

Ensayos

Modelación y simulación en TRNSYS de un concentrador solar cilíndrico parabólico a partir de datos experimentales

A-Flores-Meza¹, S-Lugo-Ucán¹, O-García-Valladares¹, L-Contreras-Romero².

¹Instituto de Energías Renovables de la UNAM. ²Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec.

Recibido: 17-02-2017 Aceptado: 29-06-2017

Resumen

En este trabajo se presenta la modelación dinámica de un concentrador solar cilíndrico parabólico (CCP), con un área de apertura de 1.184 m² y un factor de concentración de 23.73, construido en la Universidad del Istmo Campus Tehuantepec en función de datos experimentales. La geometría del colector solar, las propiedades físicas, ópticas de la superficie reflectora y del absorbedor así como los datos meteorológicos fueron utilizados para modelar en TRNSYS, se simularon dinámicamente los datos teóricos para hacer la comparación contra los datos experimentales y comprobar que el modelo fue adecuado. El objetivo principal fue el de poder extrapolar de un solo flujo al que fueron recabados los datos de operación del CCP a diferentes flujos con el modelo obtenido, así como estudiar una posible aplicación en un sistema de calentamiento solar para futuros trabajos

Palabras clave: Concentrador solar, Simulación, TRNSYS, Eenergía solar

Abstract

This work presents the dynamic modelling of a parabolic cylindrical solar concentrator (CCP), with an opening area of 1,184 m² and a concentration factor of 23.73, built at the Universidad del Istmo Campus in Tehuantepec, Mexico, based on experimental data. The geometry of the solar collector, the physical and optical properties of the reflecting surface and the absorber as well as the meteorological data were used to model in TRNSYS. The theoretical data was dynamically simulated to compare it against the experimental data and to verify that the model was suitable. The main objective was to be able to extrapolate from a single flow from which the data of operation of the PCC was collected to different flows with the model obtained, as well as to study a possible application in a solar heating system for future works.

Keywords: Solar concentrator, Simulation, TRNSYS, Solar energy.

Résumé

Dans ce travail, on présente la modélisation dynamique d'un concentrateur solaire cylindrique parabolique (CCP) avec une surface d'ouverture de 1.184 m² et un facteur de concentration de 23.73, construit à l'Université de l'Isthme Campus Tehuantepec en fonction de données expérimentales. La géométrie du capteur solaire, les propriétés physiques, optiques de la surface réfléchissante et de l'absorbeur ainsi que les données météorologiques ont été utilisées pour modéliser en TRNSYS. On a simulé dynamiquement les données théoriques afin de les comparer avec les données expérimentales et ainsi prouver que le modèle était approprié. L'objectif principal a été de pouvoir extrapoler d'un seul flux dont on a recueilli les données d'opération du CCP à différents flux avec le modèle obtenu, ainsi que d'étudier une possible application dans un système de réchauffement solaire pour de futurs travaux.

Mots-clés: Concentrateur solaire, Simulation, TRNSYS, Energie solaire.

Introducción

Las fuentes de energía renovable comprenden la energía eólica, la energía solar o del Sol, la del flujo de los ríos o hidroeléctrica, el calor interno de la Tierra o energía geotérmica, la de las olas, las mareas y otras formas de energía del océano, y los bosques y otras fuentes de biomasa [1]. Debemos considerar que actualmente la mayor parte de la generación de energía térmica en el mundo está

basada en hidrocarburos provenientes del petróleo y gas natural cuyas reservas probadas permitirán satisfacer la demanda sólo para algunos años. Aun cuando hubiera suficientes recursos fósiles para cubrir la creciente demanda energética, permanecería el problema relacionado con la contaminación, específicamente con las altas emisiones de CO₂, que afectan seriamente nuestro ecosistema [2].

Se han realizados esfuerzos importantes por parte de la comunidad internacional para la protección del medio ambiente como son el protocolo de Montreal y el protocolo de Kyoto. Bajo estos acuerdos internacionales es donde la tecnología relacionada con el aprovechamiento de la radiación solar se reconoce como una solución apropiada para la generación de energía térmica y eléctrica. Debemos recordar que la transformación de la radiación solar es la fuente primordial de las tecnologías renovables ya que el viento, olas, hidroeléctrica e incluso biomasa son resultado de la potencia proveniente del Sol [3].

Colectores solares

Los colectores que utilizan la radiación solar son tipos especiales de intercambiadores de calor que transforman la energía captada de la irradiación solar en energía interna, misma que es transferida a un medio de transporte (por lo general agua, aceite o aire) que fluye a través del colector. El flujo de energía radiante que finalmente intercepta el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda entre 0.3 y 3 μm del rango total visible) y es por naturaleza variable con la hora del día y el mes del año [4].

Entre los distintos tipos de colectores, se encuentra el concentrador cilíndrico parabólico (CCP), ver figura 1, el cual concentra la radiación solar en un eje y aprovecha la radiación directa del Sol. Cuando el CCP está adecuadamente orientado, los rayos solares se reflejan en la superficie parabólica e inciden en una región a lo largo de una línea que corresponde al foco de la sección transversal del canal parabólico, tienen un factor de concentración (cociente del área de apertura del concentrador entre el área de absorción del receptor) entre 15 y 40. En esta línea focal está colocado un receptor normalmente cilíndrico, donde la radiación es absorbida y transformada en energía térmica. Dicha energía es removida mediante un fluido con propiedades térmicas adecuadas, ya sea agua o algún aceite térmico, y posteriormente es utilizada como calor [5].

Simulador TRNSYS

TRNSYS es un software de entorno extremadamente flexible usado para simular el comportamiento de sistemas transitorios. Mientras que la gran mayoría

de las simulaciones se centran en la evaluación del rendimiento de los sistemas de energía térmica y eléctrica, TRNSYS igualmente se puede utilizar para modelar otros sistemas dinámicos como el flujo de tráfico, o procesos biológicos. TRNSYS se compone de dos partes. El primero es un motor (llamado el núcleo) que lee y procesa el archivo de entrada, de forma iterativa resuelve el sistema, determina la convergencia, y las variables del sistema. El núcleo también proporciona utilidades que (entre otras cosas) determinan las propiedades termofísicas, matrices inversas, realizan regresiones lineales,

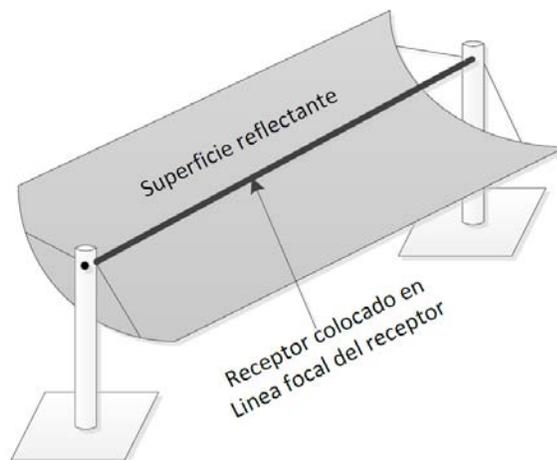


Figura 1. Concentrador cilíndrico parabólico.

e interpolar los archivos de datos externos. La segunda parte de TRNSYS es una extensa biblioteca de componentes, llamados Type y que representan subrutinas que simulan el comportamiento de los equipos. La biblioteca estándar incluye aproximadamente 150 Types que van desde bombas hidráulicas hasta edificios multizonas. Los modelos se construyen de tal manera que los usuarios pueden modificar los componentes existentes o escribir propios, que extiende las capacidades del mismo [6]. Type536 es el elemento de TRNSYS que modela el comportamiento de un tipo de colector solar llamado “concentrador cilíndrico parabólico” que se utiliza comúnmente en aplicaciones de alta temperatura. El Type536 se basa en ecuaciones teóricas desarrolladas en Ingeniería de Procesos Térmicos Solar de la Universidad de Wisconsin [7].

Dentro de todas las ecuaciones manejadas por el simulador en Type536 se muestra el modelo usado

de Hottel-Whillier para el calor útil en el absorbedor del CCP:

$$\dot{Q}_u = \frac{AF_R}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} (I_{in}(\tau\alpha) - U_{L,j}(T_{i,j} - T_a)) \quad (1)$$

Donde α es absorptancia, τ es transmitancia, A área de apertura en m^2 , F_R es el factor de remoción, N_s es el número de colectores en serie, I_{in} es la radiación directa incidente en $KJ/h\cdot m^2$, U_L coeficiente de pérdida de calor en $KJ/h\cdot m^2\cdot K$, T_i es la temperatura de entrada del fluido en $^\circ C$ y T_a es la temperatura ambiente en $^\circ C$. La temperatura de salida del fluido está dada por:

$$T_{out} = T_{in} + \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m}_{fluid}Cp_{fluid}} \quad (2)$$

Donde \dot{m}_{fluid} es flujo másico del fluido en kg/h , Cp_{fluid} calor específico del fluido en $KJ/kg\cdot K$. Para la extrapolación del modelo a diferentes flujos al de prueba es utilizado un factor de corrección r_1 dado

$$r_1 = \frac{\frac{\dot{m}_{fluid}Cp_{fluid}}{AF'U_L} \left(1 - e^{-\frac{AF'U_L}{\dot{m}_{fluid}Cp_{fluid}}} \right)_{use}}{\frac{\dot{m}_{test}Cp_{fluid}}{AF'U_L} \left(1 - e^{-\frac{AF'U_L}{\dot{m}_{test}Cp_{fluid}}} \right)_{test}} \quad (3)$$

por: F'

Donde F' es el factor de eficiencia del concentrador. El calor útil es multiplicado por r_1 y este es utilizado por el simulador para la determinación de la temperatura de salida a los diferentes flujos simulados mediante la ecuación 2.

Metodología

Los datos experimentales provienen de un prototipo de CCP construido en la Universidad del Istmo (UNISTMO) con una distancia focal teórica de diseño de 500mm, una apertura de 1250mm y una longitud de canal de 1000mm (ver figura 2).

El reflector del CCP es de acrilato de metilo con acabado espejo (reflectividad de 0.82) cuenta con un mecanismo que es un juego de poleas que mediante una banda transmite el giro del motor a pasos



Figura 2. Prototipo de CCP.

NEMAT34-506 para el seguimiento solar del colector en el ángulo azimutal; también cuenta con una base mecánica que le permite al concentrador seguir la altura angular aparente del Sol.

En la tabla 1 se muestran los datos experimentales dados al simulador TRNSYS.

Tabla 1. Datos ingresados en TRNSYS.

Razón de concentración	23.73
Área de apertura (m^2)	1.184
Fr	0.867
τ	1
α	0.9
U_L ($kJ/h\ m^2\ K$)	15.9156
Cp fluido ($kJ/kg\ K$)	4.19
Flujo másico (kg/h)	18

Cabe destacar que dentro del factor de remoción F' están incluidas las características del tubo absorbedor el cual es de cobre de un metro de longitud.

En la figura 3 se muestra la pantalla del software TRNSYS en la cual se hace el ingreso de los parámetros experimentales del CCP.

Para hacer la comparación entre el sistema experimental y teórico se llevó a cabo la modelación del mismo mediante TRNSYS Simulation Studio que incluye el Type536 para el CCP; el Type 9 para leer los datos climáticos de entrada de un archivo externo (obtenidos de una estación meteorológica Vantage Pro2 Plus Modelo 6163 en UNISTMO); radiación directa inclinada, temperatura ambiente y la temperatura de entrada al tubo absorbedor, así como el flujo de entrada; Type 65 da salida a los resultados de la simulación. La figura 4 muestra el esquema esta modelación.

Se realizó la simulación de diferentes flujos (18 a 240 kg/h) para ver el comportamiento que se podría

tener en la temperatura de salida, esto fue con un solo colector. Posteriormente, se incrementó el número de colectores en serie para encontrar la cantidad de colectores necesarios para una temperatura a la salida de 50°C a un flujo de 4 l/min, este flujo en base a la norma NOM-008-CNA-1998 [8].

Finalmente se realizó la modelación de un sistema de calentamiento de agua para uso en una institución educativa de nivel media superior y superior, en donde la cantidad de agua caliente (a 50°C) que se requiere es de 7.5 litros por alumno, esto en base a la norma NADF-008-AMBT-2005 [9]. Este sistema deberá suministrar el 80% de la energía requerida anualmente para una escuela de 100 alumnos.

La figura 5 muestra la modelación del sistema de calentamiento de agua para una escuela de 100 alumnos, en donde se requieren de 750 litros de agua caliente a 50°C. La tecnología a utilizar es el CCP, se tiene un tanque de 750 litros, un calentador auxiliar, una bomba hidráulica y el control de arranque y paro. Esto da una idea de la posibilidad del uso de TRN-SYS no sólo para el dimensionamiento y cálculo de este sistema, sino también para el posible cálculo económico y de las ventajas del uso de colectores solares en el ahorro de energía y el impacto ambiental en la reducción de emisiones de CO₂.

La figura 6 muestra los datos experimentales climáticos que se tomaron para la simulación y que fueron leídos mediante el Type 9.

La figura 7 muestra los resultados de la temperatura de salida del CCP obtenidos teórica y experimentalmente, en esta gráfica se puede observar que los valores teóricos son mayores (6.43% promedio) a los experimentales, lo cual se debe a que el colector tiene pérdidas de energía ocasionadas por deficiencias ópticas de la superficie reflectora, provocando que sólo una parte de la radiación directa incidente llegue al tubo absorbedor, también debido a las pérdidas convectivas por la falta de un tubo evacuado en el absorbedor, así mismo, posibles pérdidas debidas al sistema de seguimiento de motor a pasos, sin contar con los errores de los instrumentos de medición, fluctuaciones en el flujo y factores climáticos como la velocidad del viento. Esto hace sugerir una revisión del diseño del colector solar y del sistema de adquisición de datos experimentales.

La figura 8 muestra el calor útil experimental y calculado en la simulación, en donde la diferencia porcentual promedio entre estos dos valores es de 11%, debido a lo mencionado anteriormente.

La figura 9 muestra el comportamiento de la temperatura de salida máxima para diferentes flujos de operación del concentrador solar cilíndrico parabólico, estos resultados fueron obtenidos mediante la modelación. Se encontró que para un flujo de 4 l/min (240 kg/h) es necesario poner más colectores conectados en serie con el fin de tener una temperatura cercana a los 50°C.

La figura 10 muestra las temperaturas de salida del CCP a diferentes números de colectores en serie (1s a 7s) con un flujo de 4 l/min. Se observa que se requieren 7 colectores en serie para incrementar de una temperatura de entrada promedio de 30°C a una temperatura de salida de 50°C (eficiencia de 0.84 simulada).

En la tabla 2 se muestran los valores de conversión para el cálculo de gas LP, el costo del mismo y el equivalente en toneladas de CO₂.

En la Tabla 3 se dan los valores de energía para el servicio (Qreq) que son aportados por gas LP sin el uso de CCP, en la Tabla 4 Qaux representa la cantidad de energía aportada por gas LP no cubierta por el CCP y en la Tabla 5 se dan los valores de energía obtenidos con el colector (Qsolar) y los ahorros de gas LP en litros y pesos (en referencia a los datos de la Tabla 2) con la tecnología CCP. Se encontró que para este sistema se requieren de 5 colectores en serie con lo que se alcanza el 80% del ahorro en el consumo de energía anual. De las tablas anteriores es importante recalcar que para un sistema calentamiento de agua con tecnología CCP para una escuela de 100 alumnos en Tehuantepec, Oaxaca, se tendrán ahorros anuales de 983 litros de gas LP, lo que equivale a un poco más de \$6,500 pesos y a dejar de emitir al ambiente 1.55 toneladas de CO₂.

Discusión

El trabajo desarrollado de simulación es importante debido a que demuestra que es posible incorporar dispositivos renovables que permitan ahorrar no sólo energéticamente, sino aminorar el uso de combustibles de origen fósil que conllevan al aumento de gases de efecto invernadero, tal es el ejemplo aplicado al

servicio de abastecimiento de agua caliente en una escuela con 100 estudiantes en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, por otro lado permitió ver que es necesario optimizar la geometría de

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Number of collectors in series	1	-			More...
2	Number of collectors in parallel	1	-			More...
3	Aperture area	1.184	m ²			More...
4	Concentration ratio	23.73	-			More...
5	Intercept efficiency (FrTan)	0.8409	-			More...
6	Efficiency slope (FrUI)	13.7988	kJ/hr.m ² .K			More...
7	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K			More...
8	Logical unit	30	-			More...
9	Number of IAM points	10	-			More...

Figura 3. Pantalla de ingreso de parámetros en TRNSYS.

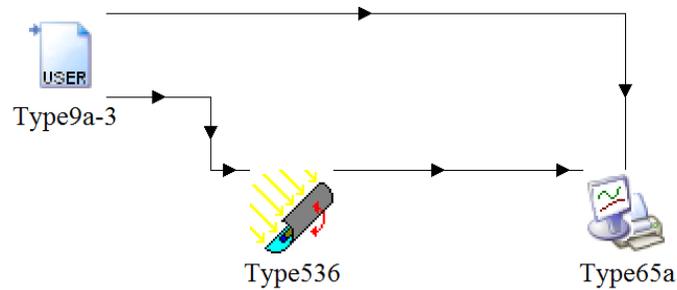


Figura 4. Pantalla del diagrama generado en TRNSYS.

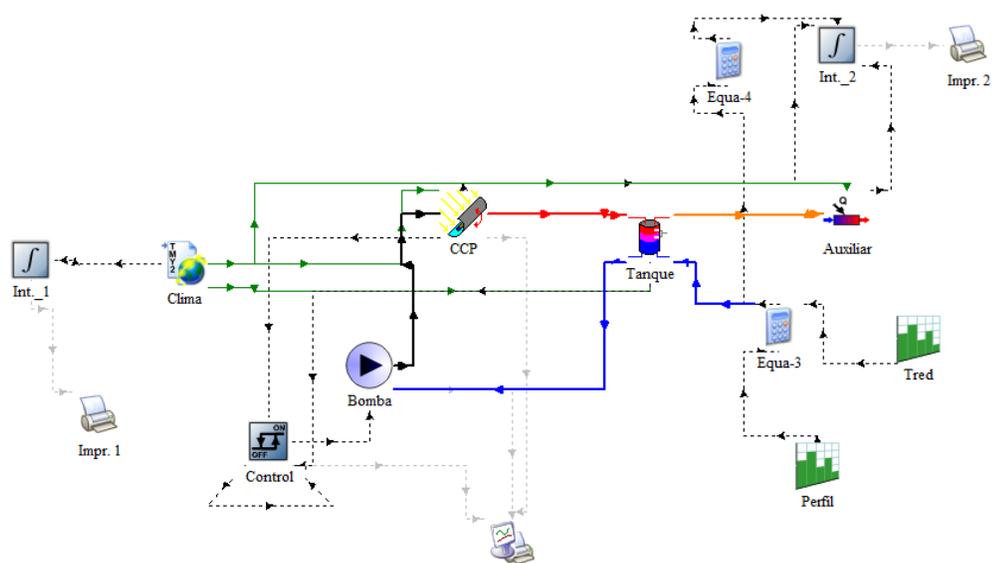


Figura 5. Modelación en TRNSYS de un sistema de calentamiento de agua con tecnología CCP.

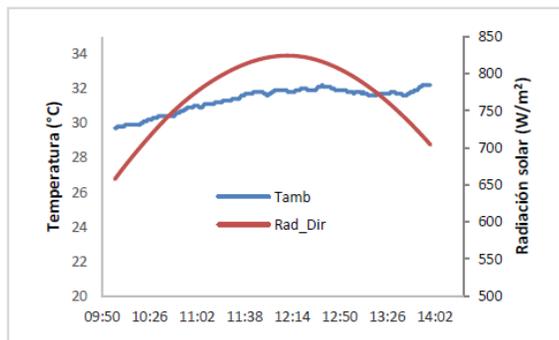


Figura 6. Temperatura ambiente y radiación directa incidente usada en la simulación en TRNSYS.

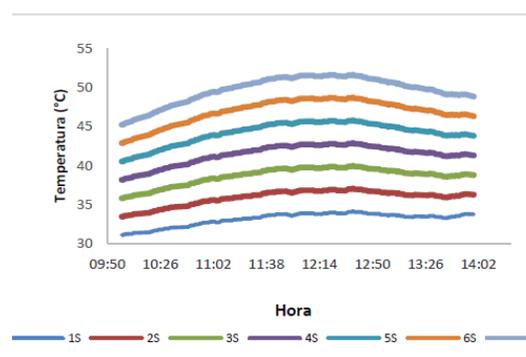


Figura 10. Perfiles de temperaturas para diferente cantidad de CCP's en serie.

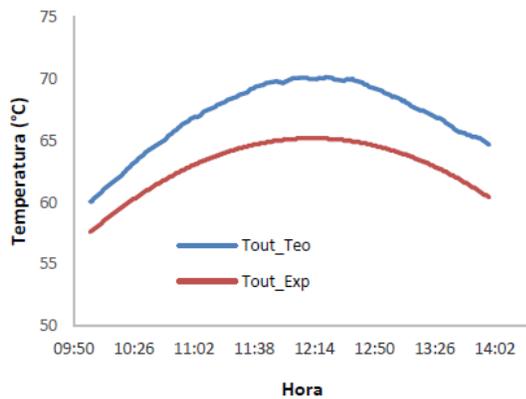


Figura 7. Comparación de las temperaturas de salida obtenidas teórica y experimentalmente.

Tabla 2. Cálculo de GLP, costo y Ton de CO₂

$P_{C_{GLP}}$	26,640 kJ/L
$Costo_{GLP}$	6.71 \$/L
η_{cal}	0.75
FCO_2	1.58 kgCO ₂ /L

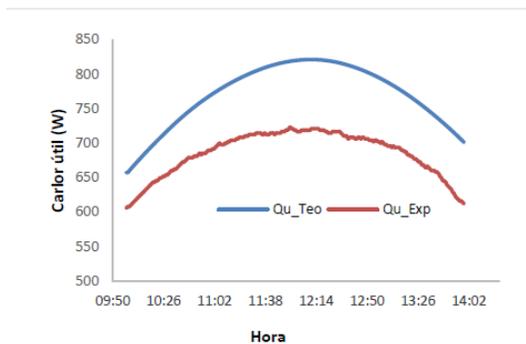


Figura 8. Comparación del calor útil teórico y experimental.

Tabla 3. Valores sin equipo solar

Mes	Q_{req} [kJ]	GLP [L]	Costo Actual (\$)	CO ₂ [Ton]
ENE	2,257,928	113	758.29	0.18
FEB	2,021,838	101	679.01	0.16
MAR	2,111,942	106	709.27	0.17
ABR	1,940,211	97	651.59	0.15
MAY	1,927,025	96	647.16	0.15
JUN	1,968,467	99	661.08	0.16
JUL	1,995,152	100	670.04	0.16
AGO	1,995,152	100	670.04	0.16
SEP	1,996,722	100	670.57	0.16
OCT	2,063,279	103	692.92	0.16
NOV	2,034,396	102	683.22	0.16
DIC	2,218,999	111	745.22	0.18
	24,531,111	1,228	8,238.43	1.94

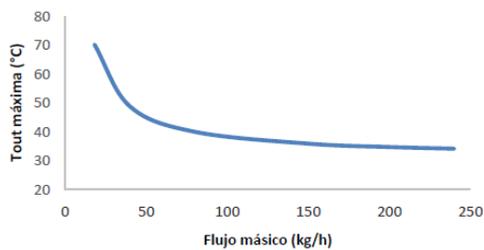


Figura 9. Temperaturas de salida máximas a diferentes flujos de operación.

Tabla 4. Valores con equipo solar

Mes	Q _{aux} [kJ]	GLP [L]	Costo Actual (\$)	CO ₂ [Ton]
ENE	456,454	23	153.29	0.04
FEB	229,600	11	77.11	0.02
MAR	169,304	8	56.86	0.01
ABR	176,518	9	59.28	0.01
MAY	460,016	23	154.49	0.04
JUN	635,316	32	213.36	0.05
JUL	466,052	23	156.52	0.04
AGO	489,815	25	164.50	0.04
SEP	659,732	33	221.56	0.05
OCT	447,714	22	150.36	0.04
NOV	186,699	9	62.70	0.01
DIC	515,970	26	173.28	0.04
	4,893,190	245	1,643.31	0.39

Tabla 5. Ahorro con equipo solar

Mes	Q _{solar} kJ	GLP litros	Ahorro \$	CO ₂ Ton
ENE	1,801,475	90	605.00	0.14
FEB	1,792,238	90	601.90	0.14
MAR	1,942,638	97	652.41	0.15
ABR	1,763,693	88	592.31	0.14
MAY	1,467,009	73	492.67	0.12
JUN	1,333,150	67	447.72	0.11
JUL	1,529,100	77	513.53	0.12
AGO	1,505,338	75	505.55	0.12
SEP	1,336,990	67	449.01	0.11
OCT	1,615,565	81	542.56	0.13
NOV	1,847,697	92	620.52	0.15
DIC	1,703,028	85	571.94	0.13
	19,637,921	983	6,595.12	1.55

la superficie reflectora, así como de evacuar el tubo absorbedor y revisar el sistema de seguimiento solar para mejorar su funcionamiento.

Conclusiones

La simulación dinámica de estos sistemas en herramientas como TRNSYS, permite no solamente optimizar los componentes y parámetros fundamentales del sistema, sino también detectar posibles errores de dimensionado, antes de ser puestos en práctica. Además permitió la simulación de la cantidad de equipos en serie necesarios para el uso de regaderas con un flujo de 4 l/min a una temperatura de 50°C. Así mismo, se logró realizar la proyección anual de un sistema de calentamiento de agua con tecnología CCP para suministrar agua caliente a una escuela de 100 alumnos.

Agradecimiento

Al Dr. Víctor Iván Moreno Oliva, Profesor investigador titular B de la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, adscrito al posgrado por permitirnos tomar datos del colector solar cilíndrico parabólico.

Bibliografía

- D. M. Kammen, "Renewable Energy, Taxonomic Overview," *Encycl. Energy*, vol. 5, pp. 385–412, 2004.
- C. Tyner, O. Agent, and G. Kolb, "Concentrating solar power in 2001," ... *Task I Electr. Power ...*, pp. 1–8, 2001.
- J. Twidell and T. Weir, *Renewable Energy Resources*, vol. 532, no. 1. 2006.
- L. C. R. Alfonso Flores Meza, Víctor Iván Moreno Oliva, Jonatán O. Ocampo Chávez, "Ajuste de un concentrador solar de canal parabólico a partir de su reconstrucción geométrica," *Temas Cienc. y Tecnol.*, vol. 20, pp. 43–48, 2016.
- M. Antonelli, M. Francesconi, P. Di Marco, and U. Desideri, "Analysis of heat transfer in different {CPC} solar collectors: A {CFD} approach," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 101, p. , 2016.
- D. P. Strigari, "Development of a concept for the autarkic energy and water supply of a housing estate in an area with high average solar irradiation"<https://e-archivo.uc3m.es/> Universidad Carlos III de Madrid, May, 2009.F. DeWinter, *Solar collectors, energy storage, and materials*. MIT Press, 1990.
- Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, "NORMA Oficial Mexicana NOM-008-CNA-1998 , *Regaderas Empleadas*," p. 15, 1998.
- E. Técnicas, P. El, A. D. E. La, E. Solar, and E. N. El, "energía solar en el calentamiento de agua NADF-008-AMBT-2005 que en albercas , *fosas de*," 2005.