

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UNA CENTRAL SOLAR TERMOELÉCTRICA DE COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS A CONDICIONES COLOMBIANAS

Iván Darío Pachón, Johann Alexander Hernández Mora, Diana Stella García Miranda*

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá

Carrera 7 N° 40- 53 Piso 5
Teléfono (0571)3014309837
Fax (0571)2877792
Correo Electrónico dsgarciam@udistrital.edu.co

Resumen

Este trabajo presenta una serie de elementos para el diseño de una Central Solar Termoeléctrica en Colombia. La descripción de las variables comprende el tipo de CCP que se desea utilizar, las consideraciones geométricas y de construcción del campo de colectores, la selección de los tanques de almacenamiento y las tuberías asociadas al campo de colectores, las consideraciones a tener en cuenta del tipo de aceite a utilizar, el cálculo de las pérdidas de presión en el campo de colectores y en las tuberías asociadas al campo de colectores.

Palabras claves: Colector termo solar, radiación

1. Introducción

Actualmente se está incrementando la preocupación ambiental, debido al deterioro del entorno natural, surgiendo la necesidad de investigar e implementar métodos de generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables, que tengan un impacto ecológico favorable. Atendiendo a esta preocupación las energías renovables que utilicen la radiación solar como energía primaria (Eléctrica Termo Solar y Solar Fotovoltaica), para la generación de energía eléctrica, han surgido como una alternativa importante para contrarrestar dicho problema.

En Colombia, al 31 de diciembre del 2008, se tenía un aporte de la generación de energía eléctrica del 66,91% en plantas hidroeléctricas [1], lo cual indica que en un gran porcentaje de la energía eléctrica generada en el país, no tiene grandes aportes al deterioro del entorno natural. Sin embargo, es importante vincular nuevas tecnologías renovables de generación eléctrica, que en un futuro puedan llegar a ser aplicables, y que además en otros países ya están teniendo en cuenta como opciones viables e importantes.

Las centrales eléctricas termo solares (CET), brindan una gran flexibilidad a la hora de ser aplicadas, ya que en diferentes sistemas de la CET pueden tener en cuenta diferentes tecnologías, como es el caso del campo de colección de la radiación solar (Colectores Cilindro-Parabólicos o CCP, Concentradores de Torre o Receptor Central y Disco Parabólico), el almacenamiento térmico (Almacenamiento térmico por medio de tanques y almacenamiento químico por medio de una reacción endotérmica), el fluido de trabajo (Aceites de transferencia térmica con rango de operación hasta los 400 °C para los CCP) y la posibilidad de hibridación (Existen diferentes posibilidades de hibridar las CET con una Central Termoeléctrica Convencional, lo cual es aprovechable ya que aproximadamente un 32.75% de la Generación Eléctrica en Colombia, es por medio de Centrales Termoeléctricas Convencionales [1]).

Este trabajo propone una metodología para diseñar una central solar termoelectrica de colectores cilíndrico parabólicos de acuerdo con las condiciones climatológicas de Colombia

2. Metodología de Diseño

a. Variables de Entrada:

Para la metodología de diseño se proponen las siguientes variables de entrada:

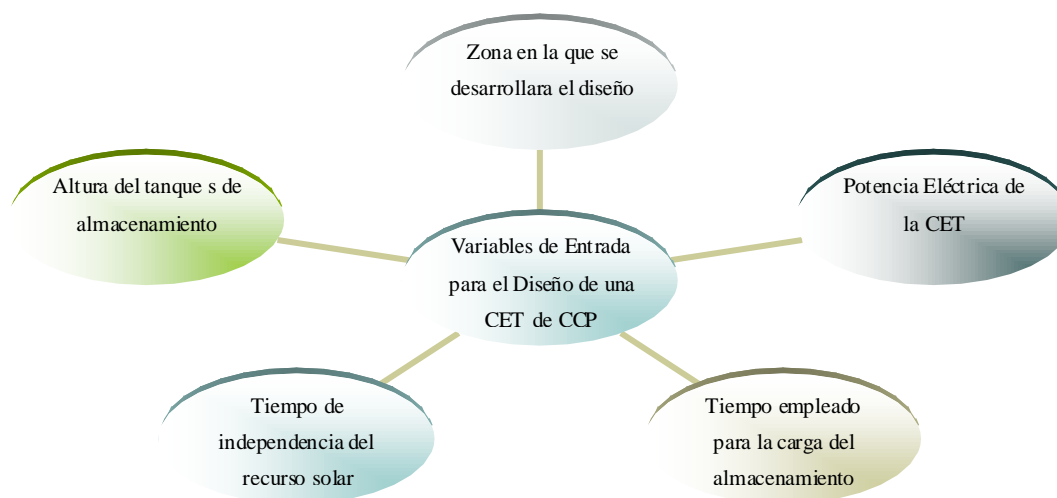


Figura 1. Variables de Entrada de la Metodología propuesta

Según un informe publicado por la Green Peace [2], las zonas propicias para instalar sistemas que aprovechen la radiación solar como energía primaria, se encuentran entre $\pm 40^\circ$ de latitud, incluyendo zonas como el Suroeste de Estados Unidos, América Central y del Sur, África, Oriente Medio, los países de la Europa Mediterránea, Irán, Pakistán, las regiones desérticas de India, la ex Unión Soviética, China y Australia. Colombia cruza la línea ecuatorial terrestre, ubicando su área desde $12^\circ 30' 40''$ de Latitud norte hasta los $4^\circ 13' 30,5''$ de Latitud sur.

El territorio Colombiano cuenta con una gran diversidad de climas y condiciones atmosféricas que afectan de forma directa la radiación solar, por lo cual se hace necesario conocer estadísticas de variables del recurso solar a lo largo del territorio Colombiano, con el fin de poder decidir las zonas que más benefician al diseño de un sistema basado en la energía solar como fuente primaria.

En Colombia, existen diferentes entidades y grupos de investigación que realizan medidas de la radiación solar de forma directa, pero dicha información no es de fácil acceso, lo que hace necesario acudir al atlas de radiación solar publicado por la UPME en el 2005, con la desventaja que este documento fue realizado en base a métodos indirectos de medición, haciendo que los datos tengan un rango más bajo de certeza. Dicho atlas contiene valores promedio de Hss, por mes y promedios multianuales. Se puede apreciar que las zonas con más alto valor de Hss promedio son la Guajira, Magdalena, Cesar, Córdoba, Sucre, la parte norte del Vichada, la parte norte del Casanare, la parte oriental del Arauca y la parte norte del Bolívar, San Andrés y Providencia, con valores entre 5 y 6 kWh/m².

De lo anterior, se podría decir que a lo largo del territorio Colombiano se cuenta con varias zonas que serían óptimas para la adecuación de un sistema que utilice la energía solar. Sin embargo, estos promedios no indican la variabilidad que puede tener dicho recurso, lo cual se ve reflejado en las horas de brillo solar. El número de horas promedio más alto es en la Guajira, con valores entre 7 y 8 horas al día, lo que indica que las otras zonas a pesar de contar con promedios altos de radiación solar, el sol no está presente durante un gran número de hora al día. De lo anterior, se puede decidir que la zona adecuada para implementar cualquier sistema que utilice el recurso solar es la Guajira. Los datos del ejemplo realizado son:

- *Potencia eléctrica de la CET igual a 50 MWe.*
- *Tiempo empleado para la carga del almacenamiento térmico igual a 10 horas.*
- *Tiempo de independencia del recurso solar igual a 5 horas.*
- *La zona en la que se desarrollara el diseño, será la Guajira.*
- *Altura de los tanques de almacenamiento igual a 15 m.*

b. Generador Eléctrico

Con respecto al generador eléctrico, sólo se calculará la potencia mecánica necesaria en el rotor del generador, para poder suministrar a la salida 50 MWe. La eficiencia de un generador se encuentra entre 95% y 99%, para el ejemplo se asume una eficiencia del

generador del 95% y se obtiene un valor de potencia mecánica del rotor igual a 52631578.95 W¹.

c. Ciclo de Potencia

Para efectos del diseño del ciclo de potencia, se tendrán en cuenta el ciclo Rankine Sobrecalentado y el ciclo Rankine Regenerativo. El software que se utilizará con el fin de simular y hacer las comparaciones respectivas es el CyclePad®.

Ciclo Rankine Sobrecalentado

De acuerdo a los parámetros de diseño establecidos en el modelo para el ciclo de potencia, se obtiene que el flujo másico necesario para suministrar la potencia mecánica necesaria el rotor del generador, es 68.64 kg/s. Los resultados se pueden observar en los parámetros de la salida del intercambiador, los cuales son mostrados en la Figura 2.

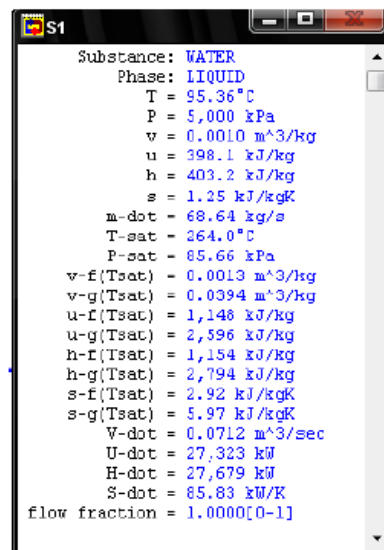


Figura 2. Resultados del ciclo de potencia Rankine Sobrecalentado.

¹ Cabe resaltar que en el ciclo Rankine Regenerativo, se deben utilizar dos generadores eléctricos, pero tendrán un equivalente de potencia mecánica igual a la calculada

Otras variables necesarias entregadas por el diseño del ciclo de potencia, son las temperaturas de entrada y salida del agua al intercambiador de calor. Como se puede observar, la temperatura de entrada al intercambiador es 95.36 °C. La temperatura de salida, fue establecida como 360 °C. En la Figura 3, se nota que la eficiencia térmica del ciclo es de 28.3%.

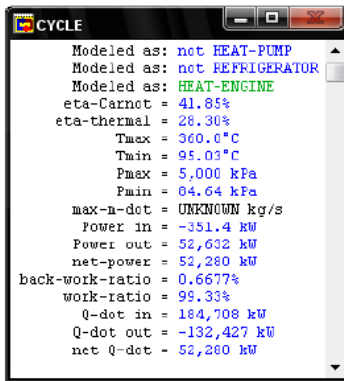


Figura 3. Resultados generales del ciclo Rankine Sobrecalentado

Ciclo Rankine Regenerativo

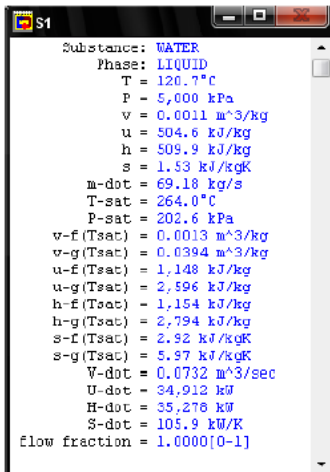


Figura 4. Resultados del ciclo de potencia Rankine Regenerativo

En este caso, como se aprecia en la Figura 4, el flujo másico necesario a la entrada del intercambiador es de 69.18 kg/s, y la temperatura de entrada al intercambiador es 120.7 °C.

Con respecto a la potencia mecánica entregada por cada turbina se obtuvieron los resultados de la Figura 5. Mientras en la Figura 6, se presentan los datos generales en el ciclo, y se puede observar que la potencia mecánica total entregada es 52645 kW, y la eficiencia térmica del ciclo es 28.72%.

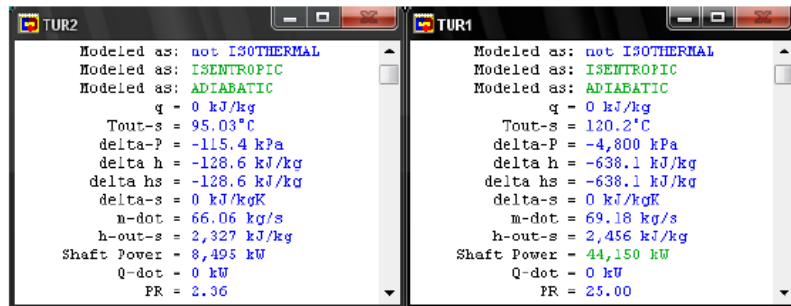


Figura 5. Resultados de las turbinas de alta y baja presión

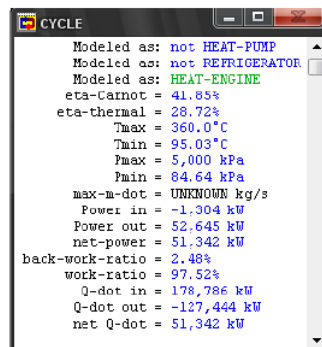


Figura 6. Resultados generales del ciclo Rankine Regenerativo.

d. Intercambiador de calor

En este ítem, se calculará el flujo másico que debe tener el fluido caliente para cumplir con los requerimientos del intercambio térmico. Este flujo másico será diferente para

cada ciclo de potencia, debido a que cada uno tiene diferencias en la temperatura de entrada del agua al intercambiador, y el flujo másico que debe tener el agua en el ciclo.

Para calcular el flujo másico del ciclo de potencia se utilizaron los siguientes datos:

- *Temperatura de entrada del agua en el intercambiador (T_{f1})= 95.36 °C= 368.51 °K.*
- *Temperatura de salida del agua en el intercambiador (T_{f2})= 360 °C= 633.15 °K.*
- *Calor específico del agua (C_{pf})= 4.184 kJ/kg °K*
- *Flujo másico del agua en el ciclo de potencia (m_f).*
- *Calor específico del Therminol VP-1 (C_{pc})= 2.588 kJ/kg °K. (Se utiliza el aceite Therminol VP-1, debido a una elección aleatoria)*
- *Temperatura de salida del aceite en el intercambiador (T_{c2}).*

El Flujo másico del aceite para el ciclo Rankine Sobrecalentado obtenido es 103.1725669 kg/s, y para el ciclo Rankine Regenerativo= 103.2162659 kg/s.

e. CAMPO DE COLECTORES

Los parámetros propios de los CCP, que fueron tomados en cuenta en el desarrollo del modelo, se deben a dimensiones del CCP, dimensiones del tubo receptor y la cubierta, y eficiencias de funcionamiento de los materiales constitutivos del CCP. La metodología expuesta y detallada se encuentra en [3]

Los parámetros asociados a las dimensiones del colector son: distancia focal (d_f), longitud del colector (L), ancho del colector (W). También son importantes las dimensiones que se tienen en el tubo receptor y en su cubierta, como lo es el diámetro interior (d_{ia}) y exterior del tubo receptor (d_{ea}) y diámetro interior (d_{icv}) y exterior de la cubierta (d_{ecv}). De igual manera se especifican variables físicas propias del colector, tales como: Absortancia solar de la superficie del receptor (α_s), Perdidas debidas a la orientación inexacta del colector hacia el sol (γ), Perdidas por reflexión del espejo (η_{optico}), Perdidas debidas a la transmisión del haz de luz a través de la cubierta (τ_g) y Relación geométrica de concentración (C_g).

El modelo del campo de colectores, se refiere a determinar el número de CCP en serie por fila, numero de filas de CCP en paralelo, y el área final destinada al campo de CCP, para

que pueda suministrar la temperatura y flujo de aceite adecuado al intercambiador de calor, y a los tanques de almacenamiento térmico.

El modelo propuesto, se resume en el esquema presentado en la Figura 7, en donde se puede observar que el modelo contiene desde el diseño del campo de CCP, hasta la bomba para que el aceite de trabajo.

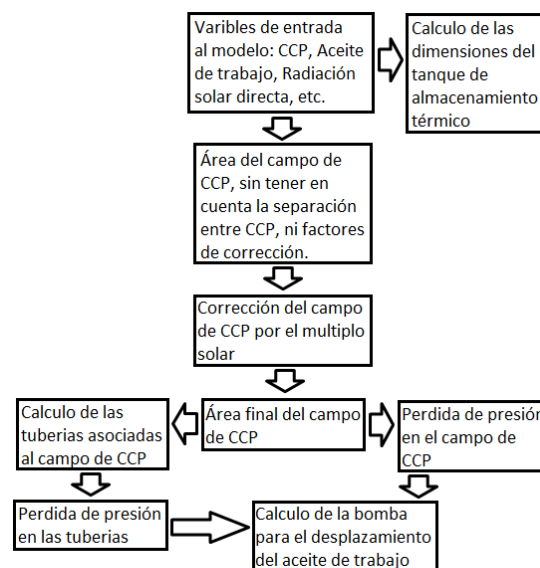


Figura 7. Esquema general del modelo.

Para el cálculo de la eficiencia de cada colector, es necesario conocer el área de apertura de cada colector, la radiación normal directa y el coeficiente de transferencia de calor. Para obtener el área de apertura del colector, obteniendo.

Tabla 1. Área de Apertura de los colectores LS-2 y LS-3

Colector	Área de apertura [m2]
LS-2	230.79
LS-3	537.88

A la hora de especificar la radiación normal directa, se presenta la dificultad de no tener valores de esta variable en ninguna parte del territorio Colombiano. Por lo tanto el valor de radiación solar directa será la misma radiación solar global, solo en este caso.

Debido a que el coeficiente de transmisión de calor por convección, es dependiente del diámetro interior del tubo receptor del colector, y las características del aceite a usar, entonces se realizaron los cálculos pertinentes para cada posibilidad.

Tabla 2. Coeficientes de Transmisión de calor por convección

	h1	
Aceite	LS-2	LS-3
Therminol VP-1	101.5265144	54.42138103

Luego se obtienen la resistencia térmica total para cada caso, el coeficiente de transferencia de calor por unidad de área, y los valores de eficiencia.

Continuando con el diseño, se halla el área del campo de colectores sin tener en cuenta la separación que debe existir entre ellos. Y se realiza la corrección al área del campo de colectores por el múltiplo solar, obteniendo la Tabla 3

Tabla 3. Área del campo solar con corrección por SM.

	AcampoSM [m ²]	
Ciclo Rankine	LS-2	LS-3
Sobrecalentado	482655.8084	379932.0111
Regenerativo	439873.7346	346255.2604

Debido a que ya se tiene el área que ocuparía el campo de colectores, en el caso que no hubiera distancia entre colectores, se debe especificar las distancias entre colectores, numero de colectores en serie y en paralelo, la longitud de cada fila de colectores y el ancho del campo de colectores. Dichos parámetros son consignados en la Tabla 4, en donde se puede ver por ejemplo que para el ciclo Rankine Sobrecalentado y con el colector LS-2 se debe tener 67 colectores en serie por fila y 21 filas de colectores en paralelo.

Tabla 4. Dimensiones del campo de colectores

Variable	LS-2	LS-3	Unidades
Wcc	15	17.28	m
Nparalelo(Sobrecalentado)	21	21	
Nparalelo(Regenerativo)	21	21	
Wtotal(Sobrecalentado)	305	351.36	m
Wtotal(Regenerativo)	305	351.36	m
Ltotal(Sobrecalentado)	3118.760622	2131.070967	m
Ltotal(Recalentado)	2991.512781	2044.121627	m
Nserie(Sobrecalentado)	67	23	
Nserie(Recalentado)	64	22	
Lreal(Sobrecalentado)	3155.7	2189.6	m
Lreal(Regenerativo)	3014.4	2094.4	m
Areal(Sobrecalentado)	962488.5	769337.856	m ²
Areal(Recalentado)	919392	735888.384	m ²

Para calcular las pérdidas que se presentan a lo largo del campo solar, teniendo en cuenta las pérdidas en el tubo receptor y las pérdidas en las uniones entre colectores. Estos cálculos están en función principalmente de la velocidad del fluido, la densidad del aceite empleado, el diámetro interior del tubo receptor y la longitud de las filas de colectores.

Las pérdidas totales en el campo de colectores, se ven en la Tabla 27.

	Pérdida de presión en el campo [Pa]	
Ciclo Rankine	LS-2	LS-3
Sobrecalentado	3193914.229	3258048.241
Regenerativo	2893785.322	2955886.261

f. Tanques de almacenamiento térmico

Los tanques de almacenamiento térmico, son los encargados de entregar energía térmica al ciclo de potencia cuando no haya la suficiente radiación solar sobre el campo de colectores, por lo que es muy importante conocer las dimensiones necesarias de dichos tanques, para poder cumplir con el almacenamiento esperado en ellos

El cálculo del diámetro de los tanques de almacenamiento resulto para el Ciclo Rankine Sobrecalentado es de 14.91 m y para el Regenerativo, 14.91 m. Ambos con una altura de 15 m.

g. Bomba para el desplazamiento del fluido

Al campo de colectores, es necesario vincular una bomba para hacer circular el aceite de trabajo a lo largo de la trayectoria entre el campo de colectores y el ciclo de potencia. Por tal motivo, se establece utilizar una bomba para cumplir el cometido de la correcta circulación del aceite a lo largo de su trayectoria, la cual debe superar las pérdidas de presión que sufre el aceite en las diferentes partes de su recorrido (Campo de CCP, tuberías primarias y tuberías secundarias).

Es importante ilustrar que la bomba que se debe usar en este tipo de aplicación es una de desplazamiento positivo, por el hecho que estas no necesitan ser cebadas para empezar a operar. Para obtener la potencia, se asumirá un valor de 0.8 como la eficiencia de la bomba y se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 5. Potencia de la bomba del fluido.

<i>Ciclo Rankine</i>	<i>Potencia de la Bomba (W)</i>	
	<i>LS-2</i>	<i>LS-3</i>
<i>Sobrecalentado</i>	<i>3040144.41</i>	<i>2752834.44</i>
<i>Regenerativo</i>	<i>2901126.76</i>	<i>2632122.69</i>

Conclusiones

- La metodología desarrollada permite realizar comparaciones entre diferentes tipos de CCP, lo que permite determinar la mejor opción técnica de acuerdo con las condiciones requeridas para cada diseño. En el caso particular del ejemplo desarrollado para Colombia, se identificó que el colector LS-3, debido a las mejores características ópticas, de construcción y mayores dimensiones geométricas, alcanza un mejor rendimiento que el colector LS-2, llegando a un 12.5% más de eficiencia.
- Se obtuvieron datos similares de eficiencia del colector LS-2, desde la metodología desarrollada en este trabajo de grado con respecto a un modelo de eficiencia desarrollado por el laboratorio de ciencia e ingeniería de la compañía Sandia Corporation, con diferencias no mayores de 2.6 % entre los cálculos. Esta diferencia se

presenta debido a que el modelo del laboratorio Sandia, no incluye las características propias del aceite de trabajo asociado, mientras en el modelo aquí desarrollado, se incluyen características físicas de operación de dicho aceite.

- De acuerdo con las comparaciones entre el ejemplo desarrollado con el Ciclo Rankine Sobrecalentado y el Ciclo Rankine Regenerativo, se encontró que debido a las mejores características termodinámicas que tiene el Ciclo Rankine Regenerativo, se logran tener reducciones en el área real del campo de colectores en aproximadamente un 5 %, al utilizar el Ciclo Rankine Regenerativo.

Referencias

- [1] Unidad de Planeación Minero Energética. Plan de Expansión de Referencia: Generación-Transmisión 2009-2023. Bogotá: UPME, 2008. ISBN 978-958-8363-06-6
- [2] Peace, Green. Energía Solar Termoelectrica. 2020.
- [3] .Pachon, I, Hhernandez, J Vallejo, W. Desarrollo de una Metodología General para el Diseño del Campo de Colectores Cilindro-Parabólicos en una Central Eléctrica Termo solar (CET). *Journal Revista Colombiana de Física*, vol. 41, No. 2, Abril 2009. (Pendiente de Publicar)
- [4] Fernández Díez, Pedro. Ingeniería Térmica y de Fluidos. s.l. : Universidad de Cantabria.
- [5] García Casals, Xavier. La energía solar térmica de alta temperatura como alternativa a las centrales térmicas convencional y nuclear. 2001.
- [6] A. Gengel, Yunus. Transferencia de calor. s.l. : McGraw Hill.
- [7] Crane. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. s.l. : McGraw-Hill.
- [8] SolarWeb. Solar Térmica [En línea]. <http://www.solarweb.net/forosolar/>. [Citado en 11 de febrero de 2009].