultados elementos del ciclo con fluido de trabajo R717. Simulación Cyclepad.	26
Figura 22. Resultados del ciclo con fluido de trabajo R717. Simulación Cyclepad	27
Figura 23. Resultados propiedades termodinámicas con fluido de trabajo R-22. Simulación Cyclepad.	27
Figura 24. Resultados elementos del ciclo con fluido de trabajo R-22. Simulación Cyclepad.	27
Figura 25. Resultados del ciclo con fluido de trabajo R-22. Simulación Cyclepad.	28
Figura 26. Propiedades termodinámicas del ciclo híbrido (R717).	28
Figura 27. Propiedades termodinámicas del ciclo híbrido (R-22).	29
Figura 28. Tabla de resultados de las principales ecuaciones de los componentes del ciclo.	29

Figura 29. Tabla potencia real transmitida.	30
Figura 30. Tabla generación de energía mensual OTEC	31
Figura 31. Gráfico de generación de energía mensual OTEC.	31
Figura 32. Tabla de la suma mensual por hora de energía entregada a la red.	32
Figura 33. Suma mensual por hora de energía entregada a la red.	32
Figura 34. Comparativa de la producción de energía fotovoltaica y OTEC, así como su combinación de los meses Enero, Febrero y Marzo.	33
Figura 35. Comparativa de la producción de energía fotovoltaica y OTEC, así como su combinación de los meses Abril, Mayo y Junio.	34
Figura 36. Comparativa de la producción de energía fotovoltaica y OTEC, así como su combinación de los meses Julio, Agosto y Septiembre.	34
Figura 37. Comparativa de la producción de energía fotovoltaica y OTEC, así como su combinación de los meses Octubre, Noviembre y Diciembre.	34
Figura 38. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de enero.	35
Figura 39. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de febrero.	35
Figura 40. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de marzo.	36
Figura 41. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de abril.	36
Figura 42. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de mayo.	36
Figura 43. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de junio.	37
Figura 44. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de julio.	37
Figura 45. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de agosto.	37
Figura 46. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de septiembre.	38
Figura 47. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de octubre.	38
Figura 48. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de noviembre	38
Figura 49. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo diciembre.	39
Figura 50. Tabla de potencia generada FV, OTEC y conjunta mensualmente y total anual.	39
Figura 51. Gráfica de potencia generada FV, OTEC y conjunta mensualmente y total anual.	40
Figura 52. Tabla consumo energético por m ³ [3kWh/m ³] y energía disponible [MWh]	42
Figura 53. Tabla consumo energético por m ³ [4kWh/m ³] y energía disponible [MWh]	42
Figura 54. Tabla consumo energético por m ³ [3kWh/m ³] y energía disponible [MWh]	43

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

En la actualidad, el uso de recursos energéticos como el petróleo y los combustibles fósiles sigue teniendo gran protagonismo en nuestra sociedad, con lo que ello conlleva (emisiones de gases invernadero, daños perjudiciales para la salud...)

Aquí es cuando hacemos énfasis en las energías renovables, que proceden de fuentes naturales de energía y que una de las muchas ventajas que tienen son sus emisiones casi nulas o nulas. El uso de las energías renovables tiene un amplio abanico de aplicabilidad, no solo es aplicable para producir energía eléctrica para su posterior venta a la red, si no que puede ser un papel importante en muchas otras aplicaciones como lo son la producción de energía térmica necesaria en una industria, tratamiento de aguas y aplicaciones de desalación de agua. El objetivo de este proyecto va a consistir en realizar un análisis técnico de la posible hibridación de la tecnología fotovoltaica y la energía por gradiente térmico oceánico (OTEC) para abastecer energéticamente una planta de desalación. El análisis va a consistir en un primer estudio de la producción de energía fotovoltaica del emplazamiento seleccionado, seguido de un estudio termodinámico de la tecnología maremotérmica (OTEC), una comparativa y análisis de la posible hibridación de ambas tecnologías para el abastecimiento eléctrico de una planta desaladora.

1.2 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se define como un sistema de generación de energía eléctrica que emplea células fotovoltaicas para convertir la radiación solar en electricidad de manera directa. Estas células fotovoltaicas, generalmente compuestas de materiales semiconductores, aprovechan el efecto fotovoltaico para liberar electrones cuando son expuestas a la luz solar.

El proceso implica la generación de una corriente eléctrica mediante la excitación de electrones en la estructura de la célula fotovoltaica, lo que crea un flujo de electricidad utilizable. Esta electricidad puede ser utilizada directamente para alimentar dispositivos eléctricos o almacenada en sistemas de baterías para su uso futuro.

El desarrollo de la tecnología fotovoltaica ha avanzado significativamente en las últimas décadas, convirtiéndose en una fuente importante de energía renovable y sostenible.

La irradiación solar se puede clasificar en varias formas según cómo llega la radiación solar a la superficie terrestre. En este contexto podemos destacar dos formas de irradiación:

- **Irradiación Directa Normal (IDN):** Se refiere a la cantidad de radiación solar que llega directamente del sol a un metro cuadrado de una superficie perpendicular a los rayos solares.
 - Composición: Esta componente de radiación solar no incluye la radiación difusa ni la reflejada, ya que solo considera la porción directa que no ha sido dispersada en la atmósfera.

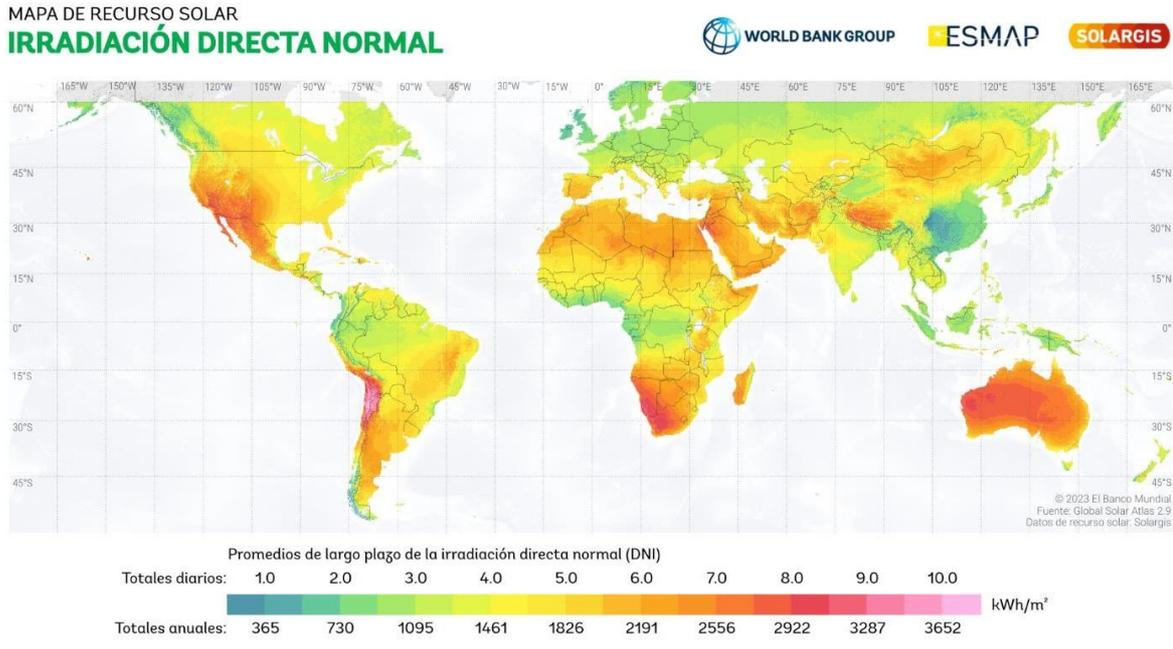


Figura 1. Mapa del Recurso Solar “Irradiación Directa Normal”.

- **Irradiación Global Horizontal (IGH):** Se refiere a la cantidad total de radiación solar incidente que llega a un metro cuadrado de una superficie horizontal en la Tierra.
 - Composición: Incluye la radiación directa (que proviene directamente del sol), la radiación difusa (que se dispersa en la atmósfera y llega desde todas las direcciones) y la radiación reflejada desde otras superficies.

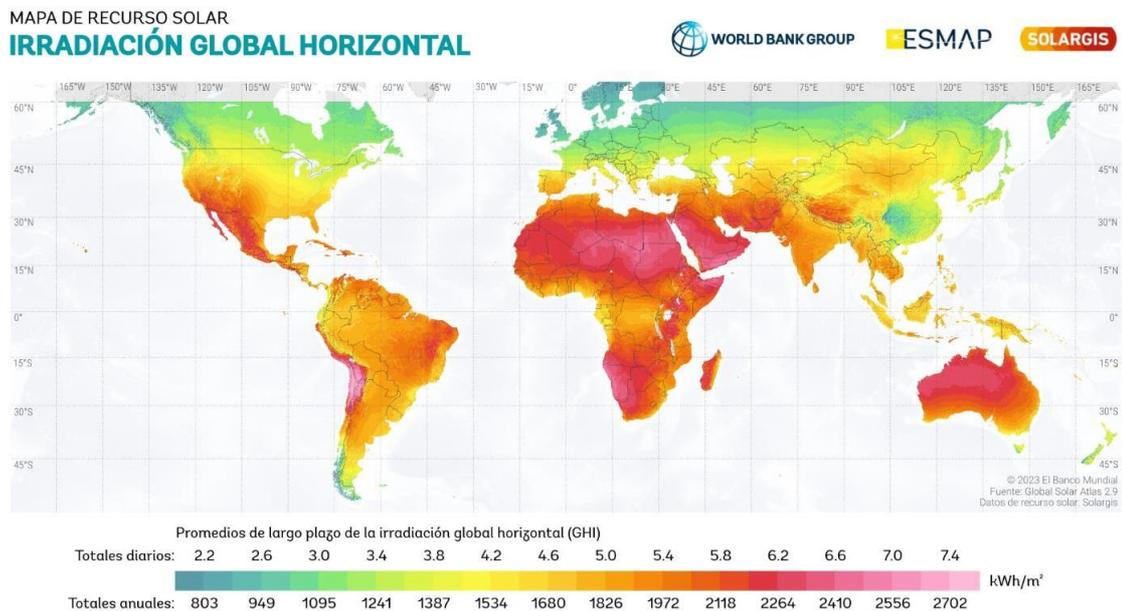


Figura 2. Mapa de Recurso Solar “Irradiación Global Horizontal”.

En resumen, la irradiación global horizontal abarca toda la radiación solar incidente en una superficie horizontal, incluyendo la directa, la difusa y la reflejada. Mientras tanto, la irradiación directa normal se centra específicamente en la componente directa del sol que llega a una superficie perpendicular a los rayos solares.

1.3 Energía Maremotérmica

La energía maremotérmica o energía de gradiente térmico oceánico (OTEC) es un tipo de energía renovable que se obtiene aprovechando las diferencias de temperaturas entre las capas profundas y superficiales del océano.

Este tipo de energía renovable tiene el potencial de proporcionar una fuente de energía constante y predecible, ya que las diferencias de temperatura en los océanos tienden a ser estables a lo largo del tiempo. Sin embargo, hasta ahora, la implementación a gran escala de esta tecnología ha enfrentado desafíos técnicos y económicos, y su desarrollo y adopción son aún limitados en comparación con otras fuentes de energía renovable.

Para la posibilidad y viabilidad de implantar este tipo de tecnología es necesario una serie de requisitos:

- Accesibilidad para el bombeo de agua fría.
- Accesibilidad para el bombeo de agua templada/caliente.
- Profundidad para bombeo de agua fría de aproximadamente 1000 m.
- Gradiente térmico entre aguas superficiales y profundas de al menos 20°C , para obtener la mayor eficiencia posible.
- Baja probabilidad de daños ecológicos.

La tecnología OTEC utiliza para su funcionamiento el ciclo de calor termodinámico Rankine para generar electricidad por medio de turbinas de vapor y puede tener tres modalidades de ciclo: abierto, cerrado e híbrido.

1.3.1 Sistema (OTEC) Ciclo Abierto

El ciclo abierto se compone de los siguientes pasos, ilustrados en la *Figura 3* a continuación:

Evaporación: En la superficie del océano, se extrae agua relativamente caliente y se bombea hacia un sistema de evaporación flas (cámara al vacío en el que se evapora parcialmente el agua de mar por reducción de la presión).

Expansión: El vapor generado en el sistema de evaporación se dirige hacia una turbina, donde se expande y realiza un trabajo mecánico al mover la turbina. Durante este proceso, el vapor se enfría.

Condensación: A la salida de la turbina, el condensador refrigerado con agua fría del océano profundo permite que el vapor condense como agua desalinizada.

Descarga: El agua fría que se utilizó para condensar el vapor se descarga nuevamente al océano profundo después de haber realizado el proceso de condensación.

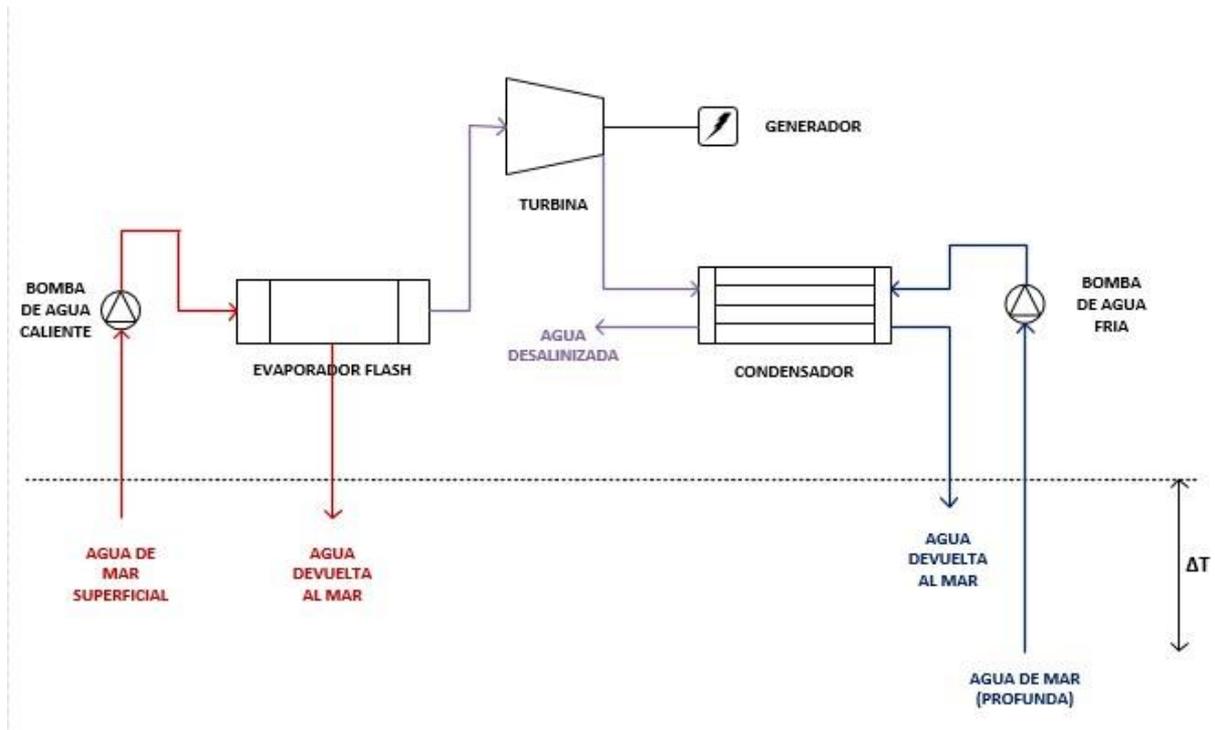


Figura 3. Esquema del ciclo abierto OTEC. Elaboración Propia.

1.3.2 Sistema (OTEC) Ciclo Cerrado

El ciclo cerrado de OTEC (Figura 4) utiliza la diferencia de temperatura entre las aguas cálidas y frías del océano para generar energía. La energía térmica transferida entre el fluido de trabajo y el océano impulsa la turbina, generando así electricidad.

Bomba de Agua Caliente (superficial): El agua de mar superficial, que es más cálida debido a la radiación solar, es bombeada hacia el evaporador.

Evaporador: En el evaporador, el calor del agua de mar superficial se transfiere a un fluido de trabajo (normalmente un refrigerante con bajo punto de ebullición, como el amoníaco o un hidrocarburo), lo que hace que el fluido de trabajo se evapore.

Turbina: El vapor generado del fluido de trabajo a alta presión se dirige hacia una turbina, donde su expansión provoca que la turbina gire. Esta rotación se convierte en electricidad mediante un generador acoplado a la turbina.

Condensador: Después de pasar por la turbina, el vapor de trabajo se dirige al condensador. Aquí, el agua de mar fría, extraída de las profundidades oceánicas, se utiliza para enfriar y condensar el vapor de trabajo de nuevo en líquido.

Bomba Refrigerante: El fluido de trabajo líquido es entonces bombeado de regreso al evaporador para completar el ciclo cerrado y reiniciar el proceso.

Bomba de Agua Fría (profunda): El agua de mar fría necesaria para el condensador se extrae de las profundidades oceánicas, donde las temperaturas son significativamente más bajas. Esta agua fría es devuelta al mar después de haber absorbido el calor de condensación del fluido de trabajo.

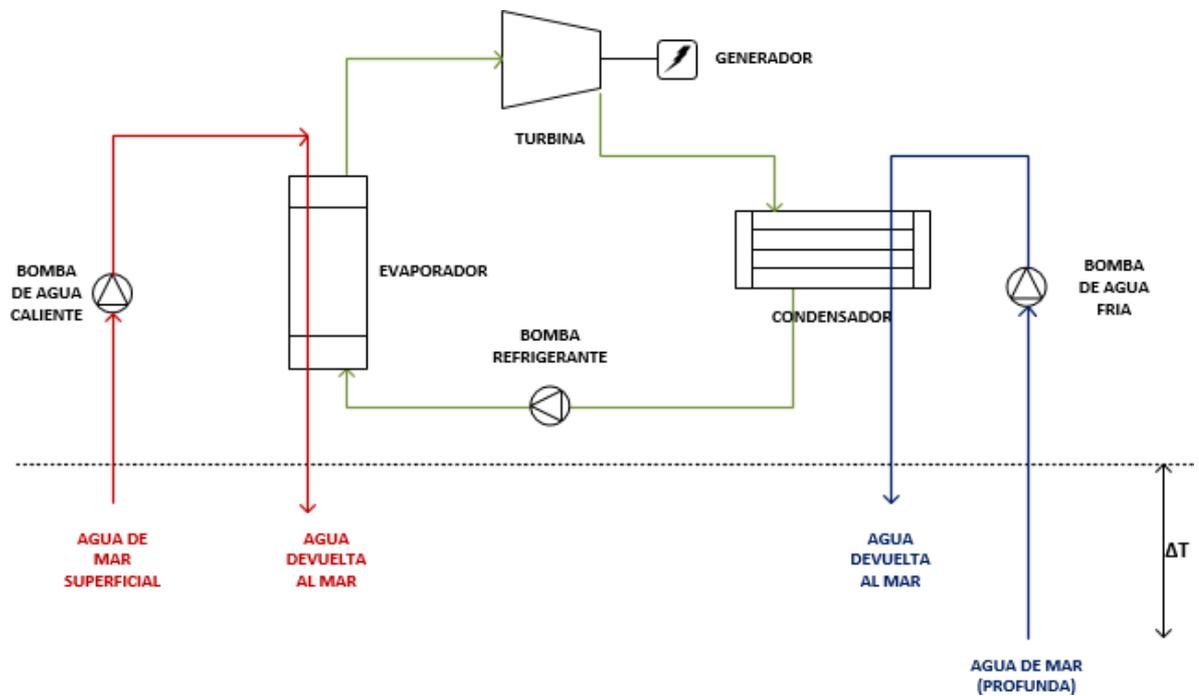


Figura 4. Esquema del ciclo cerrado OTEC. Elaboración Propia.

1.3.3 Sistema (OTEC) Ciclo Híbrido

Los sistemas de ciclo híbrido (*Figura 5*) pueden entenderse como una mezcla de los dos ciclos anteriores y tienen una doble funcionalidad: producir electricidad y desalinizar el agua del mar. Para generar electricidad se utiliza un sistema idéntico al ciclo cerrado utilizando fluidos de trabajo con bajos puntos de ebullición. A este ciclo se incorpora un ciclo abierto cuya finalidad es la obtención de agua destilada. Tras pasar por el evaporador, el agua caliente de la superficie se evapora en una cámara de vacío y posteriormente vuelve a ser condensada gracias a la acción del agua fría del fondo. Esta agua que se recoge tras la condensación se trata de agua destilada y puede ser utilizada en numerosas aplicaciones tales como el consumo humano o la agricultura. Comparando este ciclo con el ciclo cerrado, se aprecia que la única diferencia entre ellos se encuentra en el aprovechamiento del agua fría y caliente del mar a la salida del condensador y evaporador respectivamente.

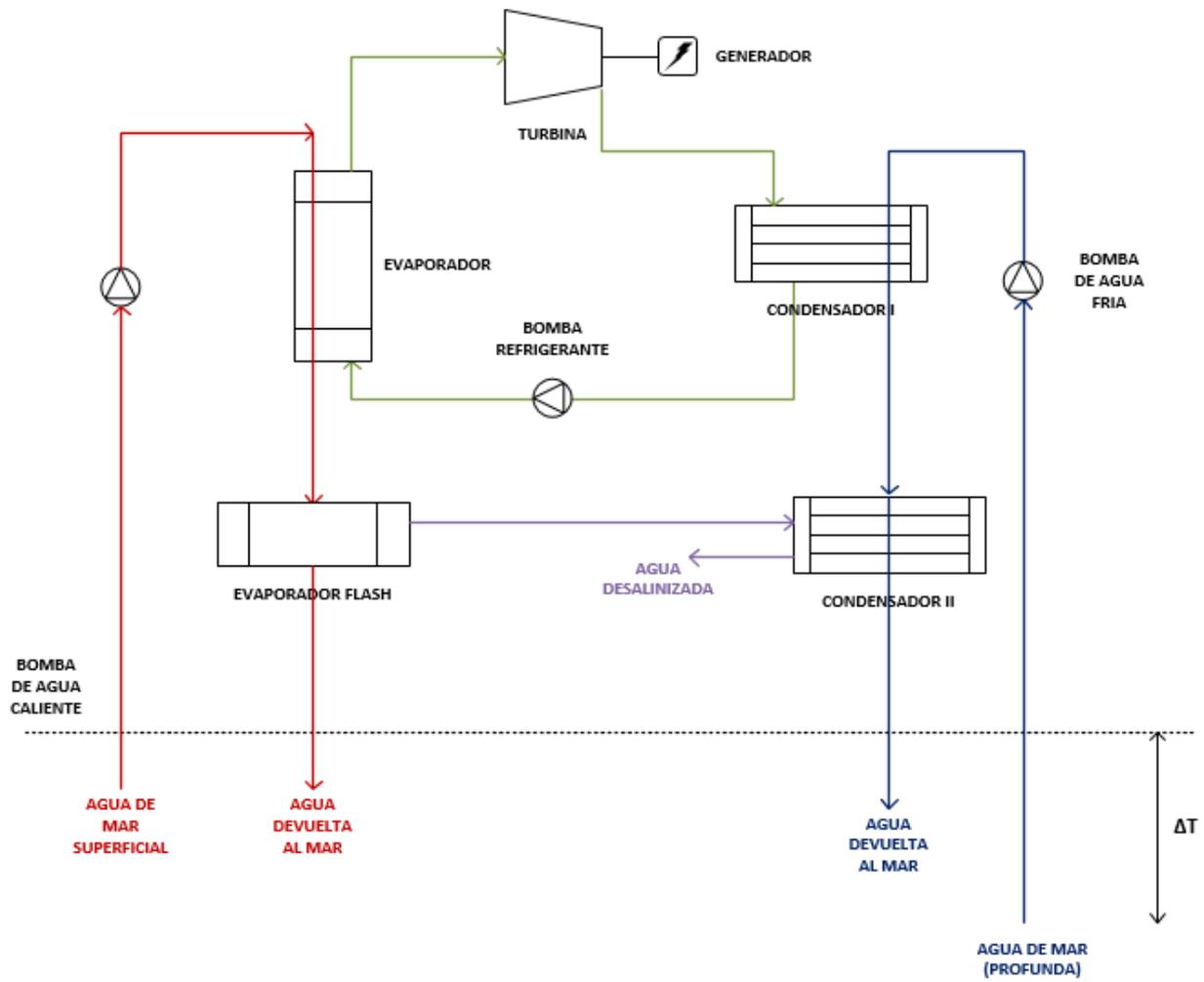


Figura 5. Esquema del ciclo híbrido OTEC. Elaboración Propia.

1.3.3.1 Componentes del ciclo híbrido

- **Fluido de trabajo**

El fluido de trabajo varía en función del tipo de ciclo que esté en funcionamiento, por ejemplo, en el ciclo abierto se usa el mismo agua de mar captada como fluido de trabajo, en cambio para el ciclo cerrado se pueden usar distintos fluidos de trabajos como por ejemplo son: el amoníaco (NH_3) debido a su capacidad para evaporarse a temperaturas relativamente bajas y condensarse a temperaturas moderadas.

Otros frecuentemente usados en este tipo de ciclos son: el Propileno (C_3H_6) y el refrigerante sintético R-134a (CH_2FCF_3) o el R-22.

En el ciclo híbrido al combinar el sistema abierto y el cerrado, los flujos utilizados normalmente son los descritos anteriormente.

- **Turbinas**

El papel fundamental del conjunto turbina-generador es la obtención de energía eléctrica producida por el movimiento de los álabes cuando circula por su interior el vapor del fluido de trabajo.

En las plantas de energía maremotérmica se utilizan turbinas multietapa de baja presión y en el caso de plantas de gran potencia pueden encontrarse varias turbinas acopladas en paralelo.

- **Evaporadores**

En los evaporadores, el agua caliente de la superficie oceánica transfiere calor al fluido de trabajo para que este pase a estado vapor. En los casos más especiales, como los sistemas OTEC de ciclo abierto, este cambio de fase se produce en una cámara de vacío.

Los dos tipos de intercambiadores de calor más utilizados en la práctica son los de tubo-carcasa y los de placas. En los intercambiadores tubo-carcasa el agua del mar circula por el interior de los tubos y el fluido de trabajo cambia de fase en el interior de la carcasa.

- **Condensadores**

En los condensadores el fluido de trabajo pasa de su estado vapor a estado líquido gracias al intercambio de calor con el agua fría extraída del fondo oceánico.

Respecto al condensador a elegir presentes en este ciclo, son utilizados condensadores de contacto directo y condensadores de superficies.

Ambos difieren en que los condensadores de contacto directo no disponen de una pared sólida interpuesta, lo cual hace que permita una transferencia de calor más efectiva.

- **Bombas**

Para transportar los grandes caudales de agua desde el fondo marino hasta la superficie son necesarias la utilización de bombas de gran potencia, independientemente del ciclo usado. Dichas bombas consumen de la potencia que se extrae en la turbina.

- **Tuberías**

Las tuberías por las que circula el fluido son cruciales en este tipo de centrales, ya que, de lo contrario, el fluido podría perder propiedades esenciales para su conversión en energía.

2 LOCALIZACIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

2.1 Localización

Las Islas Filipinas es un país insular situado en el Sudeste Asiático, sobre el océano Pacífico . Al norte se encuentra separado de la isla de Taiwán por el estrecho de Luzón; al oeste se halla el mar de la China Meridional también conocido como el mar de Filipinas Occidental y Vietnam.

El emplazamiento escogido es en el Golfo de Davao que se sitúa en el mar de Filipinas adentrándose en la costa suroccidental de la isla de Mindanao, en el archipiélago de las islas Filipinas.

En la *Figura 6* se muestra una perspectiva vía satélite de la costa del Golfo de Davao, donde situaremos nuestra planta de desalación.



Figura 6. Geolocalización de la central.

2.2 Recursos Energéticos del Emplazamiento

2.2.1 Energía Solar Fotovoltaica

Filipinas cuenta con un excelente recurso solar fotovoltaico debido a que su ubicación geográfica está situada en una región tropical. El país tiene altos niveles de radiación solar a lo largo del año, lo que lo convierte en un lugar propicio para la generación de energía solar. Factores como la duración del día relativamente constante y la falta de estaciones extremas contribuyen a la estabilidad y consistencia del recurso solar en Filipinas.

En general, Filipinas, y especialmente las áreas tropicales del sur como Davao, tienen un recurso solar notable debido a su ubicación geográfica. Estas regiones tienden a experimentar altos niveles de radiación solar durante todo el año, ya que están más cerca del ecuador y reciben una cantidad constante de luz solar.

La energía solar fotovoltaica tiene un gran potencial energético en Filipinas, proporcionando una fuente de energía limpia y sostenible. Además, con avances tecnológicos y políticas de apoyo, la energía solar fotovoltaica en Filipinas puede desempeñar un papel clave en el impulso de la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático.



Figura 7. Irradiación Global en Filipinas.

2.2.2 Energía por Gradiente Térmico Oceánico.

El agua de los océanos aproximadamente retiene el 15% del total de la energía solar como energía térmica. La tecnología que permite generar energía a través de las diferencias de temperatura el océano es llamada Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC por sus siglas en inglés). Este tipo de energía se concentra en la parte superficial del agua de mar y va disminuyendo exponencialmente al incrementar la profundidad, a medida que se llega al fondo marino. (Figura 8)

La tecnología OTEC es una prometedora fuente de energía renovable que aprovecha la energía térmica almacenada en los océanos. Mediante el uso de ciclos cerrados, abiertos o híbridos, es posible generar electricidad de manera continua y sostenible, con el beneficio adicional de producir agua dulce en el proceso. Aunque enfrenta desafíos técnicos y económicos, su desarrollo y optimización pueden contribuir significativamente a la diversificación de la matriz energética global y la mitigación del cambio climático

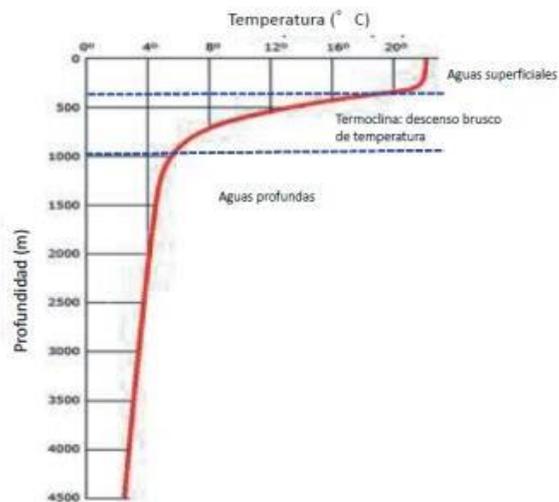


Figura 8. Variación de la temperatura con la profundidad.

Como se puede observar en la (Figura 9), observando el gradiente de temperaturas asociadas a una paleta de colores en la leyenda, se puede apreciar que las aguas cercanas a los polos la temperatura superficial es menos en cambio, las aguas cercanas al ecuador son las que mayor temperatura presentan. Por tanto, el emplazamiento de nuestro proyecto se encuentra en una zona óptima donde se encuentra el mayor gradiente de temperaturas.

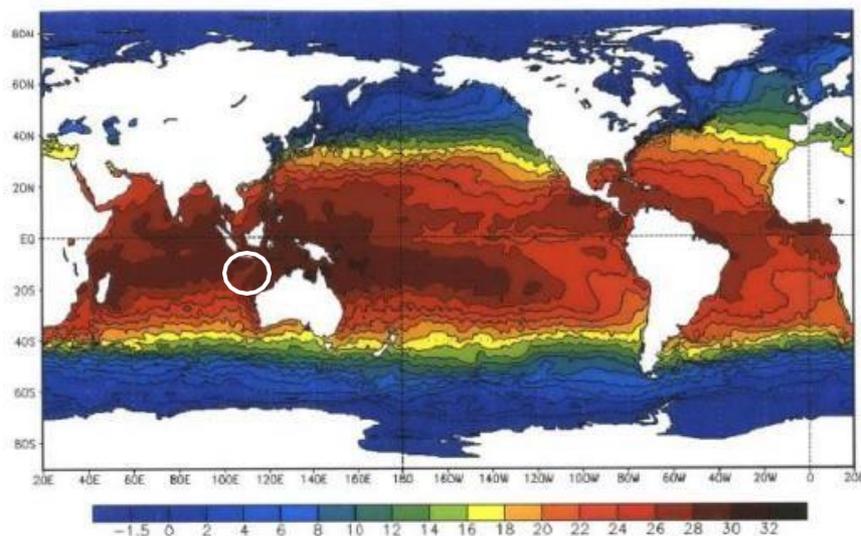


Figura 9. Distribución de los gradientes temperatura del océano.

3 ESTUDIO TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA

El objetivo de este capítulo es la estimación de la energía que producirá la instalación fotovoltaica, para ello se realiza un estudio con el software “PVsyst”, uno de los programas más reconocidos en el ámbito de la energía fotovoltaica. Ofrece simulaciones detalladas de la producción y el rendimiento de cualquier tipo de instalación fotovoltaica. Su base de datos incluye archivos meteorológicos de cualquier lugar del mundo, obtenidos de la NASA y Meteonorm, aunque también permite la introducción manual de datos climáticos de otras fuentes.

Se procede al estudio de la planta fotovoltaica:

En primer lugar, buscamos en la base de datos del software los datos meteorológicos de nuestra localización, siendo las coordenadas de ésta: [7.0675°,125.6094°].

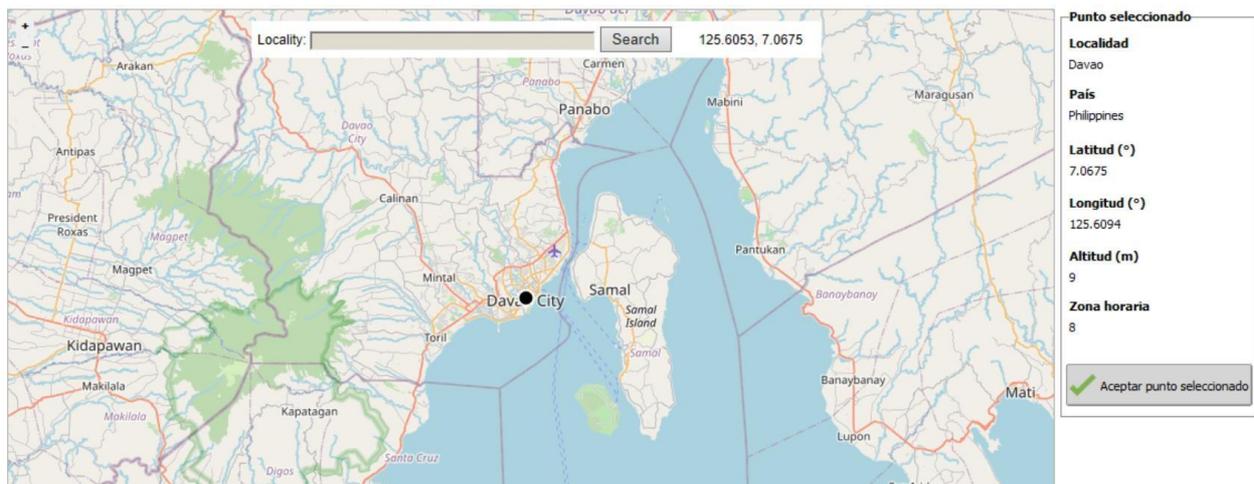


Figura 10. Localización del emplazamiento de la planta fotovoltaica “PVsyst”.

Con los datos meteorológicos del emplazamiento obtenidos, se puede comenzar a seleccionar parámetros para configurar nuestra instalación. Los datos meteorológicos obtenidos son anuales para esa localización.



Figura 11. Introducción de los datos meteorológicos del emplazamiento. “PVsyst”.

En cuanto a los módulos fotovoltaicos utilizados en la instalación, se trata de un modelo de la marca “SunPower”, concretamente el módulo SPR-X22-360-COM. Se trata de un panel alcanza una potencia de salida de hasta 260 Wp con condiciones STC (irradiación de 1000 W/m², temperatura del panel de 25 °C y AM= 1,5).

Parámetros de simulación		Generador FV			
Proyecto	PV Davao	Módulos FV	SPR-X22-360-COM	Inversor	SolarMax 22SHT
Sitio	Davao	Potencia nominal	40000 kWp	Inv. unidad de potencia	22.0 kW
Tipo sistema	Conectado a la red	Voltaje MPP	58.9 V	Núm. de entradas MPPT	2943
Simulación	01/01 al 31/12 (Datos meteo genéricos)	Corriente MPP	6.1 A		

Figura 12. Parámetros de simulación. "PVsyst"

Según la latitud del lugar donde se realiza la instalación, la inclinación del panel óptima cambiará unos grados. En nuestra instalación los paneles son del tipo plano inclinado fijo (decisión práctica y económica, ya que son más sencillos de instalar y mantener que los sistemas con seguimiento solar) y están montados con una inclinación de 30° . Aunque la latitud a la que se encuentra Davao sugiere una inclinación cercana a 7° (ya que está situada a aproximadamente 7° de latitud norte y en general, la inclinación óptima de los paneles solares es cercana a la latitud del lugar para maximizar la captación de energía solar durante todo el año), también una inclinación de 30° puede ser más beneficiosa para balancear la captación de energía a lo largo del año, especialmente considerando los movimientos estacionales del sol. La inclinación de 30° también ayuda a minimizar la acumulación de polvo y otros residuos en los paneles, facilitando su limpieza por la lluvia y manteniendo la eficiencia. Respecto a la orientación, un azimut de 0° significa que los paneles están orientados hacia el sur. En el hemisferio norte, esta orientación es ideal para maximizar la exposición solar durante todo el día. Orientar los paneles al sur asegura que reciban la mayor cantidad de radiación solar directa, especialmente durante las horas pico del mediodía.

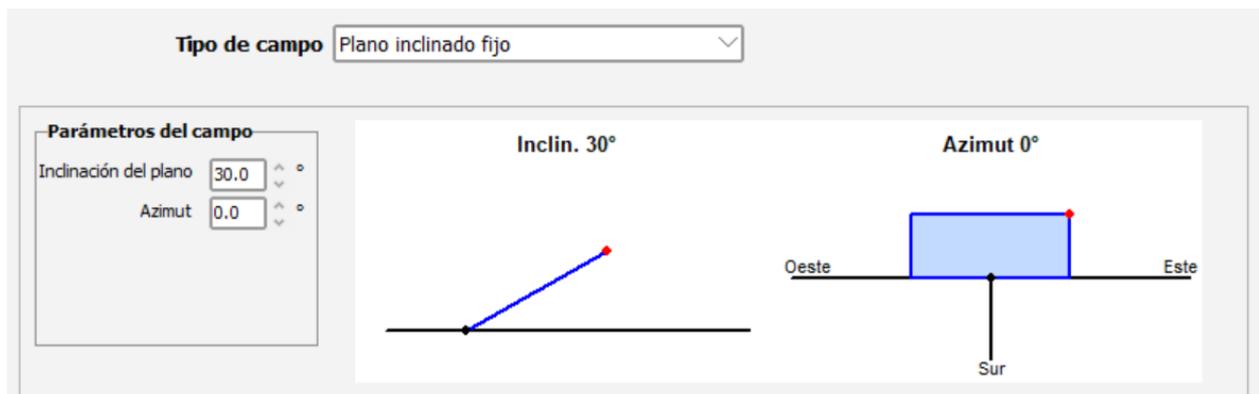


Figura 13. Parámetros del campo. "PVsyst"

A continuación, se analiza en detalle las pérdidas del sistema mediante el siguiente diagrama de Sankey generado por PVsyst (Figura 14).

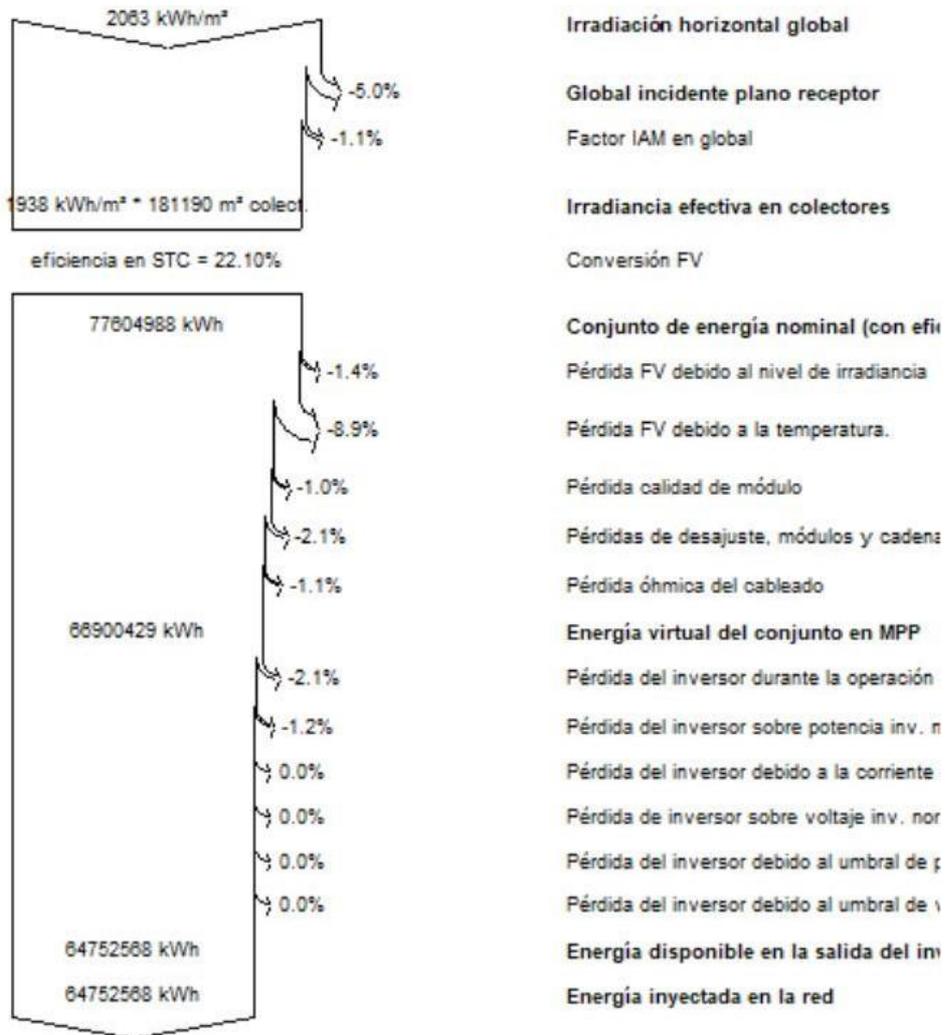


Figura 14. Diagrama de Sankey. "PVsyst"

Analizando el diagrama de Sankey obtenido tras la simulación se observa que 5% de las pérdidas del sistema viene dado por la irradiación global incidente, el 1,4% es debido al nivel de irradiancia y un 8,9% es debido a la temperatura. Respecto a las pérdidas debido al inversor suman un total de 3,3% de la energía.

Tras finalizar el análisis de sensibilidad teniendo en cuenta todas las pérdidas que tiene el sistema, obtenemos una energía inyectada en la red de **64753 MWh**.

En la siguiente figura se observa la potencia [MWh] mensual del sistema, en la que observamos que los meses Mayo, Junio, Julio son los que menos energía útil producen y que los meses de Octubre, Noviembre, Marzo son los que más, rondando los 6500 MWh de potencia.

Horas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	111	84	107	93	85	64	60	81	139	207	212	142
7	318	283	344	287	257	221	220	269	364	463	438	340
8	521	484	536	470	435	387	391	452	556	683	612	508
9	672	628	679	607	560	516	534	590	696	809	737	646
10	745	693	772	674	653	598	635	698	748	862	764	706
11	741	707	731	685	651	608	636	700	707	840	775	760
12	732	695	742	682	636	588	632	707	692	795	752	752
13	685	678	715	625	578	531	566	639	638	726	697	680
14	558	576	606	514	460	420	447	510	514	596	580	550
15	405	423	424	341	284	264	292	336	346	391	393	387
16	207	219	205	149	111	109	134	147	144	150	175	170
17	1	7	8	5	5	11	16	10	1	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 15. Tabla sumas mensuales por hora de energía entregada a la red [MWh].

❖ **Patrón Diario de Energía:**

La producción de energía comienza a aumentar alrededor de las 5-6 de la mañana.

Alcanza su pico máximo entre las 10 de la mañana y las 2 de la tarde.

Comienza a descender después de las 2 de la tarde y cae a cero alrededor de las 6-7 de la tarde.

Para observarlo de manera más clara y visual, en la *Figura 16*, se ve reflejado de manera clara que la potencia mensual sigue un patrón similar, teniendo su alcance máximo en Octubre y el mínimo en Junio.

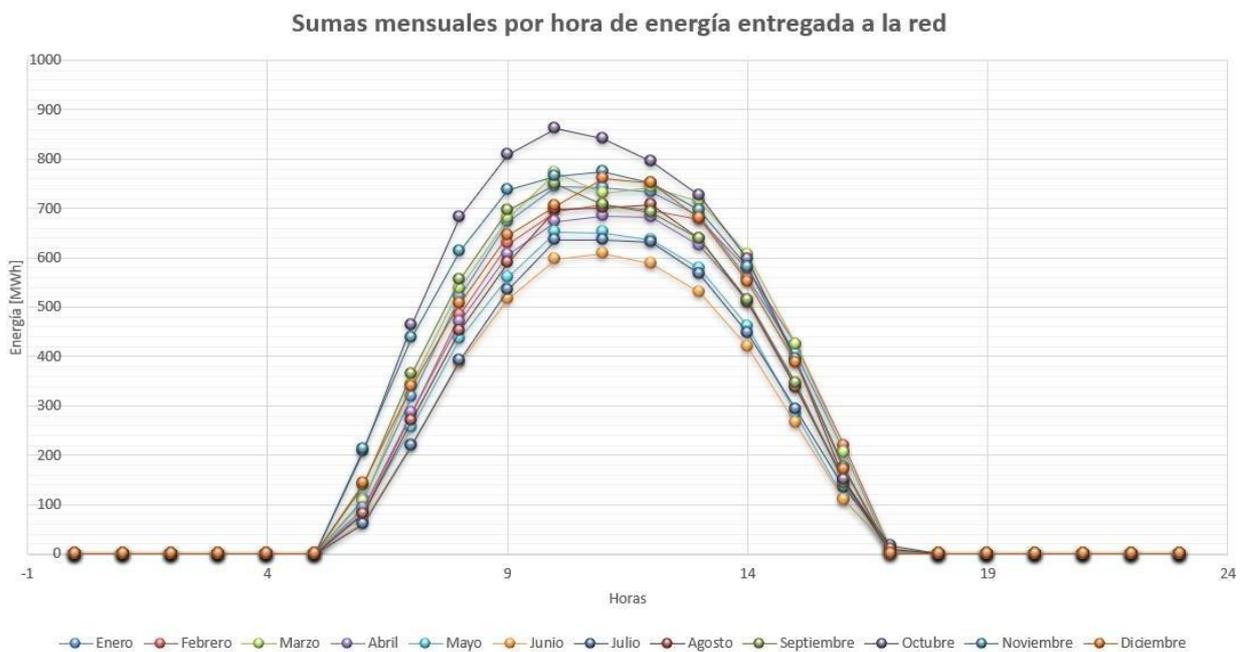


Figura 16. Gráfica sumas mensuales por hora de energía entregada a la red [MWh].

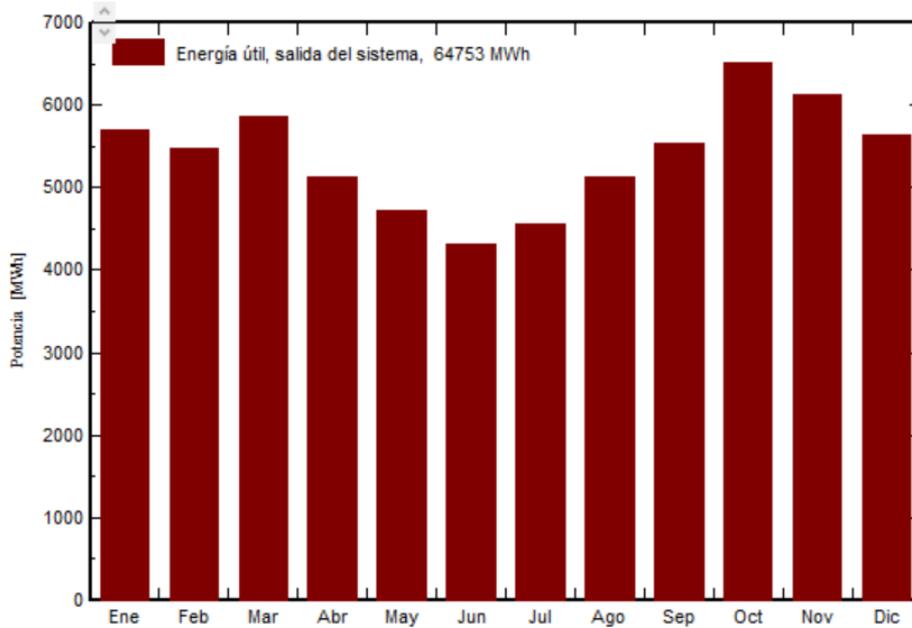


Figura 17. Diagrama Potencia [MWh] – Meses. "PVsyst"

Se observa que los meses con mayor irradiación global horizontal corresponden a las estaciones de primavera y verano, aunque en general, la irradiación global [kWh/m²] es bastante constante a lo largo del año. En cuanto a la energía inyectada a la red, se obtiene una producción anual de **64753 MWh**, con una producción mensual también bastante constante.

En los meses más cálidos (mayo y junio), la eficiencia es ligeramente menor debido a las pérdidas térmicas.

El ratio de rendimiento (PR) es bastante estable, reflejando un buen rendimiento del sistema a lo largo del año.

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR proporción
Enero	151.8	69.93	27.21	173.6	172.5	5818	5695	0.820
Febrero	155.1	68.45	27.53	167.0	165.8	5596	5476	0.820
Marzo	182.3	83.51	28.22	177.5	175.7	5996	5870	0.827
Abril	180.0	71.58	28.67	155.2	153.1	5244	5132	0.827
Mayo	178.5	81.97	28.89	141.0	138.6	4819	4716	0.836
Junio	171.3	76.97	27.99	128.6	126.1	4412	4318	0.839
Julio	176.2	80.28	28.24	135.9	133.5	4661	4562	0.839
Agosto	184.4	80.68	28.39	153.4	151.2	5251	5140	0.838
Septiembre	180.7	67.11	28.09	168.1	166.3	5665	5546	0.825
Octubre	191.8	69.30	28.57	199.7	198.2	6659	6522	0.816
Noviembre	164.9	62.47	27.79	188.8	187.5	6264	6135	0.812
Diciembre	146.3	73.56	28.00	170.8	169.7	5759	5640	0.825
Año	2063.3	885.80	28.14	1959.7	1938.0	66144	64753	0.826

Figura 18. Balances y Resultados principales de la simulación. "PVsyst".

4 ESTUDIO TERMODINÁMICO DE LA PLANTA OTEC

A Continuación realizaremos un estudio termodinámico de la planta OTEC.

Hipótesis Previas del estudio para el Ciclo Híbrido OTEC:

- Se considera una temperatura de 27 °C constante en la superficie del océano y una temperatura de 4 °C en el fondo
- La captación de agua caliente se realiza a una profundidad de 30 m y la succión de agua fría a una profundidad de 1010 m.
- Inicialmente no se consideran las pérdidas de carga en los intercambiadores.
- La velocidad del fluido en el conducto de succión de agua fría se fija en 2 m/s.
- Los rendimientos de las bombas, turbinas y generadores corresponden a los rendimientos típicos de estos componentes en cualquier planta OTEC.
- A la salida del evaporador el fluido de trabajo, en forma de vapor, se encuentra en condiciones de saturación.

Conociendo el gradiente de temperaturas en la localización geográfica donde se pretende construir la planta de energía maremotérmica, podemos hacer un cálculo estimado de su rendimiento termodinámico máximo y viene dado por la expresión.

Donde se particularizará las temperaturas del foco frío ($T_1 = 4^\circ\text{C}$) y del foco caliente ($T_2=27^\circ\text{C}$).

$$\eta = \frac{(T_2 - T_1)}{(T_2 + 273)} = \frac{(27 - 4)}{(27 + 273)} = 7,770\% \sim 8\%$$

Hay que tener en cuenta que el rendimiento obtenido anteriormente no será el real de la central ya que se están despreciando rendimientos de los componentes que conforman el sistema (bombas, turbinas, evaporadores...)

A continuación, se muestra en un esquema el ciclo híbrido de la planta OTEC.

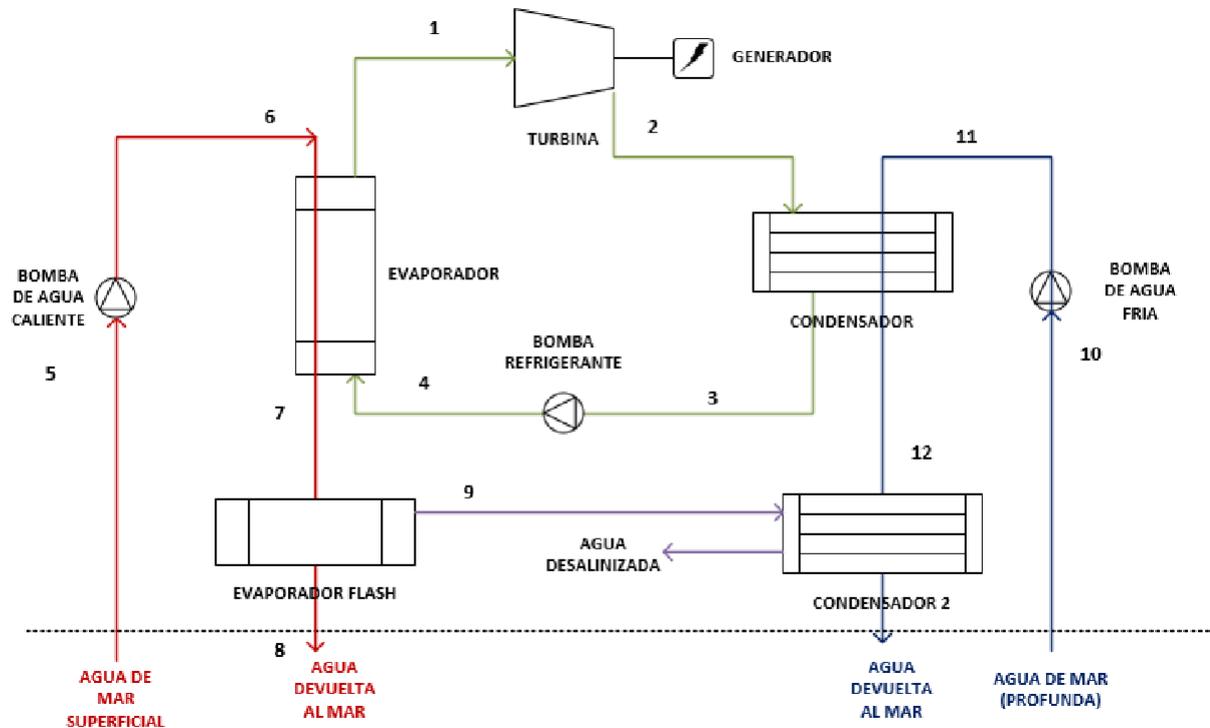


Figura 17. Ciclo Híbrido OTEC. Elaboración Propia

El ciclo híbrido OTEC, ilustrado en la *Figura 17*, se puede describir de la siguiente manera:

Entrada del fluido de trabajo a la turbina: El fluido de trabajo ingresa a la turbina (1). Este gas se expande en la turbina, generando energía mecánica que es convertida en electricidad por el generador acoplado.

Salida del fluido de trabajo de la turbina: Después de pasar por la turbina, el fluido de trabajo ahora tiene menor presión y temperatura. Sale de la turbina y se dirige al condensador (2).

Condensación del fluido de trabajo: En el condensador (11), el fluido de trabajo se enfría y se condensa, cambiando de gas a líquido. El agua de mar fría, que se bombea desde el fondo del océano (10), es utilizada para este proceso de enfriamiento.

Bombeo del fluido de trabajo condensado: Una vez que el fluido de trabajo se ha condensado, es bombeado por una bomba refrigerante (3) hacia el evaporador (4).

Bombeo de agua de mar superficial: Simultáneamente, el agua de mar caliente es bombeada desde la superficie del océano (5) hacia el evaporador (6).

Evaporación del fluido de trabajo: En el evaporador (6), el fluido de trabajo absorbe el calor del agua de mar caliente y se evapora, convirtiéndose nuevamente en vapor de alta presión que es dirigido de regreso a la turbina (1), completando el ciclo cerrado.

Salida del agua de mar caliente: El agua de mar caliente, ahora enfriada, es devuelta al océano (7).

Proceso de desalación: Se incluye un evaporador flash (8) para la desalación del agua de mar. Aquí, el agua de mar superficial se evapora rápidamente, separándose de las sales.

Condensación del vapor desalado: El vapor generado durante el proceso de desalación se condensa en el condensador (12), utilizando agua de mar fría bombeada desde el fondo del océano (10).

Producción de agua desalada: El agua condensada se recoge como agua desalada (9), que puede ser utilizada para consumo humano o riego.

Retorno del agua de mar fría: El agua de mar fría utilizada para el enfriamiento es devuelta al océano (11).

Retorno del agua caliente: El agua de mar caliente que no ha sido utilizada en el proceso de evaporación también es devuelta al océano (8).

4.1 Modelación del sistema

Las propiedades en cada etapa del ciclo cerrado de vapor se determinan usando el software COOLPROP y Cyclepad aplicando balances de masa y energía, así como Segundo principio de la Termodinámica al fluido de trabajo. Se emplean además principios de transferencia de calor en el evaporador y condensador. Algunas consideraciones propias de cada componente son necesarias para resolver el ciclo completo, las cuales se detallan en este capítulo.

4.2 Consideraciones Iniciales

4.2.1 Flujo Frío

Presión: La presión en el océano aumenta con la profundidad debido al peso de la columna de agua que se encuentra por encima. Esta presión se puede calcular utilizando la ecuación de presión hidrostática:

$$P=\rho\cdot g\cdot h$$

Donde:

- P es la presión en Pascales (Pa).
- ρ es la densidad del agua de mar, que en promedio es aproximadamente $1025 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
- g es la aceleración debida a la gravedad, que se aproxima a $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$
- h es la profundidad en metros (m).

Por tanto, teniendo como hipótesis previas que la succión de agua fría se realiza a 1010m de profundidad, tenemos que la presión es:

$$P_{1010m}=1025 \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdot 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)} \cdot 1010 \text{ (m)}$$

$P_{1010m}=10,160,000 \text{ Pa}$

Temperatura: La temperatura captada en el océano a 1010m de profundidad es de 4°C.

Caudal másico: El flujo captado de agua fría en nuestra instalación es de 29000 kg/s

4.2.2 Flujo Caliente

Presión: La presión en el océano superficial se puede obtener con la misma expresión que la anterior.

$$P=\rho\cdot g\cdot h$$

Donde:

- P es la presión en Pascales (Pa).
- ρ es la densidad del agua de mar, que en promedio es aproximadamente 1025 (kg/m³)
- g es la aceleración debida a la gravedad, que se aproxima a 9.81 (m/s)
- h es la profundidad en metros (m).

Por tanto, teniendo como hipótesis previas que la succión de agua caliente se realiza a 30 m de profundidad, tenemos que la presión es:

$$P_{30m}=1025 \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdot 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)} \cdot 30 \text{ (m)}$$

$P_{30m}=302600 \text{ Pa}$

Temperatura: La temperatura captada en el océano a 30m de profundidad es de 27°C.

Caudal másico: El flujo captado de agua fría en nuestra instalación es de 26000 kg/s

4.2.3 Eficiencia de turbinas, bombas y generador.

Se toman en cuenta los valores típicos de eficiencia isentrópica de la turbina (η_T), eficiencia de conversión del generador (η_G) y eficiencia de alimentación de las bombas (η_B), de la bomba de agua caliente, fría y del fluido de trabajo (η_C , η_F , η_{FT}), flujos másicos y temperaturas iniciales.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Rendimientos			
Rendimiento turbina	η_T	0,95	-
Rendimiento bomba de agua fría	η_{BF}	0,8	-
Rendimiento bomba agua caliente	η_{BC}	0,85	-
Rendimiento bomba del fluido de trabajo	η_{BFT}	0,8	-
Flujos másicos			
Flujo másico de agua caliente	\dot{m}_C	26200	kg/s
Flujo másico de agua fría	\dot{m}_F	29300	kg/s
Flujo másico del fluido de trabajo	\dot{m}_{FT}	240	kg/s
Temperaturas			
Temperatura superficial	T_E	27	°C
Temperatura profunda	T_I	4	°C

Figura 18. Eficiencias en turbinas, bombas y generador.

4.3 Ciclo Híbrido

Para el estudio de la planta seleccionaremos el ciclo híbrido ya que dicho ciclo proporciona buen rendimiento y a su vez desala agua.

El estudio se realizará con dos fluidos distintos de refrigerantes (el R22 y el R717), dicho estudio será meramente comparativo ya que en el Reglamento CE 2037/2000 recoge la prohibición del uso de hidroclorofluorocarburos puros (R22) a partir del 1 de Enero de 2010 y por consecuencia en ningún caso se propone su uso como fluido de trabajo en nuestro estudio.

Para el ciclo cerrado de vapor, se establece inicialmente el refrigerante [R22 (hidroclorofluorocarbono “HCFC”) y R717(Amoníaco)]. Se realizarán balances propios de un ciclo Rankine saturado para plantear la resolución completa del ciclo. Las propiedades termodinámicas se obtienen usando el software COOLPROP.

4.3.1. Propiedades del ciclo cerrado

Siguiendo con el esquema del ciclo híbrido (*Figura 17*) y conociendo la condición de vapor saturado y conocida la temperatura T_4 , se obtienen las demás variables (p_4 , h_4 , s_4) de forma directa.

$$p_1 = p_{sat}(T_1)$$

$$h_1 = h_{vap, sat}(p_1) = h_{vap, sat}(T_1)$$

$$s_1 = s_{vap, sat}(p_1) = s_{vap, sat}(T_1)$$

$$T_{2s} = T_2 = T_3$$

Para obtener el trabajo realizado en la turbina W_T se necesitan la entalpía específica entre los estados 1 y 2s, para ello se determina la presión (p_{2s}), la calidad del vapor (x_{2s}) y la entalpía (h_{2s}).

$$s_{2s}=s_1$$

$$p_{2s}=p_2=p_{sat}(T_2)$$

$$x_{2s}=x(T_{2s}, s_{2s})$$

$$h_{2s}=h(p_2, x_{2s})$$

$$W_T=W_{1-2}=m_{FT} \cdot (h_1-h_{2s}) \cdot \eta_T$$

Realizando un balance de energía, se obtiene la entalpía del estado 2 (h_2), la calidad del vapor (x_2) y la entropía específica (s_2).

$$h_2=h_1-W_T$$

$$x_2=x(p_2, h_2)$$

$$s_2=s(T_2, x_2)$$

Para hallar las variables del estado 3, sabemos que hay líquido saturado a la temperatura de condensación T_C .

$$T_3=T_2=T_C$$

$$p_3=p_2=p_{sat}(T_2)$$

$$h_3=h_{liq\ sat}(p_3) = h_{liq\ sat}(T_3)$$

$$s_3=s_{liq\ sat}(p_3) = s_{liq\ sat}(T_3)$$

En el estado 4, el fluido se encuentra en una condición de líquido subenfriado. La presión en el estado 4, denotada como p_4 , corresponde a la del evaporador. Para hallar la entalpía h_4 , se debe sumar el trabajo específico W_{BR} con el valor de la entalpía del estado 3 (h_3). Y para cerrar el ciclo de vapor, se obtiene T_4 , en función de las variables halladas anteriormente.

$$p_4=p_1=p_{sat}(T_1)$$

$$h_4= W_{BR} + h_3$$

$$T_4 = T(p_4, h_4)$$

Y la eficiencia:

$$\eta = \frac{Q_E}{W_N}$$

Las expresiones que permiten calcular todos los puntos del ciclo, trabajos, calores intercambiados y rendimientos se muestran a continuación:

Calor intercambiado en el condensador:

El calor cedido por el fluido de trabajo en el condensador

$$Q_C = \dot{m}_{FT} \cdot (h_2 - h_3)$$

Donde:

- \dot{m}_{FT} = flujo másico del fluido de trabajo
- h_2, h_3 = entalpías en dichos puntos del ciclo.

El calor absorbido por el agua fría procedente del fondo del océano se calcula cómo:

$$Q_C = \dot{m}_F \cdot c_p \cdot (T_8 - T_7)$$

Donde:

- \dot{m}_F = flujo másico de agua fría
- c_p = calor específico del agua del mar
- T_8, T_7 = temperaturas en dichos puntos del ciclo

Calor intercambiado en el evaporador,

El calor absorbido por el fluido de trabajo en el condensador es:

$$Q_E = \dot{m}_{FT} \cdot (h_4 - h_1)$$

Donde:

- \dot{m}_{FT} = flujo másico del fluido de trabajo
- h_4, h_1 = entalpías en dichos puntos del ciclo.

El calor cedido por el agua caliente procedente de la superficie del océano se calcula cómo:

$$Q_E = \dot{m}_C \cdot c_p \cdot (T_5 - T_6)$$

Donde:

- \dot{m}_C = flujo másico de agua fría
- c_p = calor específico del agua del mar
- T_5, T_6 = temperaturas en dichos puntos del ciclo.

Trabajo requerido para bombear el fluido de trabajo,

Este trabajo puede calcularse de la siguiente forma:

$$W_{BFT} = \dot{m}_{FT} \cdot (h_{4s} - h_3) / \eta_{BFT}$$

Donde:

- \dot{m}_{FT} = flujo másico del fluido de trabajo
- η_{BFT} = rendimiento de la bomba de fluido de trabajo
- h_3, h_4 = entalpías en dichos puntos del ciclo.

Trabajo requerido para bombear el agua fría del fondo oceánico,

Dicho trabajo puede calcularse de la siguiente forma:

$$W_{BF} = \dot{m}_F \cdot (h_{11s} - h_{10}) / \eta_{BF}$$

Donde:

- \dot{m}_F = flujo másico de agua fría
- η_{BF} = rendimiento de la bomba de agua fría

Trabajo requerido para bombear el agua caliente de la superficie oceánica,

Dicho trabajo puede calcularse de la siguiente forma:

$$W_{BC} = \dot{m}_C \cdot (h_{6s} - h_5) / \eta_{BC}$$

Donde:

- \dot{m}_C = flujo másico de agua caliente
- η_{BC} = rendimiento de la bomba de agua caliente

Trabajo requerido por la bomba de vacío,

Para mantener la presión en el interior de la cámara de vacío es necesaria la utilización de una bomba de vacío cuya potencia se puede estimar según los estudios de Uehara [8] como:

$$W_V = (1,6 \cdot 10^5) [J/kg] \cdot \dot{m}_C$$

Donde:

\dot{m}_C = flujo masico de agua caliente

Trabajo disponible en el generador,

El trabajo entregado por el generador se puede calcular como:

$$W_T = \dot{m}_{FT} \cdot \eta_T \cdot (h_1 - h_2)$$

Donde:

- \dot{m}_{FT} = flujo másico del fluido de trabajo
- η_T = rendimiento de la turbina
- h_1, h_2 = entalpías en dichos puntos del ciclo.

La potencia neta W_N se puede calcular como la resta del trabajo disponible en el generador menos el trabajo necesario para bombear, y viene dada por la expresión

$$W_N = W_G - (W_{BFT} + W_{BF} + W_{BC} + W_V)$$

Donde:

W_G = trabajo disponible en el generador

W_{BC} = trabajo requerido para bombear el agua caliente de la superficie

W_{BF} = trabajo requerido para bombear el agua fría del fondo oceánico

W_{BFT} = trabajo requerido para bombear el fluido de trabajo

W_V = trabajo requerido por la bomba de vacío.

4.3.4. Proceso de desalinización.

Para poder llevar a cabo la desalinización del agua del mar es necesaria la utilización de una cámara de vacío flash y un condensador adicional. El agua caliente a la salida del evaporador se lleva a la cámara de vacío y la evaporación ocurre cuando el líquido sufre una repentina reducción de presión, denominado flash. Parte del fluido pasa a estado vapor y el resto sigue en estado líquido. Mientras que el líquido es devuelto al océano, el vapor pasa a un condensador donde intercambia calor con el agua fría procedente de la salida del condensador del circuito principal, y vuelve a estado líquido. El agua a la salida de dicho condensador es agua desalinizada

ya que durante la evaporación se elimina toda la sal y residuos presentes en ella.

Sabiendo que la conversión del proceso de desalación (r_d) = 2% = 0,02, y que la masa que sale de la cámara de vacío (\dot{m}_9) es 400 kg/s, y teniendo en cuenta la siguiente expresión, obtenemos la masa de agua desalada.

$$\dot{m}_D = r_d \cdot \dot{m}_9$$

$$\dot{m}_D = 524 \text{ kg/s} = 45273,6 \text{ t/día}$$

4.3.1 Resultados Ciclo Rankine.

El caso de estudio es comparar que fluido de trabajo sería el más recomendable utilizar en nuestra planta, éste es utilizado en el ciclo cerrado Rankine, el cual será simulado mediante el software Cyclepad.

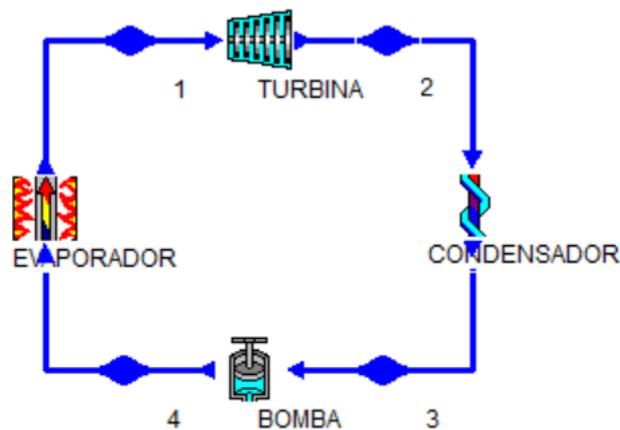


Figura 19. Ciclo termodinámico Rankine.

En primer lugar, debemos seleccionar el fluido de trabajo y realizar algunas suposiciones, tales como que la salida del condensador suponemos que la fase es saturada, introducimos el caudal del fluido de trabajo, y el título de vapor, que los componentes tales como evaporadores y condensadores son isobáricos (presión constante) ya que en realidad no varía drásticamente entre ellos. Elementos como la turbina y la bomba son considerados adiabáticos (no hay transferencia de calor entre el proceso y el ambiente) e isentrópicos (la entropía permanece constante).

Ahora mostraremos los resultados de la simulación del ciclo Rankine con dos fluidos de trabajos distintos: R717 y R-22.

- Resultados Ciclo Rankine **R717**:

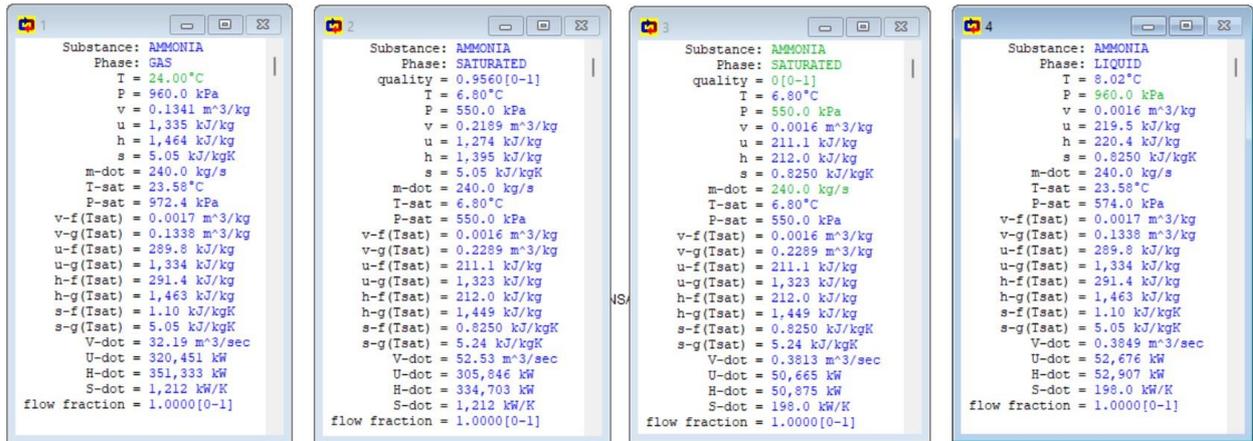


Figura 20. Resultados propiedades termodinámicas con fluido de trabajo R717. Simulación Cyclepad.

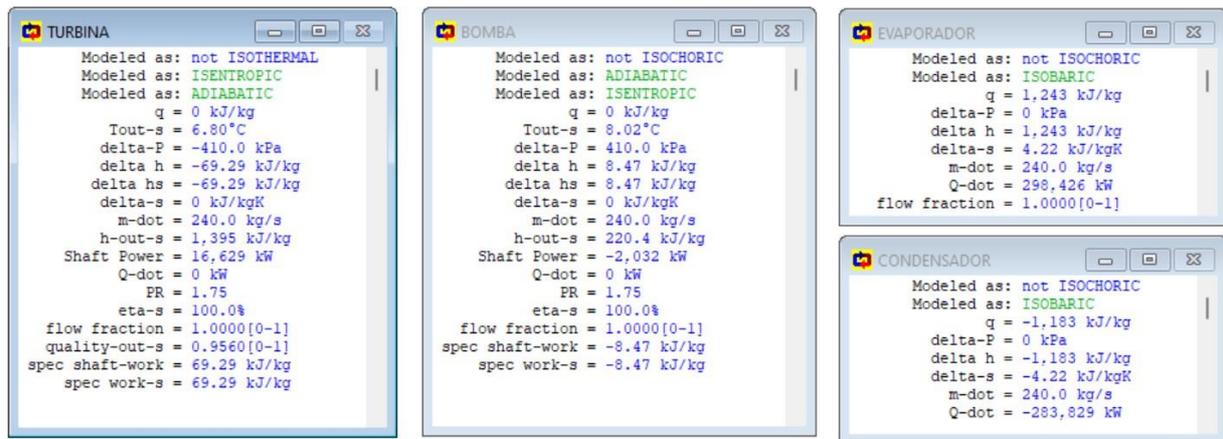


Figura 21. Resultados elementos del ciclo con fluido de trabajo R717. Simulación Cyclepad.

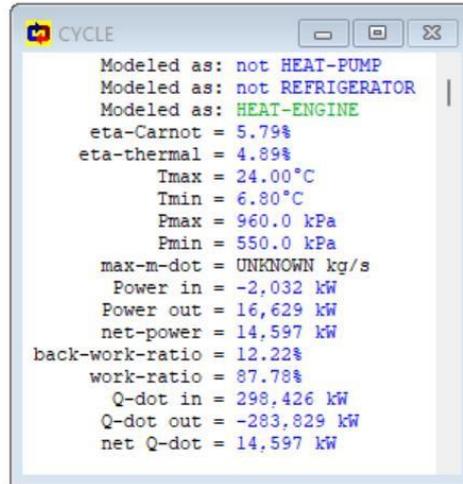


Figura 22. Resultados del ciclo con fluido de trabajo R717. Simulación Cyclepad.

• Resultados ciclo Rankine R-22:

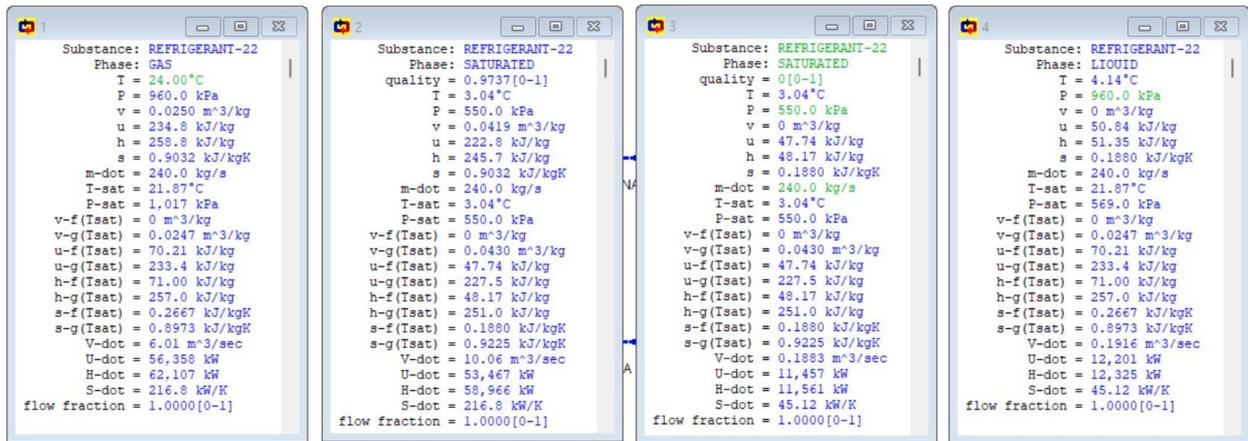


Figura 23. Resultados propiedades termodinámicas con fluido de trabajo R-22. Simulación Cyclepad.

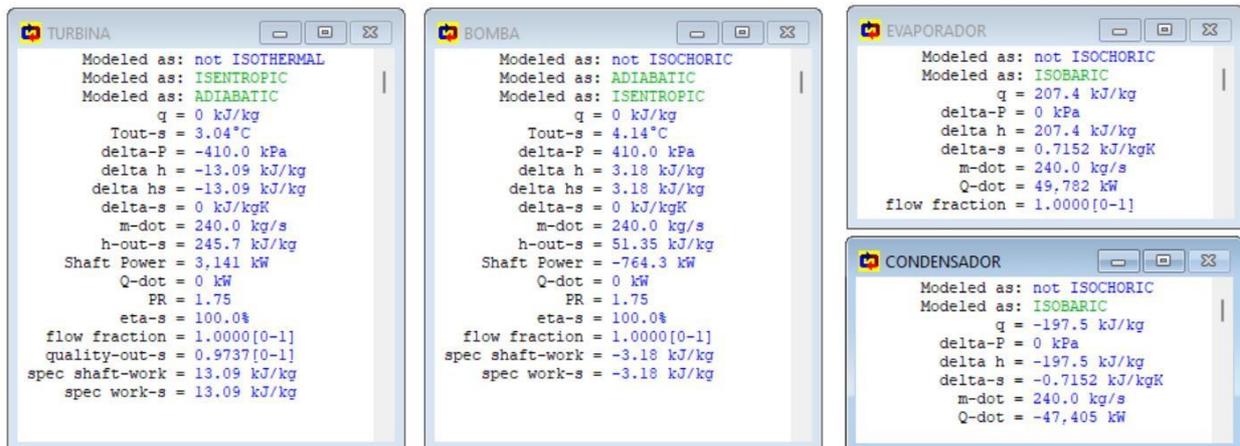


Figura 24. Resultados elementos del ciclo con fluido de trabajo R-22. Simulación Cyclepad.

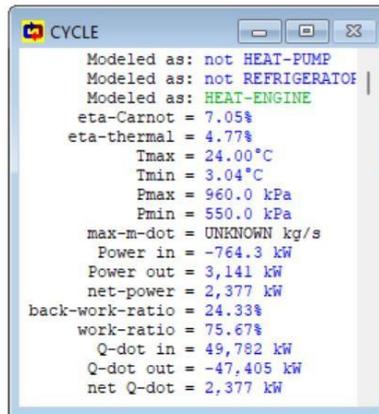


Figura 25. Resultados del ciclo con fluido de trabajo R-22. Simulación Cyclepad.

4.3.2 Resultado Ciclo Híbrido (OTEC)

Teniendo en cuenta los resultados anteriores de la simulación del ciclo Rankine para las distintas sustancias, y las propiedades termodinámicas, realizando los balances de materia, energía, la suposiciones y datos descritas en los capítulos anteriores, mostramos el resultado del ciclo híbrido final.

Tabla del ciclo híbrido OTEC (R717):

		T [C]	P[kPa]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgk]	u[kj/kg]	Cp[kj/kgK]	Densidad [kg/m ³]	m[kg/s]
	Referencia	27	302,6000	113,4672	0,395	113,1635	4,18	996,606	26000
	5	27	302,6	113,4672	0,395	113,1635	4,18	996,606	26000
	6	27	313,3	113,477	0,395	113,1622	4,1799	996,6101	26000
	7	24,13	313,3	101,479	0,3549	101,479	4,1816	997,363	26000
	8	13,17	1,5148	55,31	0,1977	55,3126	4,1909	999,3113	25800
	9	13,17	1,5148	55,31	0,1977	55,3126	4,1909	999,3113	400
	1	24	960	1464	5,05	1335	3,0934	7,4618	240
	2	6,8	550	1395	5,05	1274	2,8984	4,98	240
	3	6,8	550	212	0,825	211,1	4,6514	630,168	240
	4	8,02	960	220,4	0,825	219,5	4,66	627,634	240
	10	4	10160	26,9186	0,0609	16,7926	4,1645	1004,9036	29300
	11	4	10190	26,9317	0,0609	16,7925	4,165	1004,9109	29300
	12	6,5	10190	37,3413	0,0983	27,1991	4,1618	1004,7866	29300

Figura 26. Propiedades termodinámicas del ciclo híbrido (R717).

- Fluido Caliente
- Fluido de Trabajo
- Fluido Frío

Tabla del ciclo híbrido OTEC (R-22):

		T [C]	P[kPa]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgk]	u[kj/kg]	Cp[kj/kgK]	Densidad [kg	m[kg/s]
	Referencia	27	302,6000	113,4672	0,395	113,1635	4,18	996,606	26000
	5	27	302,6	113,4672	0,395	113,1635	4,18	996,606	26000
	6	27	313,3	113,477	0,395	113,1622	4,1799	996,6101	26000
	7	24,13	313,3	101,479	0,3549	101,479	4,1816	997,363	26000
	8	13,17	1,5148	55,31	0,1977	55,3126	4,1909	999,3113	25800
	9	13,17	1,5148	55,31	0,1977	55,3126	4,1909	999,3113	400
	1	24	960	258,8	0,9032	234,8	1,014	1538,72	240
	2	3,04	550	245,7	0,9032	222,8	1,0128	1271,11	240
	3	3,04	550	48,14	0,188	47,74	1,0645	1677,6	240
	4	4,14	960	51,35	0,188	50,84	1,0645	1670,11	240
	10	4	10160	26,9186	0,0609	16,7926	4,1645	1004,9036	29300
	11	4	10190	26,9317	0,0609	16,7925	4,165	1004,9109	29300
	12	6,5	10190	37,3413	0,0983	27,1991	4,1618	1004,7866	29300

Figura 27. Propiedades termodinámicas del ciclo híbrido (R-22).

- Fluido Caliente
- Fluido de Trabajo
- Fluido Frío

Parámetro	Fluido R717	Fluido R22
Q_E	298,464 MW	49,799 MW
Q_C	-30994,6 MW	-5176,072 MW
W_{BFT}	2,52 MW	0,936 MW
W_{BF}	0,47978 MW	0,47978 MW
W_C	0,30207 MW	0,30207 MW
W_T	15,732 MW	2,9868 MW

Figura 28. Tabla de resultados de las principales ecuaciones de los componentes del ciclo.

Como se puede observar en la tabla la potencia neta (W_N) generada con el fluido R717 (Amoníaco) es mayor a la proporcionada por el fluido de trabajo R22.

Analizando los resultados obtenidos en el sistema para los distintos componentes que conforman la planta, utilizando dos refrigerantes distintos, seleccionamos el fluido de trabajo R717.

Pero debemos tener en cuenta que esta potencia no es la real proporcionada, ya que en el ciclo híbrido OTEC hay elementos que consumen energía, por tanto, se estudia cuanta potencia es consumida por la planta para que autoabastezca energéticamente y finalmente ver la potencia generada real de la planta.

$$W_F = W_T - W_{BFT} - W_{BF} - W_{BC} - W_V$$

Parámetro	W R717 [MW]	W R22[MW]
W_T	15,732	2,9868
W_{BC}	0,302070588	0,302070588
W_{BF}	0,4797875	0,4797875
W_{BFT}	2,52	0,963
W_V	0,4192	0,4192
W_N	13,212	2,0238

Figura 29. Tabla potencia real transmitida.

Para calcular la energía aportada por un ciclo híbrido OTEC, es fundamental considerar que este tipo de planta no opera continuamente los 365 días del año, 24 horas al día. Es necesario tener en cuenta los periodos de parada para mantenimiento, limpieza, reparaciones y otros problemas técnicos.

En general, se utiliza un factor de capacidad del 95% para plantas de energía bien mantenidas. Este factor considera las interrupciones de operación programadas y no programadas. Las paradas de limpieza se realizan cada 1 o 2 años, ya que realizar paradas frecuentes no es rentable y afectaría negativamente al rendimiento global de la planta.

Analizado anteriormente, el fluido de trabajo seleccionado es el R717 (Amoníaco) y que teniendo en cuenta las principales pérdidas y consumos de los equipos de la planta, sabemos que genera 13,212 MW, por lo cual, la energía cedida a nuestra desaladora por hora viene dada por la siguiente expresión:

$$E [Mwh] = W_{NC} \cdot \Delta t$$

Donde:

- W_{NC} = Potencia final entregada
- Δt = Incremento de tiempo (Simulado por hora; $\Delta t=1h$)

Mensualmente obtenemos:

Mes	OTEC [MWh]
Enero	9801
Febrero	9169
Marzo	9801
Abril	9485
Mayo	9801
Junio	9485
Julio	9801
Agosto	9801
Septiembre	9485
Octubre	9801
Noviembre	9485
Diciembre	9801
TOTAL AÑO	115716

Figura 30. Tabla generación de energía mensual OTEC

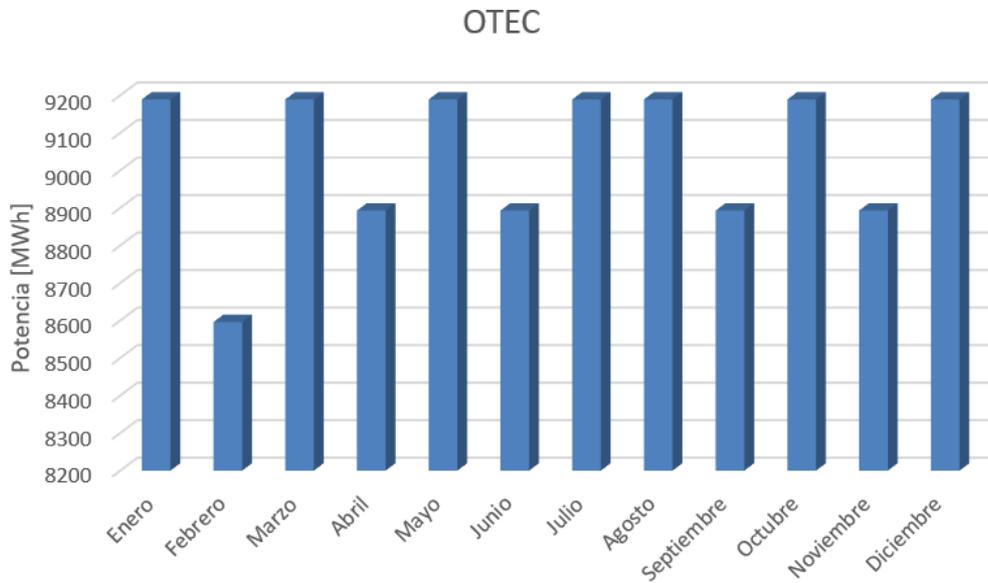


Figura 31. Gráfico de generación de energía mensual OTEC.

En la (Figura 32) como se ha descrito anteriormente, la planta tiene las 24 horas de funcionamiento, quedando reflejada en la siguiente tabla la potencia que genera por horas al mes la planta OTEC.

Horas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
1	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
2	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
3	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
4	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
5	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
6	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
7	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
8	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
9	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
10	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
11	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
12	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
13	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
14	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
15	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
16	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
17	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
18	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
19	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
20	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
21	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
22	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
23	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539

Figura 32. Tabla de la suma mensual por hora de energía entregada a la red.

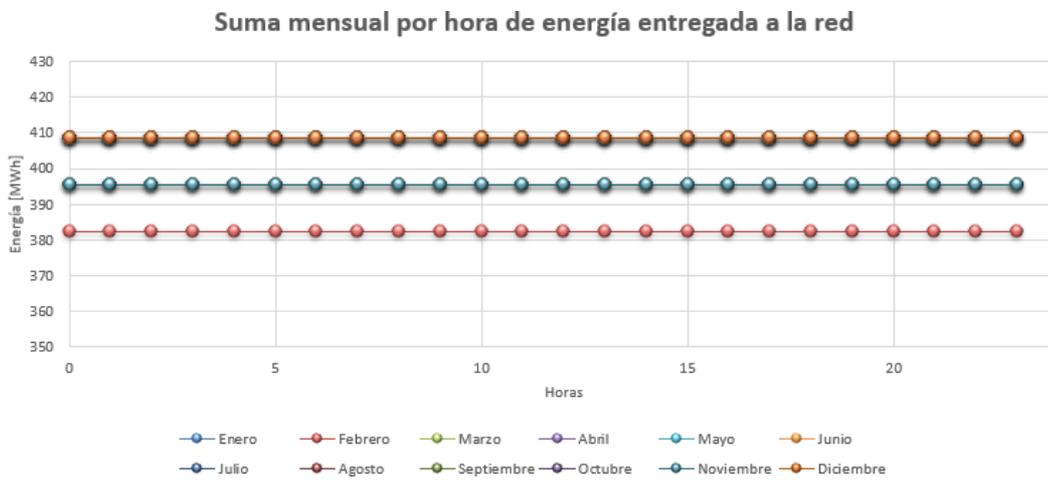


Figura 33. Suma mensual por hora de energía entregada a la red.

5 RESULTADOS HIBRIDACIÓN FOTVOLTAICA Y OTEC

Una vez obtenidos los resultados de las dos tecnologías propuestas para el funcionamiento de la central de desalación, se va a mostrar los resultados de ambas y la producción energética de la combinación de ambas.

Quedando la energía generada en [MWh] es:

ENERO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	111	519,41539
7	408,41539	318	726,41539
8	408,41539	521	929,41539
9	408,41539	672	1080,41539
10	408,41539	745	1153,41539
11	408,41539	741	1149,41539
12	408,41539	732	1140,41539
13	408,41539	685	1093,41539
14	408,41539	558	966,41539
15	408,41539	405	813,41539
16	408,41539	207	615,41539
17	408,41539	1	409,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

FEBRERO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	382,06601	0	382,06601
1	382,06601	0	382,06601
2	382,06601	0	382,06601
3	382,06601	0	382,06601
4	382,06601	0	382,06601
5	382,06601	0	382,06601
6	382,06601	84	466,06601
7	382,06601	283	665,06601
8	382,06601	484	866,06601
9	382,06601	628	1010,06601
10	382,06601	693	1075,06601
11	382,06601	707	1089,06601
12	382,06601	695	1077,06601
13	382,06601	678	1060,06601
14	382,06601	576	958,06601
15	382,06601	423	805,06601
16	382,06601	219	601,06601
17	382,06601	7	389,06601
18	382,06601	0	382,06601
19	382,06601	0	382,06601
20	382,06601	0	382,06601
21	382,06601	0	382,06601
22	382,06601	0	382,06601
23	382,06601	0	382,06601

MARZO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	107	515,41539
7	408,41539	344	752,41539
8	408,41539	536	944,41539
9	408,41539	679	1087,41539
10	408,41539	772	1180,41539
11	408,41539	731	1139,41539
12	408,41539	742	1150,41539
13	408,41539	715	1123,41539
14	408,41539	606	1014,41539
15	408,41539	424	832,41539
16	408,41539	205	613,41539
17	408,41539	8	416,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

Figura 34. Comparativa de la producción de energía fotovoltaica y OTEC, así como su combinación de los meses Enero, Febrero y Marzo.

ABRIL			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	395,247	0	395,247
1	395,247	0	395,247
2	395,247	0	395,247
3	395,247	0	395,247
4	395,247	0	395,247
5	395,247	0	395,247
6	395,247	93	488,247
7	395,247	287	682,247
8	395,247	470	865,247
9	395,247	607	1002,247
10	395,247	674	1069,247
11	395,247	685	1080,247
12	395,247	682	1077,247
13	395,247	625	1020,247
14	395,247	514	909,247
15	395,247	341	736,247
16	395,247	149	544,247
17	395,247	5	400,247
18	395,247	0	395,247
19	395,247	0	395,247
20	395,247	0	395,247
21	395,247	0	395,247
22	395,247	0	395,247
23	395,247	0	395,247

MAYO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	85	493,41539
7	408,41539	257	665,41539
8	408,41539	435	843,41539
9	408,41539	560	968,41539
10	408,41539	653	1061,41539
11	408,41539	651	1059,41539
12	408,41539	636	1044,41539
13	408,41539	578	986,41539
14	408,41539	460	868,41539
15	408,41539	284	692,41539
16	408,41539	111	519,41539
17	408,41539	5	413,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

JUNIO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	395,247	0	395,247
1	395,247	0	395,247
2	395,247	0	395,247
3	395,247	0	395,247
4	395,247	0	395,247
5	395,247	0	395,247
6	395,247	64	459,247
7	395,247	221	616,247
8	395,247	387	782,247
9	395,247	516	911,247
10	395,247	598	993,247
11	395,247	608	1003,247
12	395,247	588	983,247
13	395,247	531	926,247
14	395,247	420	815,247
15	395,247	264	659,247
16	395,247	109	504,247
17	395,247	11	406,247
18	395,247	0	395,247
19	395,247	0	395,247
20	395,247	0	395,247
21	395,247	0	395,247
22	395,247	0	395,247
23	395,247	0	395,247

Figura 35. Comparativa de la producción de energía fotovoltaica y OTEC, así como su combinación de los meses Abril, Mayo y Junio.

JULIO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	60	468,41539
7	408,41539	220	628,41539
8	408,41539	391	799,41539
9	408,41539	534	942,41539
10	408,41539	635	1043,41539
11	408,41539	636	1044,41539
12	408,41539	632	1040,41539
13	408,41539	566	974,41539
14	408,41539	447	855,41539
15	408,41539	292	700,41539
16	408,41539	134	542,41539
17	408,41539	16	424,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

AGOSTO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	81	489,41539
7	408,41539	269	677,41539
8	408,41539	452	860,41539
9	408,41539	590	998,41539
10	408,41539	698	1106,41539
11	408,41539	700	1108,41539
12	408,41539	707	1115,41539
13	408,41539	639	1047,41539
14	408,41539	510	918,41539
15	408,41539	336	744,41539
16	408,41539	147	555,41539
17	408,41539	10	418,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

SEPTIEMBRE			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	395,247	0	395,247
1	395,247	0	395,247
2	395,247	0	395,247
3	395,247	0	395,247
4	395,247	0	395,247
5	395,247	0	395,247
6	395,247	139	534,247
7	395,247	364	759,247
8	395,247	556	951,247
9	395,247	696	1091,247
10	395,247	748	1143,247
11	395,247	707	1102,247
12	395,247	692	1087,247
13	395,247	638	1033,247
14	395,247	514	909,247
15	395,247	346	741,247
16	395,247	144	539,247
17	395,247	1	396,247
18	395,247	0	395,247
19	395,247	0	395,247
20	395,247	0	395,247
21	395,247	0	395,247
22	395,247	0	395,247
23	395,247	0	395,247

Figura 36. Comparativa de la producción de energía fotovoltaica y OTEC, así como su combinación de los meses Julio, Agosto y Septiembre.

OCTUBRE			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	207	615,41539
7	408,41539	463	871,41539
8	408,41539	683	1091,41539
9	408,41539	809	1217,41539
10	408,41539	862	1270,41539
11	408,41539	840	1248,41539
12	408,41539	795	1203,41539
13	408,41539	726	1134,41539
14	408,41539	596	1004,41539
15	408,41539	391	799,41539
16	408,41539	150	558,41539
17	408,41539	0	408,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

NOVIEMBRE			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	395,247	0	395,247
1	395,247	0	395,247
2	395,247	0	395,247
3	395,247	0	395,247
4	395,247	0	395,247
5	395,247	0	395,247
6	395,247	212	607,247
7	395,247	438	833,247
8	395,247	612	1007,247
9	395,247	737	1132,247
10	395,247	764	1159,247
11	395,247	775	1170,247
12	395,247	752	1147,247
13	395,247	697	1092,247
14	395,247	580	975,247
15	395,247	393	788,247
16	395,247	175	570,247
17	395,247	0	395,247
18	395,247	0	395,247
19	395,247	0	395,247
20	395,247	0	395,247
21	395,247	0	395,247
22	395,247	0	395,247
23	395,247	0	395,247

DICIEMBRE			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	142	550,41539
7	408,41539	340	748,41539
8	408,41539	508	916,41539
9	408,41539	646	1054,41539
10	408,41539	706	1114,41539
11	408,41539	760	1168,41539
12	408,41539	752	1160,41539
13	408,41539	680	1088,41539
14	408,41539	550	958,41539
15	408,41539	387	795,41539
16	408,41539	170	578,41539
17	408,41539	0	408,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

Figura 37. Comparativa de la producción de energía fotovoltaica y OTEC, así como su combinación de los meses Octubre, Noviembre y Diciembre.

Energía generada. En la producción de energía fotovoltaica se puede observar que tiene sus picos de producción en el centro de cada periodo de generación, sin embargo, la energía por gradiente térmico se observa lineal constante,

En conclusión, la suma de las instalaciones marina y fotovoltaica permitirá una producción más estable y próxima a la energía demandada por la planta de desalación, durante gran parte del día. Para mejorar la comprensión de los datos y explorar otra perspectiva, es conveniente realizar una representación gráfica que muestre los MW producidos frente al tiempo, de todas las tecnologías. Desde la *Figura 38* a la *Figura 49* se muestran las curvas correspondientes a todos los días modelo de producción definidos

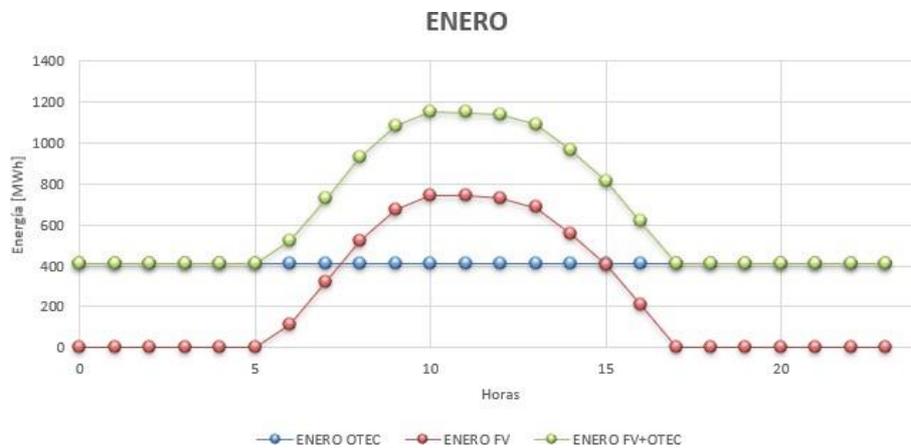


Figura 38. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de enero.



Figura 39. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de febrero.



Figura 40. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de marzo.

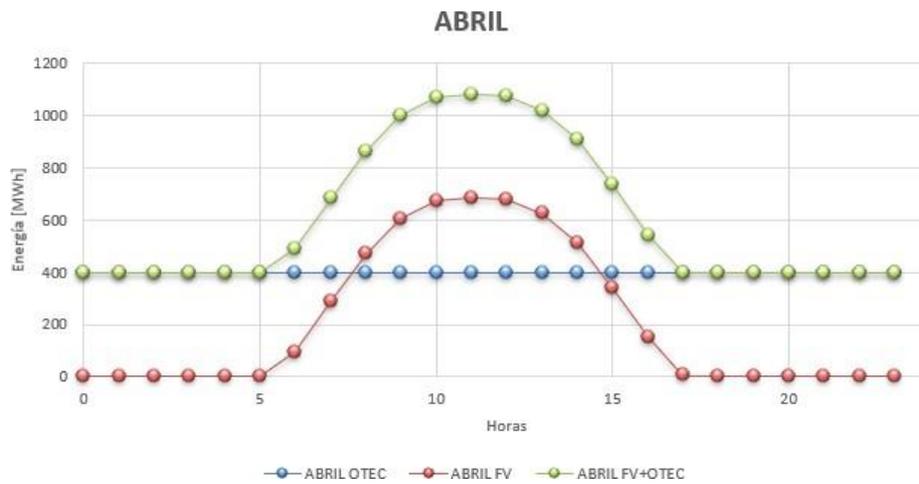


Figura 41. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de abril.

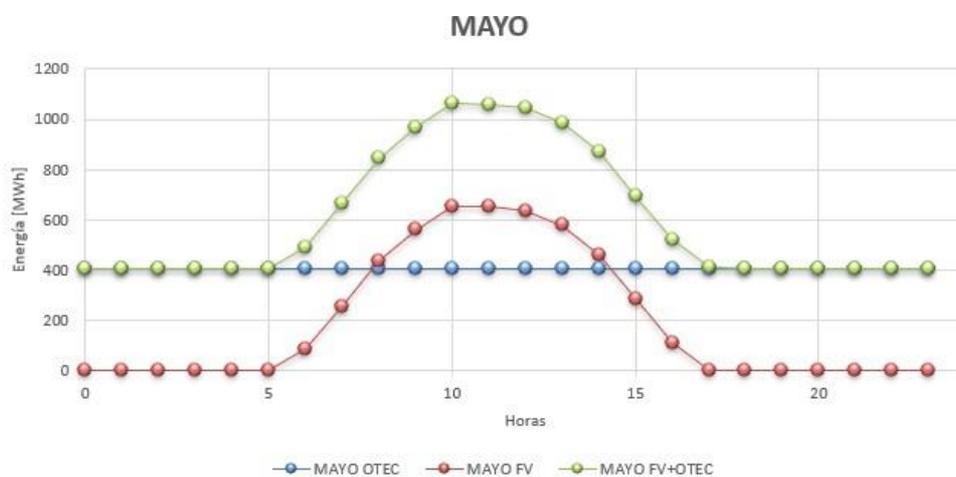


Figura 42. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de mayo.

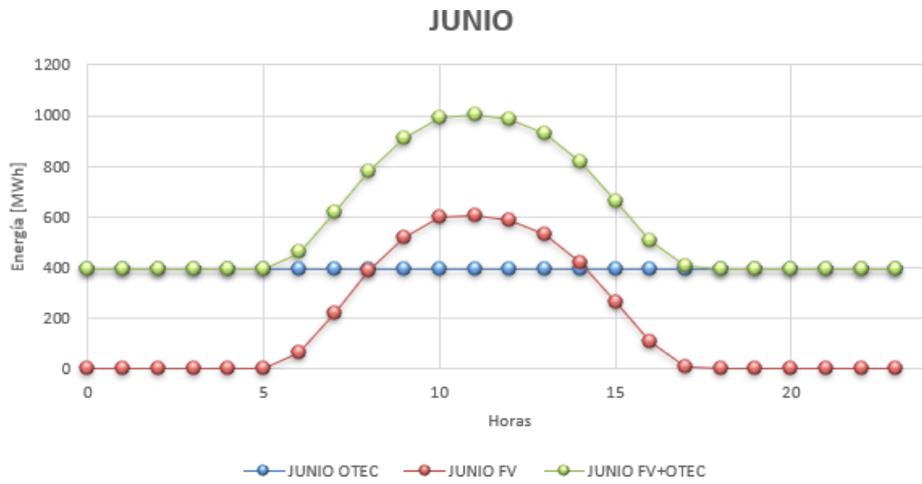


Figura 43. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de junio.



Figura 44. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de julio.



Figura 45. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de agosto.

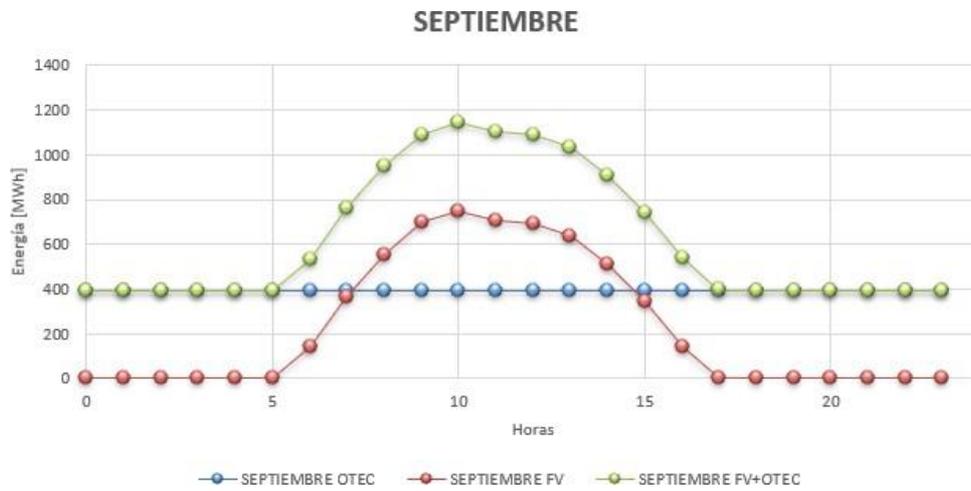


Figura 46. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de septiembre.

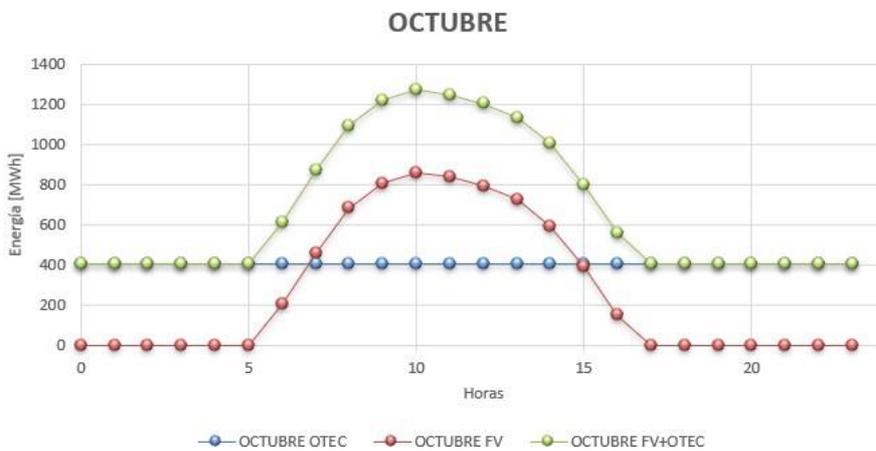


Figura 47. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de octubre.

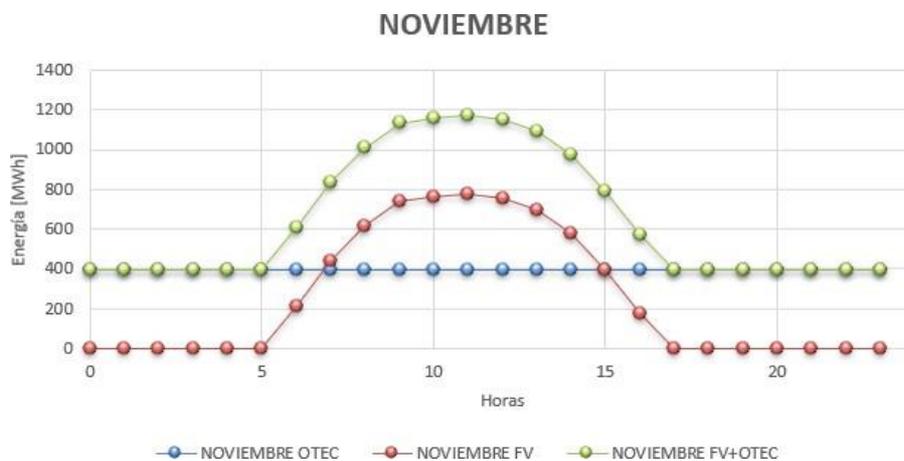


Figura 48. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo de noviembre.

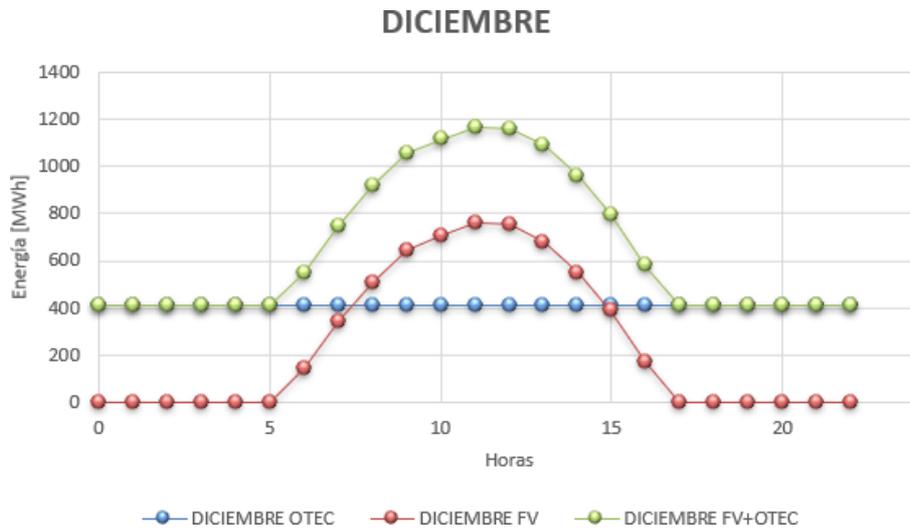


Figura 49. Comparativa de la potencia OTEC y la FV vs días modelo diciembre.

Finalmente, en la tabla obtenemos la energía transmitida en [MWh] total por mes y anual, observando que la producción conjunta es bastante constante a lo largo del año, teniendo su pico de mayor potencia en Octubre con 16323 [MWh], siendo el menor en Junio con 13802 [MWh].

Mes	FV [MWh]	OTEC [MWh]	FV+OTEC [MWh]
Enero	5695	9801	15497
Febrero	5476	9169	14646
Marzo	5870	9801	15670
Abril	5132	9485	14617
Mayo	4716	9801	14516
Junio	4318	9485	13802
Julio	4562	9801	14364
Agosto	5140	9801	14940
Septiembre	5546	9485	15030
Octubre	6522	9801	16323
Noviembre	6135	9485	15620
Diciembre	5640	9801	15442
TOTAL AÑO	64752	115716	180467

Figura 50. Tabla de potencia generada FV, OTEC y conjunta mensualmente y total anual.

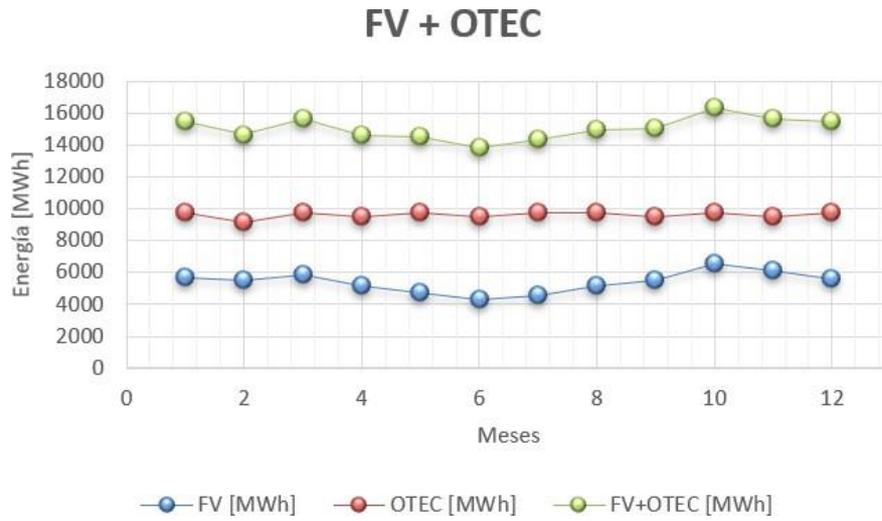


Figura 51. Gráfica de potencia generada FV, OTEC y conjunta mensualmente y total anual.

6 CONSUMO PLANTA DESALADORA

Finalmente, en este capítulo se presentan las conclusiones derivadas del análisis sobre la posible implementación de la tecnología fotovoltaica y la maremotérmica (OTEC) en el Golfo de Davao, Filipinas. Se lleva a cabo un estudio energético que combina estas tecnologías con el objetivo de que una planta desaladora pueda ser alimentada por fuentes de energía renovable.

El estudio de este proyecto destaca por la complementariedad que existe entre los recursos energéticos solares y los marítimos en el emplazamiento seleccionado. Al ser una ubicación donde las características solares son favorables y cuentan con unos buenos niveles de irradiación y la temperatura del agua tanto superficial como profunda son constantes durante todo el año hacen que la tecnología por gradiente térmico oceánico sea una buena opción como recurso energético en la zona para producir energía y combinar ambas.

En este apartado se describe la producción de agua necesaria para abastecer a la población de Davao, Filipinas, y el consumo energético de una planta desaladora por ósmosis inversa diseñada para satisfacer esta demanda.

- **Demanda de agua**

Para estimar la demanda de agua de la población de Davao, se considera un consumo promedio de agua de 125 litros por persona por día (L/persona/día) [9], datos y estimaciones comunes para áreas urbanas en Filipinas, en que se incluye el agua usada en uso doméstico y la consumida en comidas y beber.

Población estimada: 1,700,000 habitantes

Consumo promedio de agua: 125 L/persona/día

$$\text{Demanda diaria de agua} = \text{Población} \cdot \text{Consumo promedio}$$

$$\text{Demanda diaria de agua} = 212500000 \text{ L/día} = 212,500 \text{ m}^3/\text{día}$$

- **Consumo Energético de la Planta Desaladora**

La tecnología de ósmosis inversa (RO) es una de las más eficientes y comúnmente utilizadas para desalación. El consumo energético para una planta de RO varía entre 3 y 5 kWh por metro cúbico de agua producida.

Se analiza para los 3 consumos típicos principales de una planta desaladora: 3 kWh/m³, 4 kWh/m³, 5 kWh/m³.

Para este caso supondremos un consumo energético de 3 kWh/m³:

$$\text{Consumo energético diario} = \text{Capacidad de producción} \cdot \text{Consumo energético por m}^3$$

Para ello en la *Figura 52*, *Figura 53* y *Figura 54* se muestra la potencia generada por la hibridación de las tecnologías renovables (FV+OTEC), el consumo típico de la planta desaladora para cada caso y la energía disponible que obtendríamos.

Consumo Energético por m ³ de agua [3 kWh/m ³]			
Mes	FV+OTEC [MWh]	Consumo _{P.Desal} [MWh]	Energía Disponible [MWh]
Enero	15497	11250	4247
Febrero	14646	10500	4146
Marzo	15670	11650	4020
Abril	14617	11250	3367
Mayo	14516	11650	2866
Junio	13802	11250	2552
Julio	14364	11650	2714
Agosto	14940	11650	3290
Septiembre	15030	11250	3780
Octubre	16323	11650	4673
Noviembre	15620	11250	4370
Diciembre	15442	11650	3792
Total Anual	180467	136650	43817

Figura 52. Tabla consumo energético por m³ [3kWh/m³] y energía disponible [MWh]

Por lo que podemos observar para este primer caso la combinación de ambas fuentes energías abastecerían energéticamente la planta desaladora al 100% dando un 24,27% más de energía excedente para la red.

Consumo Energético por m ³ de agua [4 kWh/m ³]			
Mes	FV+OTEC [MWh]	Consumo _{P.Desal} [MWh]	Energía Disponible [MWh]
Enero	15497	15000	497
Febrero	14646	14000	646
Marzo	15670	15500	170
Abril	14617	15000	-383
Mayo	14516	15500	-984
Junio	13802	15000	-1198
Julio	14364	15500	-1136
Agosto	14940	15500	-560
Septiembre	15030	15000	30
Octubre	16323	15500	823
Noviembre	15620	15000	620
Diciembre	15442	15500	-58
Total Anual	180467	182000	-1533

Figura 53. Tabla consumo energético por m³ [4kWh/m³] y energía disponible [MWh].

Evaluando el segundo caso, se concluye que la potencia generada por la planta fotovoltaica y la planta OTEC es insuficiente para satisfacer completamente la demanda energética de la planta desaladora. El déficit de energía es de -1533 MWh, indicando que se cubre el 99,15% de la demanda total de la planta desaladora. Esto implica que, aunque la generación combinada de ambas plantas casi logra satisfacer la demanda energética, aún se requiere un pequeño complemento de energía para alcanzar el abastecimiento total.

Consumo Energético por m ³ de agua [5 kWh/m ³]			
Mes	FV+OTEC [MWh]	Consumo _{P.Desal} [MWh]	Energía Disponible [MWh]
Enero	15497	18750	-3253
Febrero	14646	17500	-2854
Marzo	15670	19375	-3705
Abril	14617	18750	-4133
Mayo	14516	19375	-4859
Junio	13802	18750	-4948
Julio	14364	19375	-5011
Agosto	14940	19375	-4435
Septiembre	15030	18750	-3720
Octubre	16323	19375	-3052
Noviembre	15620	18750	-3130
Diciembre	15442	19375	-3933
Total Anual	180467	227500	-47033

Figura 54. Tabla consumo energético por m³ [3kWh/m³] y energía disponible [MWh]

En la última casuística, se observa que hay un déficit energético, es decir, se necesitarían 47033 MWh/año más para satisfacer las necesidades demandadas por la planta desaladora, siendo así el porcentaje de la potencia generada por la hibridación de ambas tecnologías del 73,93%.

7 CONCLUSIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones del análisis sobre la viabilidad de implementar la tecnología marina por gradiente térmico oceánico y las fotovoltaicas para suministrar energéticamente una desaladora en Filipinas. El estudio se enfoca principalmente en evaluar cómo combinar estas tecnologías para que una planta desaladora pueda operar utilizando exclusivamente fuentes de energía renovables.

Tras el análisis realizado de ambas tecnologías, se pone en manifiesto la complementariedad que existe entre ambos recursos energéticos en la localización seleccionada. En dicho emplazamiento, tanto el recurso solar como el térmico marino son muy constantes a lo largo del año, teniendo además una alta irradiación en la tecnología solar y un buen gradiente térmico en la marina, lo cual hace que puedan combinarse ambas tecnologías y asegurar una continuidad en su producción energética.

Por otro lado, una planta desaladora utilizando como tecnología la ósmosis inversa, tiene una media de consumo energético de agua por m^3 de 4 $[\text{kWh}/\text{m}^3]$, por lo que con los resultados obtenidos en el capítulo anterior podemos observar que nuestra planta desaladora estaría abastecida energéticamente al 99,15% por la combinación de la energía fotovoltaica y la OTEC, utilizando únicamente de la red 1533 $[\text{MWh}]$ anual.

Sin olvidar, que uno de los beneficios que obtenemos en la energía por gradiente térmico oceánico usando el ciclo híbrido es que también desala agua en su proceso, por lo tanto, si la población de Davao es de 1.8 millones de personas y el consumo de agua es de $0,1 \text{ m}^3$ por persona al día, tendríamos un consumo total de agua de $180,000 \text{ m}^3/\text{día}$, la cantidad de agua desalada producida por el ciclo híbrido es de $(45,273.6 \text{ m}^3/\text{día})$ que no sería suficiente para abastecer a toda la población de Davao ($180,000 \text{ m}^3/\text{día}$). La capacidad de desalación cubriría aproximadamente el 25% de la demanda total de agua de la población de Davao.

Finalmente, en Davao, Filipinas, debido al fuerte crecimiento de la población y de las necesidades básicas de ésta, este trabajo demuestra la viabilidad de suministrar la demanda energética de una planta desaladora a través de la fotovoltaica y de la OTEC.

Referencias

- [1] Global Solar Atlas (<https://globalsolaratlas.info/>) (10/04/2024).
- [2] Marta Maria Guillen de la Oliva, Estudio de una planta híbrida mareomotriz de doble cuenca/solar PV para su aplicación a tecnologías del agua. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Sevilla. Máster en Sistemas de Energía Térmica (2020)
- [3] Raul Gil Alba, Estudio sobre la implantación de la tecnología maremotérmica. Trabajo Fin de Grado. Universidad Carlos III de Madrid. Grado en Tecnologías Industriales (2017).
- [4] Antonio José Cebaqueba Gutiérrez. Análisis comparativo entre la producción real de energía eléctrica de una planta fotovoltaica y los resultados obtenidos mediante softwares de simulación. Trabajo Fin de Máster. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla (2021)
- [5] PVsyst V7.4.6. [PVsyst – Software fotovoltaico](#) (21/05/2024)
- [6] Plantas OTEC, IIDEA, Desalación y Energías Alternas Instituto de Ingeniería - UNAM. [IIDEA \(unam.mx\)](#)
- [7] Software thermophysical property database "CoolProp".
- [8] H. Uehara y Y. Ikegami, "Optimization of a closed cycle OTEC system", ASME Journal of Solar Energy Engineering, vol. 112, pp. 247-256, 1990.
- [9] Water supply and sanitation in the Philippines. [Abastecimiento de agua y saneamiento en Filipinas - Wikipedia, la enciclopedia libre](#)
- [10] [Refrigerante R-22: Prohibición y limitación de su uso - Fempa](#)

ANEXO

ANEXO A: ESTUDIO PLANTA OTEC

Horas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	111	84	107	93	85	64	60	81	139	207	212	142
7	318	283	344	287	257	221	220	269	364	463	438	340
8	521	484	536	470	435	387	391	452	556	683	612	508
9	672	628	679	607	560	516	534	590	696	809	737	646
10	745	693	772	674	653	598	635	698	748	862	764	706
11	741	707	731	685	651	608	636	700	707	840	775	760
12	732	695	742	682	636	588	632	707	692	795	752	752
13	685	678	715	625	578	531	566	639	638	726	697	680
14	558	576	606	514	460	420	447	510	514	596	580	550
15	405	423	424	341	284	264	292	336	346	391	393	387
16	207	219	205	149	111	109	134	147	144	150	175	170
17	1	7	8	5	5	11	16	10	1	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Horas	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
1	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
2	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
3	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
4	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
5	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
6	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
7	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
8	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
9	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
10	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
11	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
12	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
13	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
14	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
15	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
16	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
17	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
18	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
19	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
20	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
21	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
22	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539
23	408,41539	382,06601	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539	408,41539	395,247	408,41539	395,247	408,41539

ENERO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	111	519,41539
7	408,41539	318	726,41539
8	408,41539	521	929,41539
9	408,41539	672	1080,41539
10	408,41539	745	1153,41539
11	408,41539	741	1149,41539
12	408,41539	732	1140,41539
13	408,41539	685	1093,41539
14	408,41539	558	966,41539
15	408,41539	405	813,41539
16	408,41539	207	615,41539
17	408,41539	1	409,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

FEBRERO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	382,06601	0	382,06601
1	382,06601	0	382,06601
2	382,06601	0	382,06601
3	382,06601	0	382,06601
4	382,06601	0	382,06601
5	382,06601	0	382,06601
6	382,06601	84	466,06601
7	382,06601	283	665,06601
8	382,06601	484	866,06601
9	382,06601	628	1010,06601
10	382,06601	693	1075,06601
11	382,06601	707	1089,06601
12	382,06601	695	1077,06601
13	382,06601	678	1060,06601
14	382,06601	576	958,06601
15	382,06601	423	805,06601
16	382,06601	219	601,06601
17	382,06601	7	389,06601
18	382,06601	0	382,06601
19	382,06601	0	382,06601
20	382,06601	0	382,06601
21	382,06601	0	382,06601
22	382,06601	0	382,06601
23	382,06601	0	382,06601

MARZO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	107	515,41539
7	408,41539	344	752,41539
8	408,41539	536	944,41539
9	408,41539	679	1087,41539
10	408,41539	772	1180,41539
11	408,41539	731	1139,41539
12	408,41539	742	1150,41539
13	408,41539	715	1123,41539
14	408,41539	606	1014,41539
15	408,41539	424	832,41539
16	408,41539	205	613,41539
17	408,41539	8	416,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

ABRIL			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	395,247	0	395,247
1	395,247	0	395,247
2	395,247	0	395,247
3	395,247	0	395,247
4	395,247	0	395,247
5	395,247	0	395,247
6	395,247	93	488,247
7	395,247	287	682,247
8	395,247	470	865,247
9	395,247	607	1002,247
10	395,247	674	1069,247
11	395,247	685	1080,247
12	395,247	682	1077,247
13	395,247	625	1020,247
14	395,247	514	909,247
15	395,247	341	736,247
16	395,247	149	544,247
17	395,247	5	400,247
18	395,247	0	395,247
19	395,247	0	395,247
20	395,247	0	395,247
21	395,247	0	395,247
22	395,247	0	395,247
23	395,247	0	395,247

MAYO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	85	493,41539
7	408,41539	257	665,41539
8	408,41539	435	843,41539
9	408,41539	560	968,41539
10	408,41539	653	1061,41539
11	408,41539	651	1059,41539
12	408,41539	636	1044,41539
13	408,41539	578	986,41539
14	408,41539	460	868,41539
15	408,41539	284	692,41539
16	408,41539	111	519,41539
17	408,41539	5	413,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

JUNIO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	395,247	0	395,247
1	395,247	0	395,247
2	395,247	0	395,247
3	395,247	0	395,247
4	395,247	0	395,247
5	395,247	0	395,247
6	395,247	64	459,247
7	395,247	221	616,247
8	395,247	387	782,247
9	395,247	516	911,247
10	395,247	598	993,247
11	395,247	608	1003,247
12	395,247	588	983,247
13	395,247	531	926,247
14	395,247	420	815,247
15	395,247	264	659,247
16	395,247	109	504,247
17	395,247	11	406,247
18	395,247	0	395,247
19	395,247	0	395,247
20	395,247	0	395,247
21	395,247	0	395,247
22	395,247	0	395,247
23	395,247	0	395,247

JULIO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	60	468,41539
7	408,41539	220	628,41539
8	408,41539	391	799,41539
9	408,41539	534	942,41539
10	408,41539	635	1043,41539
11	408,41539	636	1044,41539
12	408,41539	632	1040,41539
13	408,41539	566	974,41539
14	408,41539	447	855,41539
15	408,41539	292	700,41539
16	408,41539	134	542,41539
17	408,41539	16	424,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

AGOSTO			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	81	489,41539
7	408,41539	269	677,41539
8	408,41539	452	860,41539
9	408,41539	590	998,41539
10	408,41539	698	1106,41539
11	408,41539	700	1108,41539
12	408,41539	707	1115,41539
13	408,41539	639	1047,41539
14	408,41539	510	918,41539
15	408,41539	336	744,41539
16	408,41539	147	555,41539
17	408,41539	10	418,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

SEPTIEMBRE			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	395,247	0	395,247
1	395,247	0	395,247
2	395,247	0	395,247
3	395,247	0	395,247
4	395,247	0	395,247
5	395,247	0	395,247
6	395,247	139	534,247
7	395,247	364	759,247
8	395,247	556	951,247
9	395,247	696	1091,247
10	395,247	748	1143,247
11	395,247	707	1102,247
12	395,247	692	1087,247
13	395,247	638	1033,247
14	395,247	514	909,247
15	395,247	346	741,247
16	395,247	144	539,247
17	395,247	1	396,247
18	395,247	0	395,247
19	395,247	0	395,247
20	395,247	0	395,247
21	395,247	0	395,247
22	395,247	0	395,247
23	395,247	0	395,247

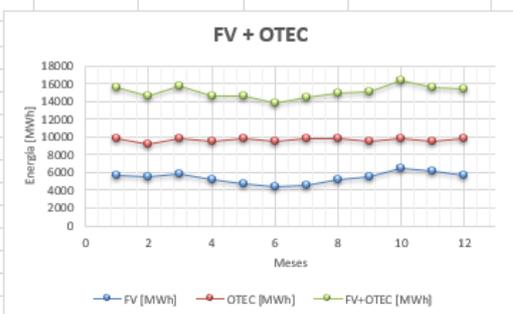
OCTUBRE			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	207	615,41539
7	408,41539	463	871,41539
8	408,41539	683	1091,41539
9	408,41539	809	1217,41539
10	408,41539	862	1270,41539
11	408,41539	840	1248,41539
12	408,41539	795	1203,41539
13	408,41539	726	1134,41539
14	408,41539	596	1004,41539
15	408,41539	391	799,41539
16	408,41539	150	558,41539
17	408,41539	0	408,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

NOVIEMBRE			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	395,247	0	395,247
1	395,247	0	395,247
2	395,247	0	395,247
3	395,247	0	395,247
4	395,247	0	395,247
5	395,247	0	395,247
6	395,247	212	607,247
7	395,247	438	833,247
8	395,247	612	1007,247
9	395,247	737	1132,247
10	395,247	764	1159,247
11	395,247	775	1170,247
12	395,247	752	1147,247
13	395,247	697	1092,247
14	395,247	580	975,247
15	395,247	393	788,247
16	395,247	175	570,247
17	395,247	0	395,247
18	395,247	0	395,247
19	395,247	0	395,247
20	395,247	0	395,247
21	395,247	0	395,247
22	395,247	0	395,247
23	395,247	0	395,247

DICIEMBRE			
Horas	OTEC	FV	FV+OTEC
0	408,41539	0	408,41539
1	408,41539	0	408,41539
2	408,41539	0	408,41539
3	408,41539	0	408,41539
4	408,41539	0	408,41539
5	408,41539	0	408,41539
6	408,41539	142	550,41539
7	408,41539	340	748,41539
8	408,41539	508	916,41539
9	408,41539	646	1054,41539
10	408,41539	706	1114,41539
11	408,41539	760	1168,41539
12	408,41539	752	1160,41539
13	408,41539	680	1088,41539
14	408,41539	550	958,41539
15	408,41539	387	795,41539
16	408,41539	170	578,41539
17	408,41539	0	408,41539
18	408,41539	0	408,41539
19	408,41539	0	408,41539
20	408,41539	0	408,41539
21	408,41539	0	408,41539
22	408,41539	0	408,41539
23	408,41539	0	408,41539

Mes	FV [MWh]	OTEC [MWh]	FV+OTEC [MWh]
Enero	5695	9801	15497
Febrero	5476	9169	14646
Marzo	5870	9801	15670
Abril	5132	9485	14617
Mayo	4716	9801	14516
Junio	4318	9485	13802
Julio	4562	9801	14364
Agosto	5140	9801	14940
Septiembre	5546	9485	15030
Octubre	6522	9801	16323
Noviembre	6135	9485	15620
Diciembre	5640	9801	15442
TOTAL AÑO	64752	115716	180467

Consumo Energético por m ³ de agua [3 kWh/m ³]			
Mes	FV+OTEC [MWh]	Consumo _{P.Desal} [MWh]	Energía Disponible [MWh]
Enero	15497	11250	4247
Febrero	14646	10500	4146
Marzo	15670	11650	4020
Abril	14617	11250	3367
Mayo	14516	11650	2866
Junio	13802	11250	2552
Julio	14364	11650	2714
Agosto	14940	11650	3290
Septiembre	15030	11250	3780
Octubre	16323	11650	4673
Noviembre	15620	11250	4370
Diciembre	15442	11650	3792
Total Anual	180467	136650	43817



Consumo Energético por m ³ de agua [4 kWh/m ³]			
Mes	FV+OTEC [MWh]	Consumo _{P.Desal} [MWh]	Energía Disponible [MWh]
Enero	15497	15000	497
Febrero	14646	14000	646
Marzo	15670	15500	170
Abril	14617	15000	-383
Mayo	14516	15500	-984
Junio	13802	15000	-1198
Julio	14364	15500	-1136
Agosto	14940	15500	-560
Septiembre	15030	15000	30
Octubre	16323	15500	823
Noviembre	15620	15000	620
Diciembre	15442	15500	-58
Total Anual	180467	182000	-1533

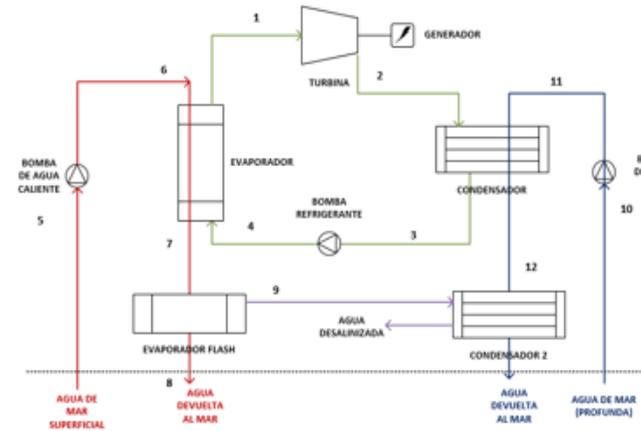
Consumo Energético por m ³ de agua [5 kWh/m ³]			
Mes	FV+OTEC [MWh]	Consumo _{Desal} [MWh]	Energía Disponible [MWh]
Enero	15497	18750	-3253
Febrero	14646	17500	-2854
Marzo	15670	19375	-3705
Abril	14617	18750	-4133
Mayo	14516	19375	-4859
Junio	13802	18750	-4948
Julio	14364	19375	-5011
Agosto	14940	19375	-4435
Septiembre	15030	18750	-3720
Octubre	16323	19375	-3052
Noviembre	15620	18750	-3130
Diciembre	15442	19375	-3933
Total Anual	180467	227500	-47033

		T [C]	P[kPa]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgk]	u[kj/kg]	Cp[kj/kgk]	Densidad [kg/m3]	m[kg/s]
	Referencia	27	302,6000	113,4672	0,395	113,1635	4,18	996,606	26000
	5	27	302,6	113,4672	0,395	113,1635	4,18	996,606	26000
	6	27	313,3	113,477	0,395	113,1622	4,1799	996,6101	26000
	7	24,13	313,3	101,479	0,3549	101,479	4,1816	997,363	26000
	8	13,17	1,5148	55,31	0,1977	55,3126	4,1909	999,3113	25800
	9	13,17	1,5148	55,31	0,1977	55,3126	4,1909	999,3113	400
	1	24	960	1464	5,05	1335	3,0934	7,4618	240
	2	6,8	550	1395	5,05	1274	2,8984	4,98	240
	3	6,8	550	212	0,825	211,1	4,6514	630,168	240
	4	8,02	960	220,4	0,825	219,5	4,66	627,634	240
	10	4	10160	26,9186	0,0609	16,7926	4,1645	1004,9036	29300
	11	4	10190	26,9317	0,0609	16,7925	4,165	1004,9109	29300
	12	6,5	10190	37,3413	0,0983	27,1991	4,1618	1004,7866	29300

Ecuaciones	W[kW]	W[MW]
$\dot{m}_D = r_{ef} \cdot \dot{m}_C$	393	33945
$W_T = \dot{m}_{FT} \cdot (h_{1b} - h_{10})$	15732	15,732
$W_{BF} = \dot{m}_F \cdot (h_{1b} - h_{10}) / \eta_{BF}$	479,7875	0,4797875
$Q_E = \dot{m}_{FT} \cdot (h_1 - h_4)$	298464	298,464
$Q_C = \dot{m}_C \cdot (h_2 - h_2)$	-30994600	-30994,6
$W_{BC} = \dot{m}_C \cdot (h_{c2} - h_2) / \eta_{BC}$	302,0705882	0,3020706
$W_{BFT} = \dot{m}_{FT} \cdot (h_{4s} - h_3) / \eta_{BFT}$	2520	2,52
$W_V = (1,6 \cdot 10^5) \dot{m}_C$	419,2	0,4192
$W_N, W_T - W_{BFT}$	13212	13,212
$\eta = W_N / Q_E$	4,426664522	

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Rendimientos			
Rendimient	η_T	0,95	-
Rendimient	η_{BF}	0,8	-
Rendimient	η_{BC}	0,85	-
Rendimient	η_{BFT}	0,8	-
Flujos máscos			
Flujo masicd	\dot{m}_C	26200	kg/s
Flujo masicd	\dot{m}_F	29300	kg/s
Flujo masicd	\dot{m}_{FT}	240	kg/s
Temperaturas			
Temperatur	TE	27	°c
Temperatur	TI	4	°c
Cámara de Vacío			
Presión en e	P_{ef}	1,5	kPa
Capacidad d	r_{ef}	1,5	%

FLUIDO 717

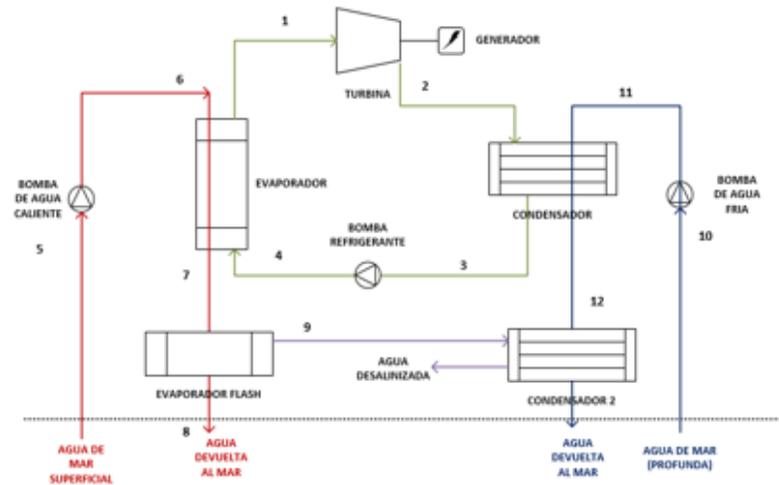


		T [C]	P[kPa]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	u[kj/kg]	Cp[kj/kgK]	Densidad	m[kg/s]
	Referencia	27	302,6000	113,4672	0,395	113,1635	4,18	996,606	26000
	5	27	302,6	113,4672	0,395	113,1635	4,18	996,606	26000
	6	27	313,3	113,477	0,395	113,1622	4,1799	996,6101	26000
	7	24,13	313,3	101,479	0,3549	101,479	4,1816	997,363	26000
	8	13,17	1,5148	55,31	0,1977	55,3126	4,1909	999,3113	25800
	9	13,17	1,5148	55,31	0,1977	55,3126	4,1909	999,3113	400
	1	24	960	258,8	0,9032	234,8	1,014	1538,72	240
	2	3,04	550	245,7	0,9032	222,8	1,0128	1271,11	240
	3	3,04	550	48,14	0,188	47,74	1,0645	1677,6	240
	4	4,14	960	51,35	0,188	50,84	1,0645	1670,11	240
	10	4	10160	26,9186	0,0609	16,7926	4,1645	1004,9036	29300
	11	4	10190	26,9317	0,0609	16,7925	4,165	1004,9109	29300
	12	6,5	10190	37,3413	0,0983	27,1991	4,1618	1004,7866	29300

Ecuaciones	W[kW]	W[MW]
$\dot{m}_D = r_{ef} \cdot \dot{m}_C$	393	0,393
$W_T = \dot{m}_{FT} \cdot (h_2 - h_1)$	2986,8	2,9868
$W_{BF} = \dot{m}_F \cdot (h_{11s} - h_{10}) / \eta_{BF}$	479,7875	0,4797875
$Q_E = \dot{m}_{FT} \cdot (h_1 - h_4)$	49788	49,788
$Q_C = \dot{m}_C \cdot (h_3 - h_2)$	-5176072	-5176,072
$W_{BC} = \dot{m}_C \cdot (h_{6s} - h_5) / \eta_{BC}$	302,07059	0,3020706
$W_{BFT} = \dot{m}_{FT} \cdot (h_{4s} - h_3) / \eta_{BFT}$	963	0,963
$W_V = (1,6 \cdot 10^5) \dot{m}_C$	468,8	0,4688
$W_{Nc} = W_T - W_{BFT}$	2023,8	2,0238
$\eta = W_{Nc} / Q_E$	4,0648349	

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Rendimientos			
Rendimier	η_T	0,95	-
Rendimier	η_{BF}	0,8	-
Rendimier	η_{BC}	0,85	-
Rendimier	η_{BFT}	0,8	-
Flujos másicos			
Flujo masi	\dot{m}_C	26200	kg/s
Flujo masi	\dot{m}_F	29300	kg/s
Flujo masi	\dot{m}_{FT}	240	kg/s
Temperaturas			
Temperatu	TE	27	°C
Temperatu	TI	4	°C
Cámara de Vacío			
Presión en	P_{ef}	1,5	kPa
Capacidad	r_{ef}	1,5	%

FLUIDO R22



PVsyst - Simulation report

Grid-Connected System

Project: PV Davao

Variant: Nueva variante de simulación

No 3D scene defined, no shadings

System power: 40.00 MWp

Davao - Philippines



Project: PV Davao

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.4.6

VCO, Simulation date:
21/05/24 11:27
with V7.4.6

Project summary

Geographical Site

Davao
Philippines

Situation

Latitude 7.07 °N
Longitude 125.61 °E
Altitude 13 m
Time zone UTC+8

Project settings

Albedo 0.20

Weather data

Davao
Meteonorm 8.1 (2016-2021), Sat=100% - Sintético

System summary

Grid-connected system

No 3D scene defined, no shadings

PV Field Orientation

Fixed plane
Tilt/Azimuth 30 / 0 °

Near Shadings

No Shadings

User's needs

Unlimited load (grid)

System information

PV Array

Nb. of modules 111111 units
Pnom total 40.00 MWp

Inverters

Nb. of units 1471.5 units
Pnom total 32.37 MWac
Pnom ratio 1.236

Results summary

Produced Energy 64752568 kWh/year Specific production 1619 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 82.60 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Main results	4
Loss diagram	5
Predef. graphs	6
P50 - P90 evaluation	7
Cost of the system	8
CO ₂ Emission Balance	9



PVsyst V7.4.6

VCO, Simulation date:
21/05/24 11:27
with V7.4.6

General parameters

Grid-Connected System		No 3D scene defined, no shadings	
PV Field Orientation			
Orientation		Sheds configuration	
Fixed plane		No 3D scene defined	
Tilt/Azimuth	30 / 0 °		
		Models used	
		Transposition	Perez
		Diffuse	Perez, Meteornorm
		Circumsolar	separate
Horizon		Near Shadings	
Free Horizon		No Shadings	
		User's needs	
		Unlimited load (grid)	

PV Array Characteristics

PV module		Inverter	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	SPR-X22-360-COM	Model	SolarMax 22SHT
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	360 Wp	Unit Nom. Power	22.0 kWac
Number of PV modules	111111 units	Number of inverters	2943 * MPPT 50% 1471.5 units
Nominal (STC)	40.00 MWp	Total power	32373 kWac
Modules	10101 string x 11 In series	Operating voltage	180-950 V
At operating cond. (50°C)		Pnom ratio (DC:AC)	1.24
Pmpp	37.03 MWp	No power sharing between MPPTs	
U mpp	597 V		
I mpp	62012 A		
Total PV power		Total inverter power	
Nominal (STC)	40000 kWp	Total power	32373 kWac
Total	111111 modules	Nb. of inverters	1472 units
Module area	181190 m ²	0.5 unused	
Cell area	163520 m ²	Pnom ratio	1.24

Array losses

Thermal Loss factor		DC wiring losses		Module Quality Loss				
Module temperature according to irradiance		Global array res.	0.16 mΩ	Loss Fraction	1.0 %			
Uc (const)	20.0 W/m ² K	Loss Fraction	1.5 % at STC					
Uv (wind)	0.0 W/m ² K/m/s							
Module mismatch losses		Strings Mismatch loss						
Loss Fraction	2.0 % at MPP	Loss Fraction	0.1 %					
IAM Loss factor								
Incidence effect (IAM): User defined μ_{inc}								
0°	50°	60°	65°	70°	75°	82°	88°	90°
1.000	1.000	0.990	0.970	0.940	0.890	0.770	0.620	0.000



Project: PV Davao

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.4.6

VC0, Simulation date:

PVsyst TRIAL



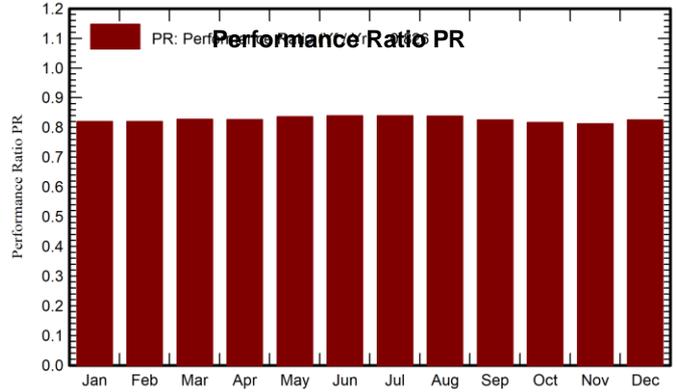
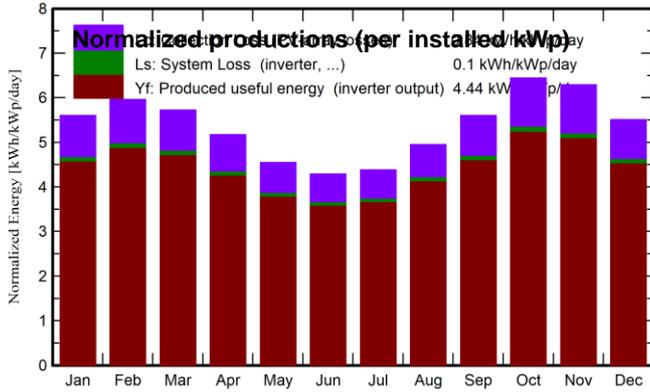
PVsyst V7.4.6

VC0, Simulation date:
21/05/24 11:27
with V7.4.6

Main results

System Production

Produced Energy 64752568 kWh/year Specific production 1619 kWh/kWp/year
Perf. Ratio PR 82.60 %



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	151.8	69.93	27.21	173.6	172.5	5818080	5695469	0.820
February	155.1	68.45	27.53	167.0	165.8	5595652	5475889	0.820
March	182.3	83.51	28.22	177.5	175.7	5996220	5870036	0.827
April	180.0	71.58	28.67	155.2	153.1	5243851	5132011	0.827
May	178.5	81.97	28.89	141.0	138.6	4819127	4715741	0.836
June	171.3	76.97	27.99	128.6	126.1	4411598	4317825	0.839
July	176.2	80.28	28.24	135.9	133.5	4661396	4562210	0.839
August	184.4	80.68	28.39	153.4	151.2	5251000	5140157	0.838
September	180.7	67.11	28.09	168.1	166.3	5664661	5546091	0.825
October	191.8	69.30	28.57	199.7	198.2	6658581	6522023	0.816
November	164.9	62.47	27.79	188.8	187.5	6264147	6135251	0.812
December	146.3	73.56	28.00	170.8	169.7	5759358	5639865	0.825
Year	2063.3	885.80	28.14	1959.7	1938.0	66143673	64752568	0.826

Legends

- GlobHor Global horizontal irradiation
- DiffHor Horizontal diffuse irradiation
- T_Amb Ambient Temperature
- GlobInc Global incident in coll. plane
- GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
- EArray Effective energy at the output of the array
- E_Grid Energy injected into grid
- PR Performance Ratio



Project: PV Davao

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.4.6

VC0, Simulaci3n de:

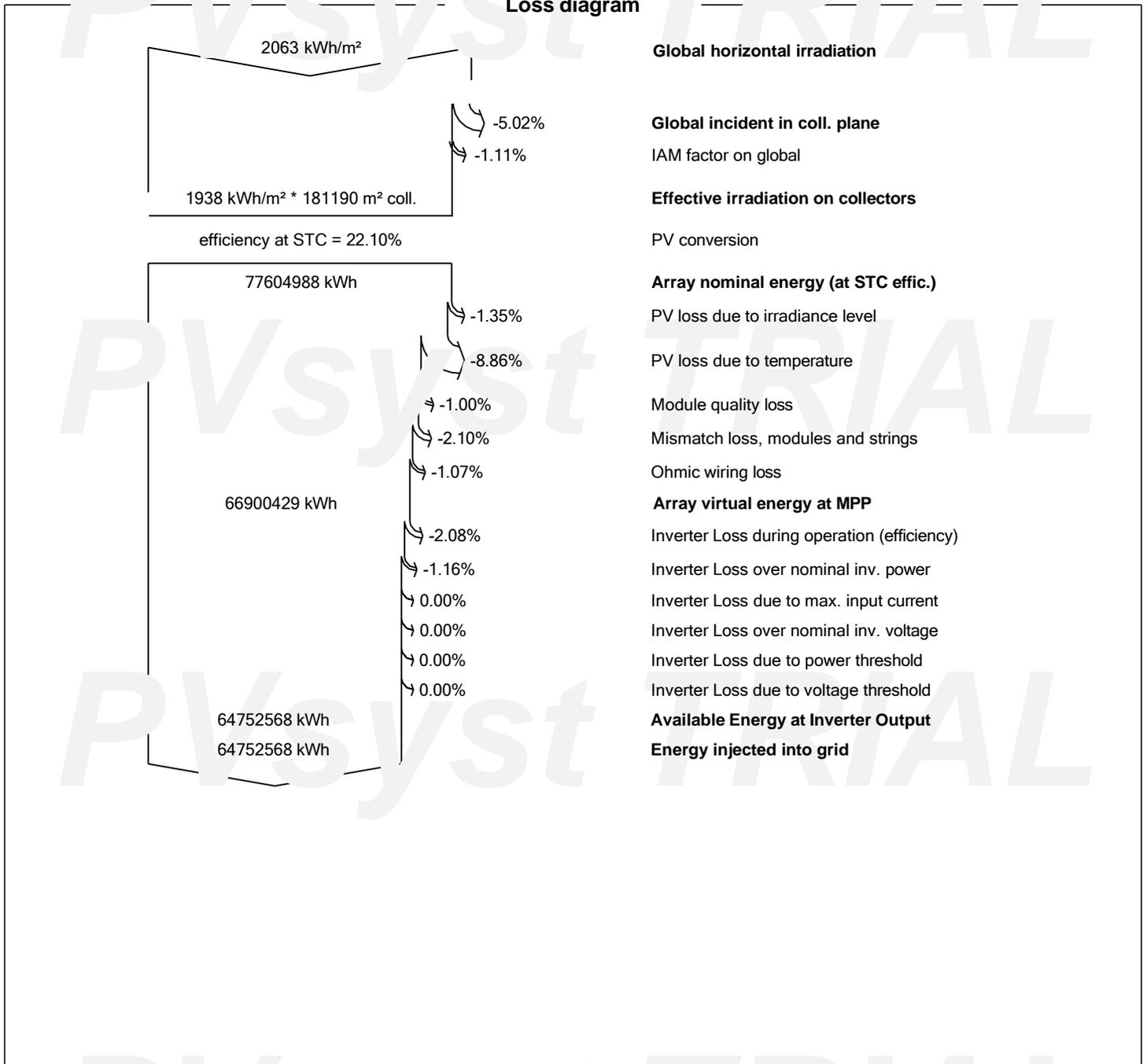
PVsyst TRIAL



PVsyst V7.4.6

VCO, Simulation date:
21/05/24 11:27
with V7.4.6

Loss diagram





Project: PV Davao

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.4.6

VC0, Simulation date:

PVsyst TRIAL

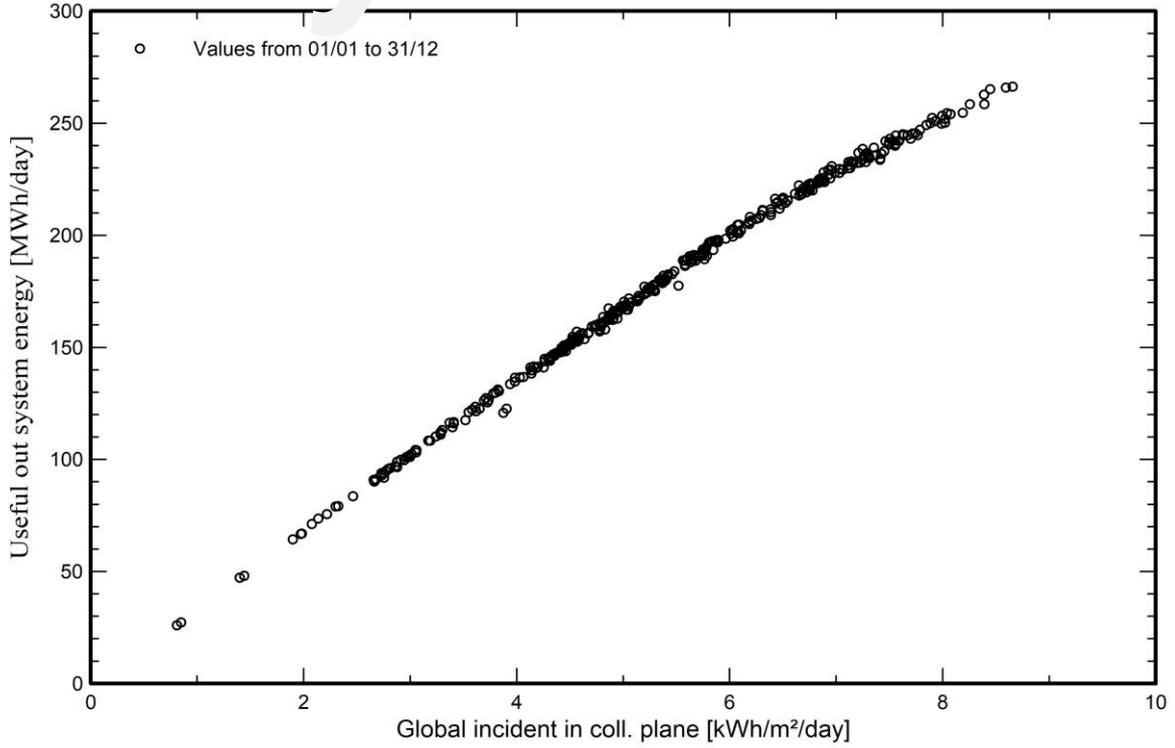


PVsyst V7.4.6

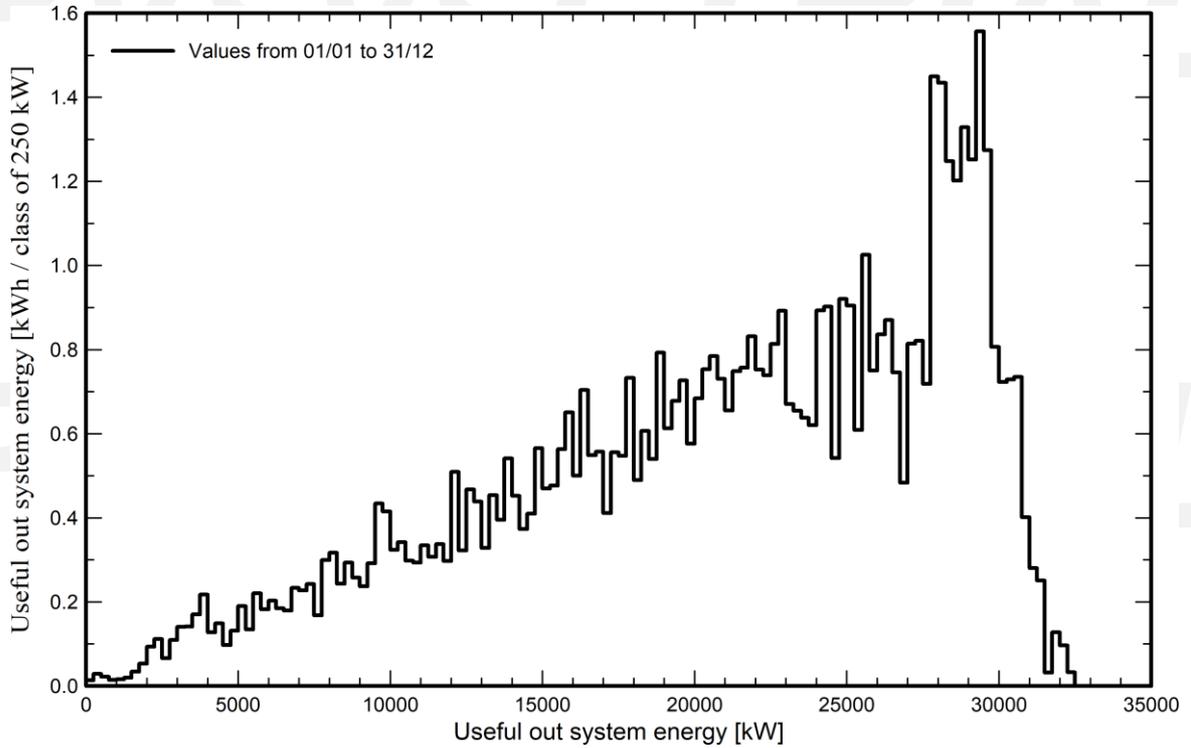
VC0, Simulation date:
21/05/24 11:27
with V7.4.6

Predef. graphs

Diagrama entrada/salida diaria



Distribución de potencia de salida del sistema





PVsyst V7.4.6

VC0, Simulation date:
21/05/24 11:27
with V7.4.6

P50 - P90 evaluation

Weather data

Source Meteororm 8.1 (2016-2021), Sat=100%
Kind Monthly averages
Sintético - Multi-year average
Year-to-year variability(Variance) 8.4 %

Specified Deviation

Climate change 0.0 %

Global variability (weather data + system)

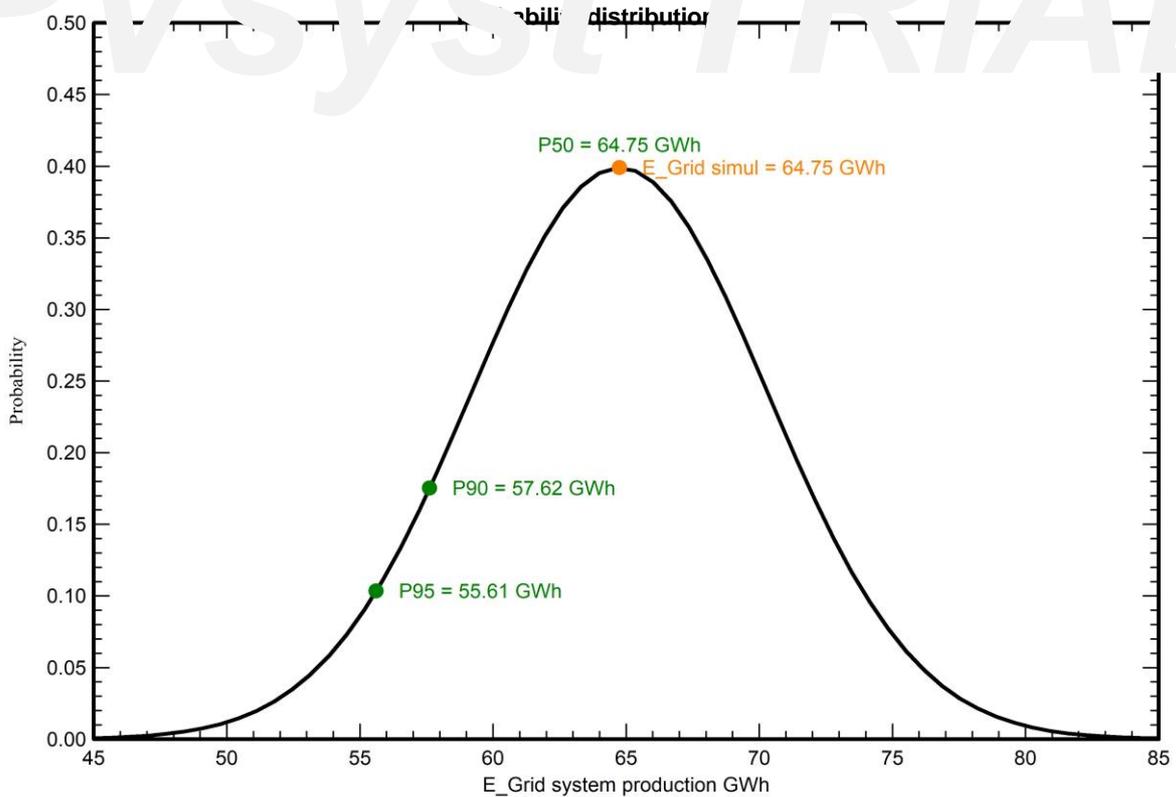
Variability (Quadratic sum) 8.6 %

Simulation and parameters uncertainties

PV module modelling/parameters 1.0 %
Inverter efficiency uncertainty 0.5 %
Soiling and mismatch uncertainties 1.0 %
Degradation uncertainty 1.0 %

Annual production probability

Variability 5.56 GWh
P50 64.75 GWh
P90 57.62 GWh
P95 55.61 GWh





Project: PV Davao

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.4.6

VC0, Simulation date:

PVsyst TRIAL



PVsyst V7.4.6

VCO, Simulation date:
21/05/24 11:27
with V7.4.6

Cost of the system

Installation costs

Item	Quantity units	Cost EUR	Total EUR
		Total	0.00
		Depreciable asset	0.00

Operating costs

Item	Total EUR/year
Total (OPEX)	0.00

System summary

Total installation cost 0.00 EUR
 Operating costs 0.00 EUR/year
 Produced Energy 64753 MWh/year

Cost of produced energy (LCOE)

0.0000 EUR/kWh



Project: PV Davao

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.4.6

VC0, Simulation date:

PVsyst TRIAL



PVsyst V7.4.6

VCO, Simulation date:
21/05/24 11:27
with V7.4.6

CO₂ Emission Balance

Total: 736510.4 tCO₂

Generated emissions

Total: 72532.96 tCO₂

Source: Detailed calculation from table below

Replaced Emissions

Total: 932437.0 tCO₂

System production: 64752.57 MWh/yr

Grid Lifecycle Emissions: 480 gCO₂/kWh

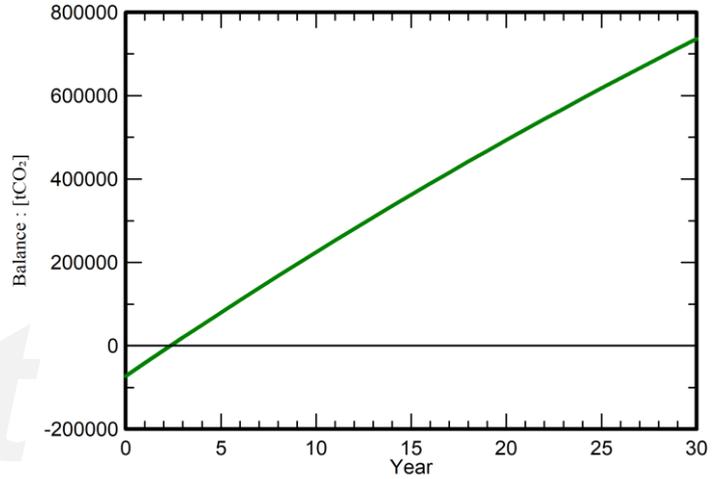
Source: IEA List

Country: Philippines

Lifetime: 30 years

Annual degradation: 1.0 %

Saved CO₂ Emission vs. Time



System Lifecycle Emissions Details

Item	LCE	Quantity	Subtotal [kgCO ₂]
Modules	1713 kgCO ₂ /kWp	40000 kWp	68508731
Supports	3.20 kgCO ₂ /kg	1111110 kg	3557330
Inverters	317 kgCO ₂ /	1472	466895



Project: PV Davao

Variant: Nueva variante de simulación

PVsyst V7.4.6

VC0, Simulation date:

PVsyst TRIAL