

“SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON CONCENTRADORES SOLARES CILÍNDRICO PARABÓLICOS PARA LA REGIÓN AREQUIPA”

AUTOR:

Manuel Luque Casanave, verman@verman.com.pe

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Mecánica

Av. Túpac Amaru 210, Rímac – Lima - Perú

Teléfono (+01) 4811070, E-mail: verman190848@gmail.com

RESUMEN

Se presenta la implementación del uso de un sistema nuevo de energías renovables para el país como lo es el uso de la energía solar térmica concentrada (Concentrated Solar Power-CSP) a través de un arreglo de concentradores solares cilíndrico parabólicos con el objetivo de generar 10 MW de energía eléctrica en la región Arequipa, debido a la muy buena radiación solar existente en la zona.

Se muestran los cálculos de balance energético, la selección y dimensionamiento del arreglo de los concentradores cilíndricos parabólicos en base a la radiación solar de la zona. Se determina el flujo requerido de aceite térmico para el transporte del calor, dimensionamiento de las tuberías, aislamiento y bombas asociadas; el cálculo de la energía térmica obtenida de los concentradores y transferida al aceite térmico, la determinación del intercambiador de calor aceite térmico-agua. El cálculo de la turbina de vapor y selección del generador eléctrico. Para la operación del sistema de generación eléctrica durante la noche se plantea el uso de acumulador térmico basado en el uso de la tecnología de almacenamiento de parte del calor generado en el día en sales fundentes. Se ha considerado también una caldera auxiliar como contingencia para la generación de vapor cuando por alguna causa esté fuera de servicio el sistema de calentamiento con el aceite térmico y sales fundentes.

Como conclusión se espera que el diseño presentado se pueda replicar en diversas regiones del país. Potencias de generación eléctrica de hasta 10 MW pueden tener la aprobación directa local de los gobiernos regionales, impulsando de esta forma la generación con energías renovables como un medio de adaptación al cambio climático.

Palabras clave: concentradores solares cilíndricos parabólicos, radiación solar, aceite térmico, turbina de vapor, sales fundentes.

ABSTRACT

It is presented the implementation of a new system using renewable energy for the country as is the use of concentrated solar power (CSP) through an array of cylindrical parabolic solar concentrators with the goal of generating 10 MW of electricity in the Arequipa region, due to the very good solar radiation having in the area.

It is shown the energy balance calculations, selection and sizing of the array of cylindrical parabolic concentrators based on solar radiation in the area. It is determined the required flow of thermal oil for heat transport, sizing pipes, insulation and associated pumps; calculating the thermal energy from the concentrators and transferred to the thermal oil, determination of the heat exchanger thermal oil-water. It is performed the calculation of the steam turbine and generator is selected. For the operation of the power generation system overnight it is proposed a thermal storage based on the use of molten salts. It is also considered an auxiliary boiler as a contingency to generate steam when for some reason the heating system with thermal oil and melting salts were out of order.

In conclusion it is expected that the design presented can be replicated in different regions of the country. Electric power generation up to 10 MW may have local direct approval of regional governments, thus promoting renewable energy generation as a means of adaptation to climate change.

Keywords: cylindrical parabolic solar concentrators, solar radiation, thermal oil, steam turbine, molten salts.

INTRODUCCIÓN

El Perú posee una muy variada geografía la cual representa un reto a la ingeniería para la electrificación, asimismo posee recursos energéticos significativo, entre ellos las energías renovables. En la actualidad existen diversas alternativas tecnológicas para aprovechar las energías renovables, alguna de ellas poco conocidas en Perú como es el caso de la energía solar térmica concentrada (CSP)¹, la que hemos considerado en el proyecto que presentamos.

La energía solar térmica concentrada (CSP) la captamos en base a la utilización de concentradores solares cilíndrico parabólicos, que son captadores solares de concentración que transforman la radiación solar directa en energía térmica, calentando un fluido de trabajo (aceite térmico) a altas temperaturas y bajas presiones. Debido a la elevada temperatura de trabajo que pueden alcanzar. Los CSP, son idóneos para utilizar la energía solar térmica en sistemas de generación de energía eléctrica con fuentes renovables, como también aplicar a procesos térmicos en la minería e industria nacional sustituyendo de este modo a los combustibles fósiles tradicionales.

El presente trabajo está orientado a implementar una planta de generación con energías renovables aprovechando la abundante energía solar disponible en la región Arequipa.

Este proyecto puede servir de base para proponer esta alternativa de generación eléctrica en las diversas regiones del país que posean significativa radiación solar, tanto para ser aprobados directamente por los gobiernos regionales como para su presentación a las subastas de generación de electricidad con recursos renovables con conexión a la red y que periódicamente convoca el Ministerio de Energía y Minas en cumplimiento de las normativas vigentes.

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En la actualidad en nuestro país el desarrollo las energías renovables vienen tomando impulso, con la implementación de bosques solares, parques eólicos, centrales hidroeléctricas, centrales de biomasa, entre otros sistemas de generación, a través de las subastas periódicas para la concesión de sistemas de generación de energía eléctrica con recursos de energías renovables, según el D.L. 1002, impulsado por el Ministerio de Energía y Minas así como por los programas masivos de implementación en áreas rurales de paneles fotovoltaicos que lleva a cabo. Sin embargo el desarrollo de proyectos para el aprovechamiento de la energía solar por medio de sistemas de concentración es un tema nuevo, en comparación a otros países tales como España, Estados Unidos y otras que apuestan por esta tecnología para la generación de energía eléctrica la cual es técnica y económicamente viable y a la vez le permite al país cumplir con los compromisos contraídos para su adaptación al cambio climático.

La investigación de los sistemas de concentración de la energía solar térmica en nuestro país es incipiente, el

presente proyecto es pionero en Perú, siendo necesario investigar y analizar estos sistemas, diseñando prototipos e irlos mejorando hasta alcanzar optimizarlos para integrarlos al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), sistemas que puedan contribuir con energías limpias para satisfacer la demanda eléctrica nacional mediante la réplica de nuestro sistema propuesto de 10 MW a sistemas mayores a 100 MW en las zonas de mayor radiación en el país².

En adición se pueden implementar estos sistemas para la generación eléctrica al mercado spot³ y vender directamente del generador al usuario minero e industrial en concordancia con la Ley de Concesiones Eléctricas y sus modificatorias. Paralelamente nuestra propuesta puede dar valor agregado nacional con la fabricación de componentes locales con materiales de fácil acceso y a costo efectivo, con un mercado emergente para implementar estos sistemas ambientalmente amigables, que no generan emisiones de gases de efecto invernadero.

OBJETIVO GENERAL

Aprovechar la radiación solar en la región Arequipa para la generación de energía eléctrica con energías renovables CSP con el fin de cubrir parte de la demanda energética de la región utilizando innovaciones tecnológicas como los concentradores solares cilíndrico parabólicos que se dispondrá en la zona para generar energía eléctrica y que dada su potencia de 10 MW podría tener la aprobación directa del gobierno regional.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar el arreglo de concentradores solares cilíndrico parabólicos (CSP) de acuerdo al requerimiento de potencia. Abastecer de energía eléctrica con nuevos sistemas de energía solar.

HIPOTESIS GENERAL

Se generará energía eléctrica en un sistema basado en el uso de un arreglo de concentradores solares cilíndrico parabólicos, que concentran la energía térmica en un aceite térmico que circula por el foco de los cilindros parabólicos llegando durante la operación diurna a un intercambiador de calor aceite térmico-agua, vaporizándose el agua e ingresando el vapor a una turbina conectada a un generador eléctrico, sistema según el Ciclo Rankine, incluidos un condensador y una torre de enfriamiento. Para la operación nocturna se dispone de sales fundentes, parte del flujo de aceite térmico caliente que circula durante el día es derivado a un intercambiador de calor aceite térmico-sales fundentes, las sales se calientan y se almacenan en un tanque de sales

² Atlas Solar de Perú :

<http://dger.minem.gob.pe/atlassolar/>

³ Mercado en el que los generadores pueden elegir libremente la venta de la electricidad que producen, celebrando contratos a plazo determinado con distribuidores o clientes libres, o una combinación de ambas opciones. La única restricción es la contenida en el artículo 101° del Reglamento de la Ley de Concesiones Eléctricas, que exige que cualquier contratación cuente con la garantía física del suministro (es decir que no pueden obligarse a suministrar más potencia y energía que las que producen y las que tengan contratadas con otros generadores):.

¹ Concentrated Solar Power

calientes, el calor almacenado se utilizará en la operación nocturna. En la operación nocturna se circula el aceite térmico a través del intercambiador aceite térmico-sales fundentes, ganando calor de ellas y circulando luego a través del intercambiador aceite térmico-agua, vaporizándose el agua. Como contingencia se ha incorporado en el diseño una caldera auxiliar como stand-by para la generación de vapor, en caso que por algún inconveniente no se pueda operar con el sistema CSP, y poder cumplir con la demanda de energía contratada.

HIPOTESIS ESPECÍFICA

Complementariedad energética en la generación de energía eléctrica para la región Arequipa, utilizando energía solar térmica en el día y con tecnología de sales para la generación nocturna.

MARCO TEORICO

La generación de energía eléctrica utiliza el Ciclo Termodinámico de Rankine para la generación con los concentradores solares cilíndrico parabólicos que concentran la energía térmica en aceite térmico con las propiedades de lograr altas temperaturas (de 300 hasta 500 °C) y a bajas presiones (5 bar), transfiriendo la energía térmica a un intercambiador de calor aceite térmico-agua, en el que el vapor generado ingresa a una turbina conectada a un generador (turbogenerador).

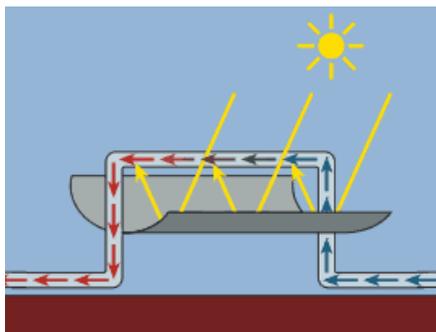


Figura 1. Esquema de la concentración de la energía en el aceite térmico

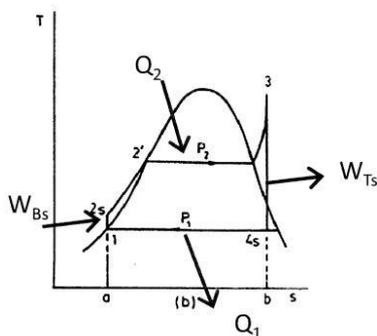


Figura 2. Ciclo Rankine

ESTADO DEL ARTE

La energía solar térmica mediante concentradores solares cilíndrico parabólicos utiliza los últimos avances en generación de energía eléctrica en un sistema sostenible a costo-efectivo comparado con la generación fotovoltaica, utilizando complementariamente sales fundentes para el almacenamiento de la energía térmica en el día para la generación eléctrica nocturna.

VENTAJAS DEL PROYECTO

El sistema de concentradores solares cilindro parabólicos (CSP) que se propone en el presente estudio además de ser una energía renovable y amigable con el medio ambiente contribuirá con los objetivos regionales de adaptación al cambio climático, reduciendo la huella de carbono al desplazar el uso de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica. Permitirá a futuro que en la región Arequipa se logre el aprovechamiento térmico de la energía solar en las noches para la generación de energía eléctrica mediante el almacenamiento de la energía solar térmica generada en los CSP en el día a través del uso de sales fundentes, que es la tecnología moderna más comúnmente utilizada para almacenar energía.

Las sales para este almacenamiento térmico tienen composición variable, siendo la más utilizada la mezcla de nitrato potásico, sódico y recientemente se ha incorporado el nitrato cálcico. La tecnología CSP según un estudio realizado por Greenpeace Internacional, la Asociación de Electricidad Solar Térmica Europea y el grupo Solar PACES de la Agencia Internacional de la Energía que investigó la energía solar concentrada potencial y su futuro, encontró que la energía solar concentrada podría ser responsable de hasta el 25% de la energía que el mundo necesita para el año 2050.

La utilización de la energía solar térmica mediante concentradores solares cilindro parabólicos utiliza los últimos avances de generación de energía en un sistema moderno y económicamente competitivo, al compararse con la generación eléctrica que utiliza combustibles fósiles, Esta tecnología CSP es la que cuenta en la actualidad con un menor costo para generar electricidad o producir vapor sobrecalentado a alta presión ⁴



Figura 3. Arreglo de concentradores solares cilíndrico parabólicos

Si pudiéramos hablar de barreras por superar para su aplicación, una de ellas sería la necesidad de contar con áreas grandes de terreno con su titulación de tierras para instalar los concentradores cilindro parabólicos, asimismo para Perú se tiene la falta de cuadros técnicos regionales para operar estos sistemas de generación de energía eléctrica

⁴ Referencia :

<http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/525/1/13%20Estudio%20Tecnol%C3%B3gico,%20Viabilidad%20Energ%C3%A9tica%20y%20Econ%C3%B3mico%20pa.pdf>

MEMORIA DESCRIPTIVA

La región con mayor radiación solar en el Perú es Arequipa, factor que ha sido tenido en cuenta para la localización del proyecto. Para la potencia a generar de 10 MW y en concordancia con las dimensiones y arreglo de filas de los concentradores solares cilíndricos parabólicos para absorber energía térmica del sol. Se identificó un terreno con extensión de aproximadamente 40 ha para la planta y que cumple con condiciones favorables para la localización de la

Planta, como el estar cerca a la carretera Panamericana, a la subestación eléctrica La Repartición (4 km), a la Central Solar Repartición 20T (8 km), a la Mina Cerro Verde (25 km), a pocos km del futuro gasoducto andino del sur. Bajo estas premisas se escogió la ubicación de la planta cerca de la localidad de La Joya. Cabe mencionar que en la región hay varias empresas mineras con intensiva demanda de energía.



Figura 4. Ubicación geográfica coordenadas UTM 201079 m E, 8173680 m S

La planta se ha diseñado para una potencia neta de 10 MW para una localidad de Arequipa (La Joya) cuyas coordenadas son 16,5°S 71,8°O, UTM (201079 m E, 8173680 m S). El principal cálculo es el de la generación de potencia útil en la planta para determinar su dimensionamiento en función a la potencia radiante recibida por unidad de área (W/m^2) y a la

potencia eléctrica (MW) que se propone generar con el sistema.

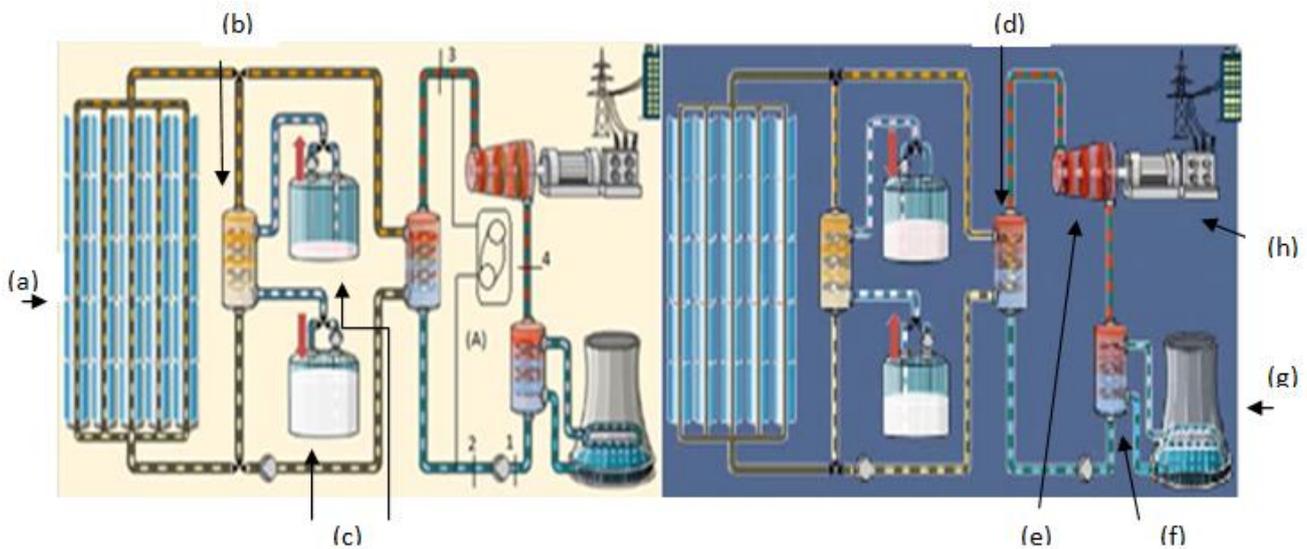


Figura 5. Diagrama de la Planta de Generación de Electricidad en operación diurna y nocturna. (a) Concentradores solares cilíndricos parabólicos (b) Intercambiador de calor aceite térmico-sales fundentes, (c) Tanques de almacenamiento de sales fundentes caliente y fría, (d) Intercambiador de calor aceite térmico-agua, (e) Turbina de vapor, (f) Condensador, (g) Torre de enfriamiento, (h) Generador eléctrico, (A) Caldera auxiliar (stand by)

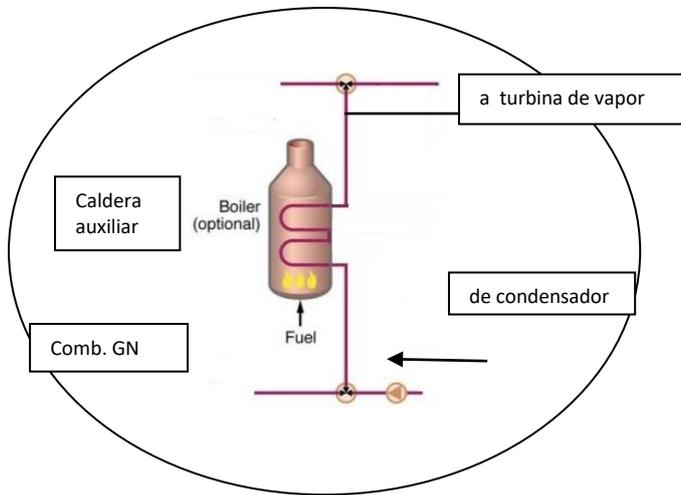


Figura 6. Detalle de conexión de caldera auxiliar

Ángulo horario (τ): desplazamiento angular del sol respecto del medio día, cada hora corresponde a 15° [1] de longitud

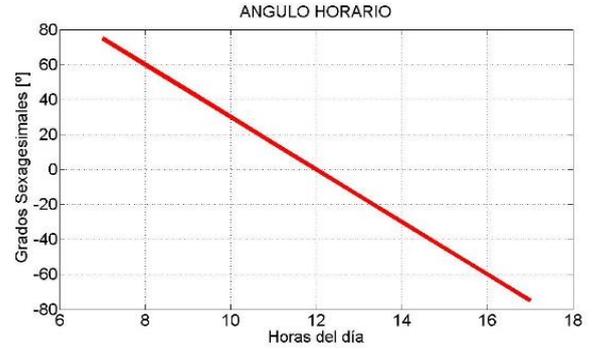


Figura 8. Ángulo horario

1. IRRADIACIÓN SOLAR

La energía solar se capta en los concentradores solares cilíndricos parabólicos, energía que transfieren al aceite térmico circulante, transfiriendo luego al agua, generándose vapor que entra a una turbina conectada al eje de un generador. Debido a la significativa radiación solar en la región Arequipa, se consideró la zona de La Joya para la localización de la Planta, con coordenadas $16.5^\circ\text{S } 71.8^\circ\text{O}$, para la que determinaremos los parámetros de radiación solar.

Declinación (δ): es el ángulo formado entre el plano ecuatorial y los rayos del sol, y varía entre $23,45^\circ$ [1] en función del día juliano.

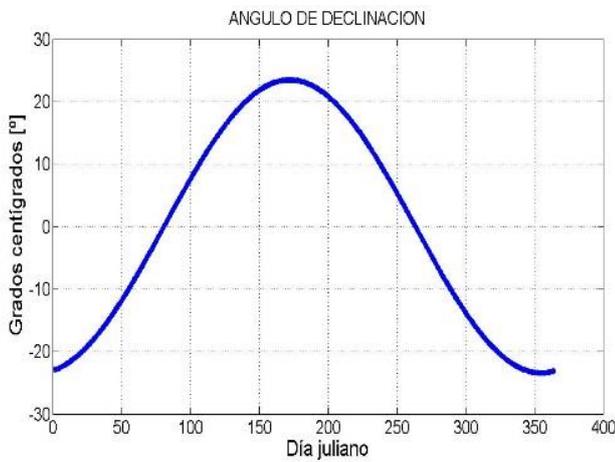


Figura 7. Ángulo de declinación

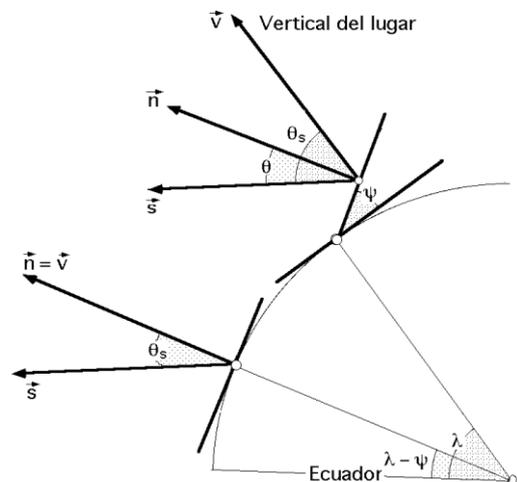
$$\delta = 23.45^\circ \text{sen}\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \dots \text{Ec. (1) [1]} \quad n = \text{día juliano}$$

$$\tau = 15^\circ(12 - h) \dots \text{Ec. (2) [1]} \quad h = \text{horas del reloj}$$

Latitud (λ): son las líneas que recorren paralelamente al ecuador, y según el hemisferio puede ser norte o sur.

Longitud (L): son las líneas que recorren de polo a polo. En la actualidad el meridiano de Greenwich marca el meridiano 0° , haciendo distinción entre longitud este u oeste.

Para el cálculo de la irradiación directa I_0 se han establecido modelos estadísticos para su cálculo en condiciones normales del clima, cielos despejados y zonas industriales. En nuestro desarrollo vamos a considerar condiciones normales con la irradiación directa:



$$I_0 = 1230e^{\left(\frac{-1}{3.8 \cos(\tau-1.6)}\right)} \dots \text{Ec. (3) [1]}$$

El cálculo del ángulo de incidencia θ es importante calcularlo puesto que es un multiplicativo de la irradiación media para hallar la irradiación efectiva. Hay distintas formas de hallarlo según sea la orientación del eje que tomarán los concentradores solares cilíndricos parabólicos, siendo las siguientes:

Para orientación E-O:

$$\cos\theta = \text{sen}\delta\text{sen}\lambda + \cos\delta\cos\lambda\cos\tau \dots \text{Ec. (4) [3]}$$

Para orientación N-S: $\cos\theta =$

$$\sqrt{(\text{sen}\delta\text{sen}\lambda + \cos\delta\cos\lambda\cos\tau)^2 + \text{COS}^2\delta\text{sen}^2\tau} \dots \text{Ec. (5) [3]}$$

La irradiación efectiva se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_{ef} = I_0\cos\theta * n_{opt} \dots \text{Ec. (6) [3]}$$

Obteniendo finalmente la irradiación efectiva que va a incidir en los concentradores solares cilíndricos parabólicos. Haciendo el cálculo de la irradiación efectiva mensual para distintas orientaciones obtenemos la siguiente información:

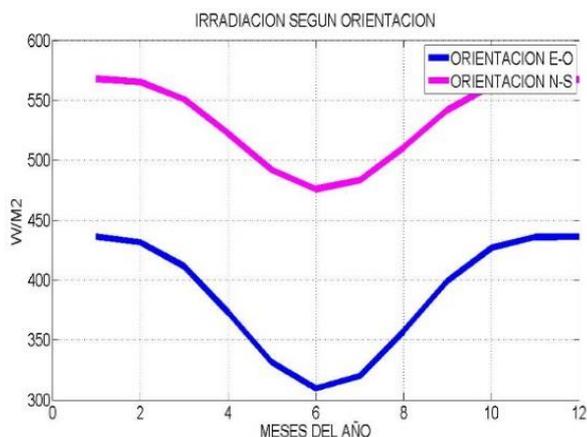


Figura 10. Irradiación solar según la orientación

En la **Tabla 1** que la orientación para aprovechar mejor la irradiación solar es de N-S obteniendo una irradiación efectiva promedio de 535.36 W/m² con $\theta = 20^\circ$. Esta información se puede comparar con la del Atlas Solar del Perú que brinda SENAMHI.

Las condiciones de diseño de la planta para la máxima irradiación ha sido 567.8 W/m²

2. CAMPO SOLAR

La instalación solar consiste en un campo de concentradores solares cilindros parabólicos a través del cual circula aceite térmico VP-1. A través de un intercambiador de calor, la energía solar es utilizada para la generación de vapor. Se contará también con un sistema de almacenamiento de energía térmica basado en dos tanques de sales fundidas, que suministrará energía al sistema cuando la producción energética del campo sea menor que la demandada. El campo solar estará diseñado para alcanzar la máxima temperatura que puede soportar el aceite térmico, de manera que así se consiga una optimización de la energía almacenada por kg de sal, lo que permite reducir el volumen de sales fundentes necesarias para el almacenamiento térmico, con las ventajas que esto conlleva tanto en los costos como en la facilidad de operación y mantenimiento.

Tabla 1. Información técnica de los concentradores solares cilíndricos parabólicos

Colector EUROTROUGH – 100	
Ancho parábola (m)	5.76
Longitud total de cada colector (m)	98.7
Número de módulos por cada colector	8
Diámetro exterior de los tubos absorbedores metálicos (m)	0.07
Diámetro interior de los tubos absorbedores metálicos (m)	0.065
Área neta de apertura debida a los espejos encada colector (m2)	548.3
Rugosidad cara interna del tubo absorbedor (µm)	20
Reflectividad nominal de los espejos (r)	0.93
Transmisividad de la cubierta de vidrio del absorbedor, t	0.95
Absortancia del recubrimiento selectivo, a	0.95
Factor de interceptación por errores ópticos y de montaje, g1	0.9
Rendimiento óptico pico	0.755

3. CICLO DE POTENCIA

El ciclo empleado en este proyecto es un ciclo Rankine, se diseñó la planta para un tiempo de operación de 7 horas, para un almacenamiento de sales fundentes de 4 horas,

Se trabajó con un múltiplo solar ⁵ igual a 1.5

Los datos a considerar para el diseño de la planta han sido los siguientes:

Tabla 2. Consideraciones de diseño del ciclo

Parámetro	Valor
Tiempo de operación	7 h
Temperatura inicial del aceite térmico	300 °C
Temperatura final del aceite térmico	400 °C
Presión al ingreso de la turbina	90 bar
Temperatura de salida del agua*	400 °C
Presión a la salida de la turbina	0.08 bar
Eficiencia del generador	0.9
Eficiencia mecánica turbina	0.9
Eficiencia de la turbina	0.9
Calor específico a P=cte. del agua(líquido)	4.1813 kJ/kg°C
Calor específico a P=cte. del agua(gas)	2.08 kJ/kg°C
Calor latente de evaporación	2257kJ/kg

*En el intercambiador de calor

De la potencia tenemos:

$$Pot\acute{u}til = n_{mec} * n_{gen} * \dot{W}_{neto} \dots \text{Ec. (7) [4]}$$

⁵ http://www.cifes.gob.cl/archivos/3-Presentacion_CENER_Consideraciones_sobre_el_diseno_plantas_termoelectricas_Marcelino_Sanchez.pdf.pdf

El trabajo neto que va realizar la turbina proviene de la energía que le va a proporcionar el vapor generado en el intercambiador de calor.

$$\text{Para el agua: } \dot{W}_{\text{neto}} = \dot{m}_{\text{agua}} \Delta h_{3-4} \dots \text{Ec. (8) [4]}$$

Obteniendo \dot{m}_{agua}

Tabla 3. Tabla de resumen de estados del ciclo Rankine

RESUMEN DE ESTADOS					
Punto	T(°C)	P(BAR)	h(KJ/Kg)	s(KJ/KgK)	v(m3/Kg)
1	41.5	0.08	173.67	0.59154	0.0010087
2	44.26	90	185.0	8.2281	0.0010087
3	400	90	3117.8	6.2853	0.02993
4	41.5	0.08	2080.46	6.29	0.013762

Del cuadro de diseño del ciclo Rankine los puntos 1, 2, 3 y 4 se aprecian en la **figura 3**.

Tabla 4. Resumen del Ciclo Rankine

RESUMEN CICLO RANKINE (VAPOR)		
Calor cedido al ciclo Rankine	34904.04	KW
Flujo de vapor	11.90	Kg/s
Flujo de aceite térmico	143.28	Kg/s
Potencia que debe entregar la bomba	134.93	KW
Potencia de la turbina de vapor	12345.68	KW
Trabajo neto del ciclo rankine	12210.74	KW
Potencia neta del ciclo Rankine	9890.7	KW
Calor disipado por el condensador	22693.30	KW
Eficiencia del ciclo Rankine	28.34	%

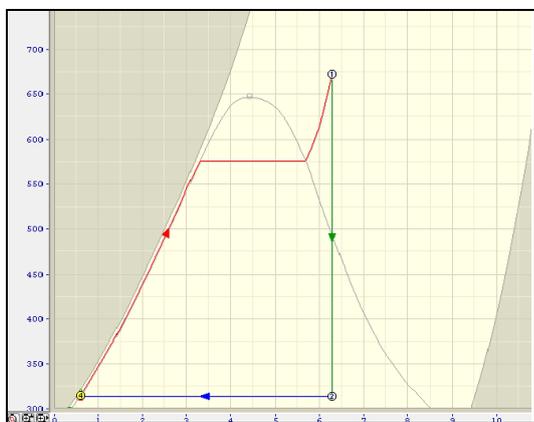


Figura 11. Diagrama T-S del ciclo Rankine ideal cuya eficiencia es 39%

4. DISEÑO DE LA PLANTA

Dimensionamiento del campo solar

A la hora de dimensionar el campo de concentradores se debe tener en cuenta además de la potencia térmica que necesita el proceso productivo:

- La radiación solar directa.
- Temperatura de aceite térmico de entrada y salida en el campo de concentradores solares cilíndrico parabólicos.

- Ángulo de incidencia.
- Temperatura ambiente.

En la Figura 13 del **Anexo 7** se tiene la distribución del campo solar y los componentes del sistema de generación (Power Block).

ENERGÍA CAPTADA POR LOS TUBOS DE LOS CONCENTRADORES Y POR EL ACEITE TÉRMICO

La energía que es captada por los tubos receptores de los concentradores solares cilíndrico parabólicos se calcula de la siguiente manera:

$$P_{\text{colect}} = A_n I_{\text{ef}} \cos(\theta) \dots \text{Ec. (9) [3]}$$

Donde A_n es el área de apertura neta, ver Tabla 1

A éste resultado se le disminuye las pérdidas térmicas lineales definidas de la siguiente manera según el modelo de concentradores solares cilíndrico parabólicos ya definida:

$$Q_L = 0.00154\Delta T^2 + 0.2021\Delta T - 24.899 + \left[(0.00036\Delta T^2 + 0.2029\Delta T + 24.899) \left(\frac{I_{\text{ef}}}{900} \right) \right] \dots \text{Ec. (10) [7]}$$

Donde ΔT es la diferencia de temperaturas entre el aceite térmico en el interior de los tubos y el medio ambiente ($350 - 30 = 320$) y Q_L son las pérdidas lineales [W/m]. A éste resultado se multiplica por la longitud del colector que es de 98.7 m. También se debe considerar la modificación por ángulo de incidencia, definida en las características del colector:

$$K(\theta) = 1 - [2.859621 \times 10^{-5} \theta^2 + \frac{5.25097 \times 10^{-4} \theta}{\cos(\theta)}] \dots \text{Ec. (11) [7]}$$

Donde $\theta = 20^\circ$

A continuación se procede a calcular la potencia real que recibirá un colector:

$$P_{\text{útil,colect}} = P_{\text{colect}} K(\theta) F_e - Q_L \dots \text{Ec. (12) [7]}$$

F_e es un factor de limpieza en los tubos de vidrio receptores que se va a considerar en 0.95

Tabla 5. Pérdidas y Potencia útil

Tabla Resultados		
P_{colect}	311.62	kW
Q_L	30.76	kW
$K(\theta)$	0.9774	-
$P_{\text{útil,colect}}$	258.31	kW

La potencia que recibe el aceite térmico es de 258.31 KW, luego haciendo un balance térmico en un colector se tiene:

$$P_{\text{útil,colect}} = \dot{m}_{\text{at}} \Delta h \dots \text{Ec. (13) [7]}$$

$$33.12 = \Delta h \dots (\alpha)$$

$$\text{Se sabe que: } \Delta h = \int_{T_i}^{T_o} C_p dt \dots \text{Ec. (14) [4]}$$

De la tabla de aceite térmico (Ver **Anexo 1**), Cp se obtiene en función de la temperatura; por lo que Δh queda expresado de la siguiente manera:

$$\Delta h = 1.4714(T_o - T_i) + 0.5 \times 0.0028(T_o^2 - T_i^2) \dots (\beta)$$

Se considera una temperatura Ti= 350°C (temperatura promedio dentro de los concentradores solares cilíndrico parabólicos) e igualando (α) y (β) se obtiene To=363.41 °C.

La variación de temperatura del aceite térmico en un colector es de 363.41 – 350 = 13.41°C.

Por lo tanto, si queremos tener un salto térmico para el aceite de 100°C (de 300 a 400°), el número de concentradores solares cilíndrico parabólicos en un lazo sería:

$$N_{\text{colect por lazos}} = \frac{100}{13.41} = 7.45 \dots \text{Ec. (15) [7]}$$

Redondeando, daría como resultado 8 concentradores solares cilíndrico parabólicos por lazo.

Se ha determinado que el múltiplo solar que cumple las condiciones de capacidad de almacenamiento es de 1,5 que evita la necesidad de desenfoco de parte del campo solar durante un día soleado del mes de Enero.

Finalmente para terminar con el diseño del campo de concentradores solares cilíndrico parabólicos se calcula la cantidad de concentradores solares cilíndrico parabólicos en paralelo que se requiere conectar. Se conoce que un colector da una potencia de 258,31 kW, como se conectan 8 concentradores solares cilíndrico parabólicos en serie por cada lazo proporcionará una potencia de 2066,480 kW (258,31 x 8).

La potencia instalada que debe tener el campo de concentradores solares cilíndrico parabólicos es de 65.13 MW que se halla multiplicando la la potencia de diseño (43.42 Mw) por el múltiplo solar (1.5).

$$\text{Número de Concentradores solares cilíndrico parabólicos} = \frac{43421 \text{kw} \times 1.5}{2066.48 \text{kw}} = 32 \text{ lazos} \dots \text{Ec. (16) [7]}$$

Se detalla en el **anexo 7** la distribución en H [8] del campo termosolar.

Cálculo de la potencia de la bomba de aceite térmico

El flujo másico es el resultado de multiplicar el flujo que circula por un lazo, multiplicado por el número de lazos.

$$Q_{\text{lazo}} = 7.3 \text{ kg/s}$$

$$Q_{\text{total}} = 7.3 \times (\# \text{ de lazos}) = 7.3 \times 32 = 233.6 \text{ kg/s}$$

Para una Temperatura de 300 °C la densidad del aceite térmico es 817.76 kg/ m³

$$Q = \frac{q_m \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)}{\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} \times 3600 = 1028.37 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \dots \text{Ec. (17) [7]}$$

Según la distribución en H de la planta, se separan los sub-campos 1 y 2 en el lado izquierdo y los sub-campos 3 y 4 en el lado derecho. Para ambos lados se divide en partes iguales el flujo de aceite térmico.

Para el cálculo de pérdidas de carga se elige una ruta crítica que consiste en la tubería más larga. Del **anexo 5** se calculan las pérdidas de carga para cada tramo sumando las caídas de presión según la ruta crítica obteniendo una pérdida total de 7.65 bar. Por lo tanto la potencia de la bomba es:

$$Pot_{\text{bomba}} = \frac{Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \times \Delta P (\text{Pa})}{n_B} \dots \text{Ec. (18) [9]}$$

Para una eficiencia de la bomba de 80%, la potencia de la bomba es igual a 254.43 kW.

Volumen de tanque de expansión del aceite térmico

Para poder contrarrestar efectos residuales debido al cambio de temperatura del aceite térmico –de 300°C a 400°C- se debe enviar el aceite a un tanque de expansión previamente al bombeo hacia los concentradores. Para ello se ha calculado el volumen de aceite existente en la tubería (que vendría a ser el volumen de la tubería) y, además, agregar un porcentaje del total de aceite térmico por prevención a una supuesta falta de aceite⁶.

El volumen del tanque de expansión es la diferencia de volúmenes entre la máxima y mínima temperatura de trabajo, siendo igual a 11.4 m³; agregando el volumen de prevención de riesgo (20%), el volumen total del tanque es igual a 13.69 m³.

ALMACENAMIENTO DE SALES FUNDENTES

La incorporación de un sistema de almacenamiento garantiza que haya producción tanto de día (presencia de sol) como de noche (ausencia de sol), por lo que se hizo necesario dotar a la planta de un sistema que le posibilite esta producción.

El almacenamiento se realizará con sales fundentes utilizando dos tanques de sales, un tanque de sales calientes y un tanque de sales frías, haciendo circular las sales del tanque frío al tanque caliente a través del intercambiador de calor, almacenándose la energía térmica para cuando sea necesaria. Cuando se necesite aporte de energía por parte del sistema de almacenamiento, el circuito –que es reversible–, hará pasar las sales calientes a través del intercambiador calentándose el aceite térmico a la temperatura prevista, evitándose de este modo posibles transitorios, pudiéndose operar el sistema de almacenamiento durante la noche cuando no hay radiación solar.

Tabla 6. Propiedades de las sales fundentes

SALES FUNDIDAS	
Nitrato sódico NaNO ³	60% en peso
Nitrato potásico KNO ³	40% en peso
PROPIEDADES FÍSICAS (300 – 600 °C)	
Densidad (kg/m ³)	P=2090 – 0,636 T
Capacidad calorífica (J/kgk)	Cp = 1443 + 0,172 T
Conductividad térmica (W/mk)	K = 0,443 + 1,9*10 ⁻⁴ T
Viscosidad absoluta (mPa*s)	μ = 22,714 – 0,120T + 2,28*10 ⁻⁴ T ² – 1,474*10 ⁻⁷ T ³

⁶ <http://www.sistemahtf.com/index.php/los-tanques-de-expansion>

Volumen del tanque de almacenamiento de sales calientes:

$$P_{\text{diseño}} = \frac{12.3}{0.28} = 43.6 \text{ MW} \dots \text{ Ec. (19) [7]}$$

$$T_{\text{op}} = 4 \text{ h}^7$$

$$\text{Energía} = (43.6) (4) (3600)$$

$$Q = 627840 \text{ MJ}$$

$$Q = m \cdot C_p \cdot dT; \text{ donde } m \text{ es la masa de sal fundente [Kg]} \dots \text{ Ec. (20) [4]}$$

$$627840 \times 10^6 = m \int_{533}^{653} (1443 + 0.172 \cdot T) dT$$

$$627840 \times 10^6 = m(1443T + 0.086 \cdot T^2)_{533}^{653}$$

$$m = 84206.42 \text{ kg}$$

$$v = 50.28 \text{ m}^3 = \pi R^2 H$$

A este volumen se le debe añadir un 5% en exceso para tener en cuenta posibles incrementos ocasionales de temperatura y los intercambiadores de calor que se instalan en su interior para evitar la posible solidificación de las sales que implicaría fatales consecuencias.

$$V = 52.794 \text{ m}^3 = \pi R^2 H$$

$$F(x) = 2(\pi R^2) + 2\left(\frac{52.794}{\pi R^2}\right) \pi R$$

Este tanque deberá de ser de tal manera que minimice la superficie de contacto con el exterior, ya que así se minimizaran las pérdidas térmicas, la forma geométrica que minimiza la superficie en función del volumen es la esfera, pero la construcción de depósitos esféricos de este tamaño es muy costosa ya que son muy difíciles de construir, por lo que se opta por la instalación de depósitos cilíndricos minimizando la superficie de contacto:

$$F(x) = 2(\pi R^2) + 2\left(\frac{52.794}{R}\right) \pi R$$

$$F(x)' = 4\pi R + 2(52.794) (-1) R^{-2} = 0$$

$$4\pi R - \frac{105.588}{R^2} = 0$$

De donde se obtiene

$$R = 2.033 \text{ m} \quad h = 4.066 \text{ m}$$

Volumen del tanque de almacenamiento de sales frías:

Operando de manera similar que para el tanque de almacenamiento de sales calientes se obtiene una densidad de las sales frías de 1752.01 kg/m³, lo que dará un volumen de sales frías de 48.06 m³, a los que se deben añadir un 5%, obteniéndose un volumen final de 50.463 m³.

$$R = 2.0026 \text{ m} \quad h = 4.0053 \text{ m}$$

En la **Tabla 4** se muestra un flujo de aceite térmico de 143.28 Kg/s y en la **Tabla 7** existe un flujo total de 233.6 Kg/s; por lo tanto, el flujo de aceite térmico que ingresa al intercambiador de calor aceite-sales es de 90.32 Kg/s para 4 horas de almacenamiento. **Ver Anexo 4.**

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Realizado los análisis correspondientes en cada punto del presente trabajo se muestra a continuación un cuadro resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 7. Resultados

Resumen de Cálculos del Diseño de Planta	
Nº de concentradores solares cilíndrico parabólicos por lazo	8
Nº de lazos	32
Nº de concentradores solares cilíndrico parabólicos totales	256
Nº de Subcampos	4
Orientación de Concentradores solares cilíndrico parabólicos	N-S
Área total del campo solar (m ²)	96500,8
Superficie total de la planta (ha)	43,18
Flujo de bombeo del aceite térmico(m ³ /h)	1028,37
Volumen de tanque de expansión de aceite térmico(m ³)	13,7
Volumen de tanque de sales frías(m ³)	50,46
Volumen de tanque de sales calientes(m ³)	50,28
Potencia de Bombeo (kW)	254,43
Flujo de bomba de sales calientes (m ³ /h)	13,2
Flujo de bomba de sales frías (m ³ /h)	12,6
Flujo total de aceite térmico (kg/s)	233,6

La instalación ha sido diseñada para una operación diurna de 7 horas con los concentradores solares cilíndrico parabólicos y operación nocturna de 4 horas con sales fundentes, para un funcionamiento total de 11 horas diarias. Se tendrá el apoyo de una caldera auxiliar a gas natural -como stand by- para las horas de baja radiación y de no funcionamiento. El uso de esta tecnología incrementa considerablemente las horas de funcionamiento diario de la instalación, pudiéndose llegar a valores de 21,5 horas para las condiciones de diseño con 12 horas de almacenamiento térmico. **Ver Anexo 6**

Al incrementar las horas de funcionamiento también se incrementará el campo y arreglo de concentradores solares cilíndrico parabólicos, lo cual requiere una mayor inversión.

Impacto Ambiental

La utilización de concentradores solares cilíndricos parabólicos para la generación de energía eléctrica en sustitución de los combustibles convencionales evita la emisión de dióxido de carbono y otros gases al medio ambiente. Para el presente proyecto considerando una generación de 39600 MWh/año, las emisiones evitadas serían 16078 toneladas de CO₂ /año, a razón de 0,406 ton

⁷ En el **ANEXO 5** se muestran los cálculos para tiempos de almacenamiento de 4, 8 y 12 horas.

CO₂/MWh, como valor utilizado para la formulación de proyectos con energías renovables ⁸.

Recomendaciones del proyecto

Incorporar esta tecnología en las subastas de energía que el Ministerio de Energía y Minas convoca periódicamente

Para la confiabilidad operativa continua, si por alguna contingencia no esté en condiciones de cumplirse con la generación de energía contratada, sea por falta de irradiación solar (al inicio del día y al anochecer), por mantenimiento, etc., se debe contar con una caldera auxiliar en stand by para suplir ésta carencia.

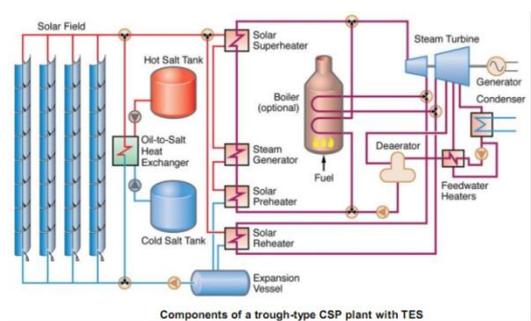


Figura 12. Implementación de una caldera en stand by integrada en el ciclo Rankine

La potencia de la caldera en BHP (Boiler Horse Power) se calculó de la siguiente manera:

$$BHP_{caldera} = \frac{\dot{m}_v \Delta h_{3-4}}{9.81}$$

$$BHP_{caldera} = 1258 \text{ BHP}$$

CONCLUSIONES

Se puede diseñar una planta eficiente, con tecnología CSP (Concentrated Solar Power) para la generación de energía eléctrica de 10 MW de potencia útil, tanto de día como de noche.

El uso de los concentradores solares cilíndrico parabólicos evitan la emisión al medio ambiente de aproximadamente 16078 toneladas anuales de CO₂.

Bajo la ley de Generación distribuida, nuestra propuesta podrá ser conectada directamente a la red del concesionario de distribución eléctrica en Arequipa.

En la disposición Octava de la Ley N° 28832: LEY PARA ASEGURAR EL DESARROLLO EFICIENTE DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA se especifica "Medidas para la promoción de la Generación Distribuida y Cogeneración eficientes":.....

Las actividades de Generación Distribuida y Cogeneración interconectadas al SEIN se registrarán por las disposiciones, que de acuerdo con lo que establezca el Reglamento: a) La venta de sus excedentes no contratados de energía al Mercado de Corto Plazo, asignados a los Generadores de mayor Transferencia (de compra o negativa) en dicho mercado; y, b) El uso de las redes de distribución pagando únicamente el costo incremental incurrido.

Se puede vender la energía al distribuidor y/o vender al mercado Spot. Potenciales usuarios de esta tecnología CSP son las empresas mineras del sur de Perú.

La potencia excedente procedente del campo de concentradores solares cilíndrico parabólicos aporta una energía útil que se puede utilizar a posteriori gracias al tanque de sales fundentes.

El uso de esta tecnología incrementa notablemente las horas de funcionamiento de toda la instalación, llegando a valores de 21,5 horas para las condiciones de diseño con 12 horas de almacenamiento térmico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gardey Merino, María Celeste. *Introducción a la Geometría Solar*. Facultad Regional de Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.
- [2] Pedro Fernández, Díez (2007). *Procesos Termosolares en Baja, Media y Alta Temperatura*. Universidad de Cantabria, España.
- [3] Paredes Velasco, Carmen (2012) *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en PARAGUAY*, Tesis de licenciatura, Paraguay.
- [4] Incropera, F, (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México.
- [5] Rodríguez Aumente, Pedro. *Diseño de una central solar termoeléctrica de 50 mw con 4 horas de almacenamiento con tecnología de canales parabólicos*. España (2010).
- [6] Spiru Paraschiv (2010). *Design and Sizing Characteristics of a solar thermal power plant with cylindrical parabolic concentrators in Dobrogea Region*. Romania.
- [7] Olivares Saiz Carlos. *Central Solar Termoeléctrica de 49,9MWe con almacenamiento térmico*. España (2012).
- [8] B. Kelly (2005). *Nexant Parabolic Trough Solar Power Plant Systems Analysis*, EEUU.
- [9] Charalampos Mikroulis (2011). *Análisis comparativo entre el empleo de aceite térmico y la generación directa de vapor, en una planta termosolar de canales parabólicos*, España

⁸ <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/01/01-19.pdf>

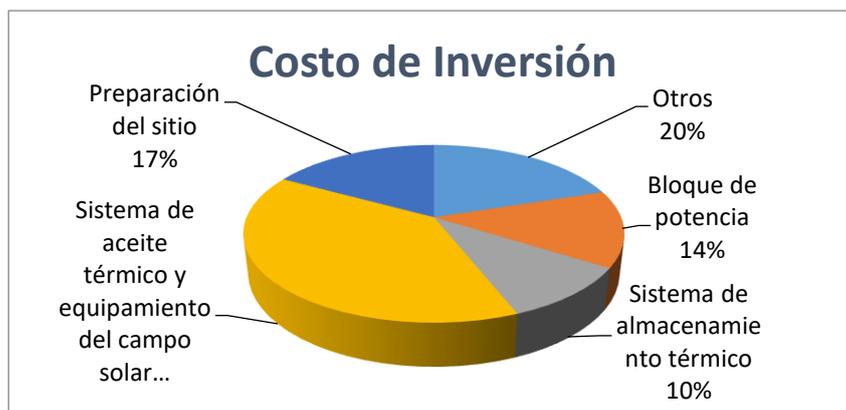
APÉNDICE: COSTOS DE INVERSIÓN

El costo total de inversión es de:

US\$ 72'307,692

Referencia: Renewable Energy Technologies:
Cost Analysis Series

https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-SOLAR_PV.pdf



ANEXO 1: ACEITE TERMICO

El aceite térmico es un fluido caloportador, se lo usa como medio de transporte de calor para distintos tipos de procesos. El calentamiento por fluido térmico, es un tipo de calentamiento indirecto en el que se calienta como fluido de transferencia de calor de fase líquida en un circuito cerrado. La característica esencial que condiciona su aplicación es que se logran altas temperaturas a muy bajas presiones. Hay varios aceites térmicos comerciales como Dowtherm® Therminol® entre otros.

PERFORMANCE BENEFITS

- **Superb Heat Transfer Properties** - Therminol VP-1 is a synthetic heat transfer fluid which combines exceptional thermal stability and low viscosity for efficient, dependable, uniform performance in a wide optimum use range of 12°C to 400°C (54°F to 750°F). Therminol VP-1 has the highest thermal stability of all organic heat transfer fluids.
- **Low Viscosity** - Therminol VP-1 has a low viscosity to 12°C (54°F). Because of its crystallization point of 12°C (54°F), this fluid may require tracing in colder climates to avoid operational problems.
- **Vapor Phase Heat Transfer Fluid** - Therminol VP-1 is a eutectic mixture of diphenyl oxide (DPO) and biphenyl. It can be used as a liquid heat transfer fluid or as a boiling-condensing heat transfer medium up to its maximum use temperature. It is miscible and interchangeable (for top-up or design purposes) with other similarly constituted diphenyl-oxide (DPO)/biphenyl fluids.
- **Precise Temperature Control** - Due to its ability to operate as a vapor phase heat transfer fluid, Therminol VP-1 is excellent for use in heat transfer fluid systems requiring very precise temperature control.

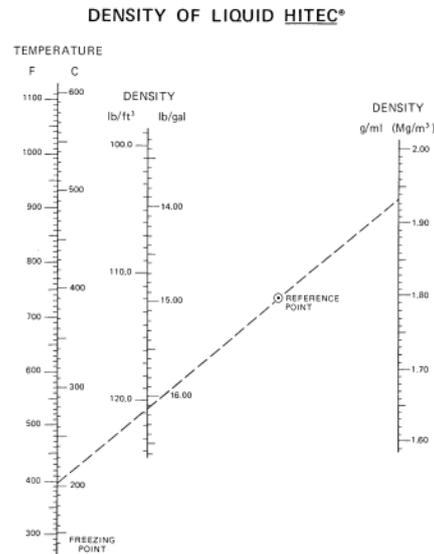
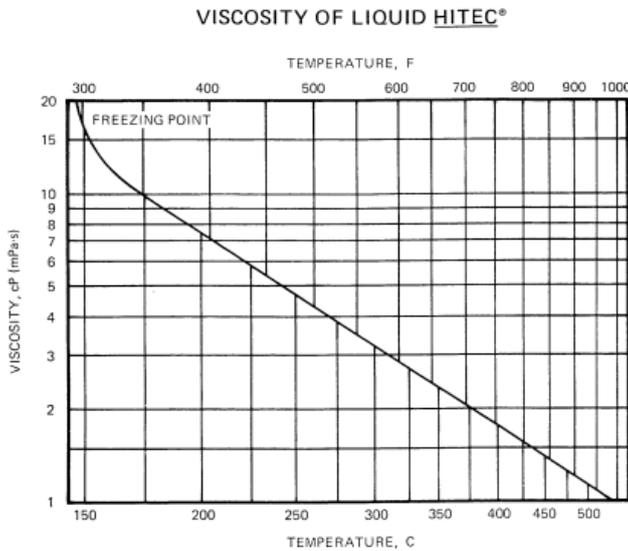
TYPICAL PROPERTIES

Appearance	Clear, water white liquid
Composition	Biphenyl/diphenyl oxide (DPO) eutectic mixture
Maximum bulk temperature	400°C (750°F)
Maximum film temperature	425°C (800°F)
Normal boiling point	257.0°C (495.0°F)
Crystallizing point	12.0°C (54.0°F)
Flash point, COC (ASTM D-92)	124°C (255°F)
Flash point, PMCC (ASTM D-93)	110°C (230°F)

Se seleccionó el aceite térmico Therminol® cuyas características son las siguientes.

ACEITE TÉRMICO THERMINOL® VP-1			
Temperatura	Densidad	μ (PaS)	Cp(J/KgK)
290	827.488	0.0002305	2.29
310	808.032	0.0001993	2.34
330	788.576	0.00016811	2.4
350	769.12	0.0001369	2.47
370	749.664	0.0001057	2.52
390	730.208	0.00007451	2.59

ANEXO 2: SALES FUNDENTES



ANEXO 3:

De la ecuación (20) se procedió a calcular la energía necesaria a entregar a las sales fundentes para generar en la noche los 10 MW requeridos durante 4 horas. Con ello se determina el flujo de aceite térmico que deberá pasar por el intercambiador de calor aceite-sales durante el día

$$627840 \times 10^3 = \dot{m}_{aceite} C_p \Delta T x (7 \text{ horas}) x (3600 \text{ s})$$

$$\dot{m}_{aceite} = 100.8 \text{ Kg/s}$$

El flujo está sobredimensionado debido a que al tanque de expansión de aceite térmico se le incrementó un adicional de volumen por seguridad.

SEGUIDOR SOLAR

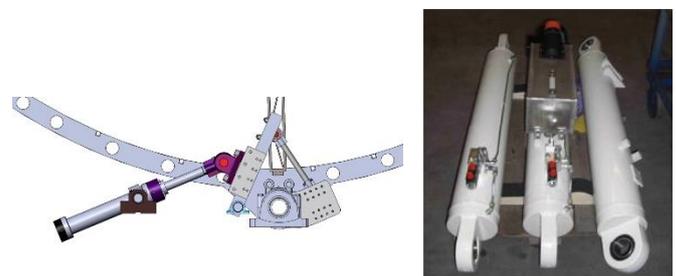
Para aprovechar la irradiación solar de manera permanente, se han implementado seguidores solares (solar trackers), que permiten a los concentradores solares cilíndrico parabólicos girar sincronizadamente por medio de motores hidráulicos a lo largo de uno o varios ejes para conseguir éste propósito.

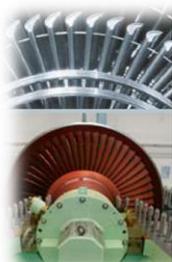
El seguimiento seleccionado será en giro de los concentradores en alineamiento norte-sur. Referencia : CSP Trough Tracking Electro-Hydraulic Actuator – EHA http://www.parker.com/literature/windpower/SOLAR_TRACKING_BROCHURE.pdf

Para el cálculo de las bombas de las sales fundentes, tanto frías como calientes-, se procedió de la siguiente manera:

$$Vol_{frías} = 50.463 \text{ m}^3 \rightarrow Q = \frac{50.463}{4} = 12.6 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$Vol_{calientes} = 52.794 \text{ m}^3 \rightarrow Q = \frac{52.794}{4} = 13.2 \text{ m}^3/\text{hr}$$





SST-300 Industrial Steam Turbines

Up to 50 MW

The SST-300 is a single-casing steam turbine, providing geared drive to a 1,500 or 1,800 rpm generator. It has a compact and flexible design with a high degree of standardization.



The SST-300 generator drive is used in the following processes and applications:

- Steam turbine plants and combined-cycle power plants
- Cogeneration and district heating
- Waste incinerators, waste-fired power plants and biomass plants
- Plants using the waste heat from chemical processes for power generation

In residential, commercial, municipal and industrial power generation, e.g. captive power plants for the chemical and petrochemical industry, for refineries, pulp and paper mills, steelworks and mines, sugar industry, textile industry and others. In special cases, it can also be used as a mechanical drive.



Technical data

- Power output up to 50 MW
- Speed up to 12,000 rpm
- Live steam conditions
 - Pressure up to 120 bar / 1,740 psi
 - Temperature up to 520 °C / 968 °F
- Bleed: Pressure up to 60 bar / 870 psi
- Controlled extraction (single or double)
 - Pressure up to 45 bar / 655 psi
 - Temperature up to 400 °C / 750 °F
- Exhaust steam pressure
 - Back pressure up to 16 bar / 232 psi
 - District heating up to 3 bar / 43 psi
 - Condensing up to 0.3 bar / 4.4 psi

(All data are approximate and project-related.)

ANEXO 4: TURBINA SIEMENS SST-300

Se seleccionó una turbina de vapor Siemens ®, Modelo SST-300

ANEXO 5: CÁLCULOS DE PÉRDIDA DE PRESIÓN PARA CADA TRAMO DE TUBERÍA DE ACEITE TÉRMICO.

		Tubería de impulsión y retorno	Troncal Principal	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
SUBCAMPO 1	Tubería de Entrada	Caudal (kg/s)	116.8	58.4	43.8	29.2	14.6
		Diametro(mm)	252.08	178.24	154.36	126.04	89.12
		Reynolds	2559478.72	1809824.76	1567354.22	1279739.36	904912.38
		Rugosidad relativa	0.0001813	0.0002564	0.0002961	0.0003626	0.0005128
		Factor de fricción	0.0139	0.0149	0.0154	0.0161	0.0173
		hf(pérdidas primarias)[m]	9.393	1.160	1.385	1.773	2.694
		ΔP(bar)	0.9145	0.1129	0.1348	0.1726	0.2623
	Tubería de Retorno	Caudal (kg/s)	116.8	14.6	29.2	43.8	58.4
		Diametro(mm)	268.85	95.05	134.43	164.64	190.11
		Reynolds	2399749.86	848439.70	1199874.93	1469540.66	1696879.40
		Rugosidad relativa	0.0001700	0.0004808	0.0003400	0.0002776	0.0002404
		Factor de fricción	0.0138	0.0173	0.0161	0.0154	0.0149
		hf(pérdidas primarias)[m]	8.827	2.526	1.662	1.298	1.088
		ΔP(bar)	0.8594	0.2459	0.1618	0.1264	0.1059

ANEXO 6 OPERACIÓN NOCTURNA

Se presentan los valores resultantes de los parámetros operativos evaluados para una generación nocturna variable (4, 8 y 10 horas) utilizando el calor de las sales fundentes almacenadas al aceite térmico. Para el proyecto se consideró 4 horas de operación nocturna para generar 10 MW.

	4 horas	8 horas	12 horas
Tiempo de funcionamiento con MS > 1	7 horas	8.5 horas	9.5 horas
Total	11 horas	16.5 horas	21.5 horas
Qalmac.total (MWh)	174.4	347.4	521
Numero de lazos	32	42	48

ANEXO 7: COMPONENTES DEL SISTEMA

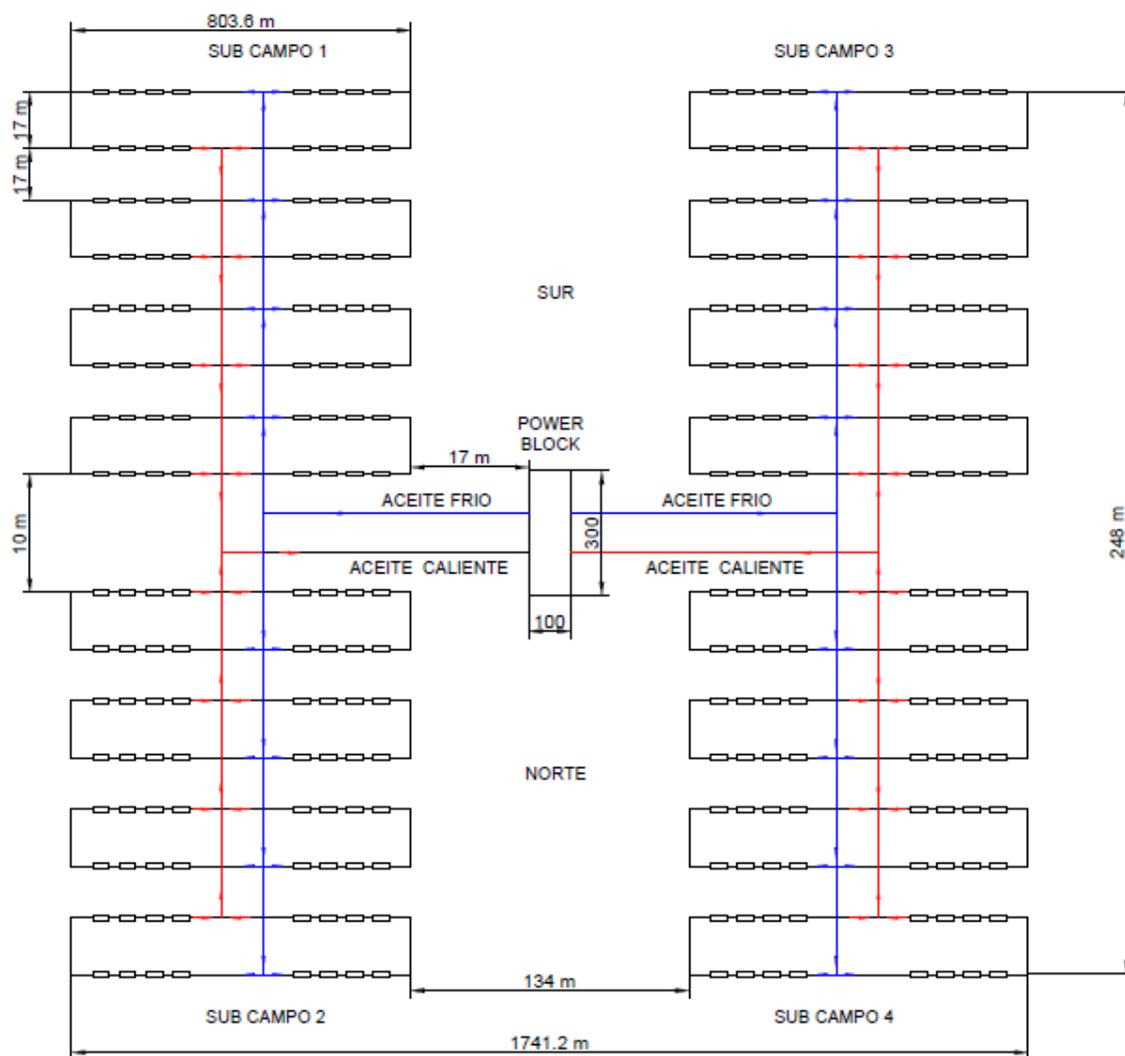


Figura 13. El Power Block está conformado por los siguientes componentes del sistema : un ciclo Rankine (intercambiador de calor aceite térmico-agua, turbina de vapor, condensador, bomba de agua, torre de enfriamiento), un intercambiador de calor aceite térmico-sales fundentes, dos tanques de almacenamiento de sales fundentes y sus respectivas bombas de sales.