

SOFTWARE PARA EL ESTUDIO DEL DESEMPEÑO TERMICO DE SISTEMAS DE CONCENTRACION SOLAR

Hugo Aparicio¹, Pablo Dellicompagni², Carlos Cadena²

¹Universidad Nacional de Salta (UNSa). Av. Bolivia 5150. Salta, 4400, Argentina.

aparihe@gmail.com.

²Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Av. Bolivia 5150. Salta, 4400, Argentina. pablodellicompagni@gmail.com.

RESUMEN: Se desarrolló una herramienta numérica con el objetivo de aportar una opción práctica de simulación del comportamiento de los sistemas de concentración solar, que sea lo suficientemente flexible para que pueda ser utilizada sin grandes restricciones. Este software fue creado con lenguajes de programación de alto nivel y con las características de una página web. El programa se encarga de procesar los datos ingresados mediante las ecuaciones correspondientes a la geometría solar, el balance de energía de un sistema concentrador solar, presión, temperatura de salida, etc. Las salidas del programa presentan los valores generados para la potencia térmica, energía térmica, entre otros parámetros, de los sistemas concentradores solares. Se considera que lo más destacado es la posibilidad de combinación de los datos de ingreso, ya que esto contribuye a simular una gran cantidad de escenarios lo que resulta de un gran aporte a la hora de la toma de decisiones en cuanto a las características de tamaño, eficiencia, pérdidas de calor, etc., que debe tener un equipo de concentración solar.

Palabras claves: concentración solar, simulación numérica, herramienta, toma de decisiones.

INTRODUCCION

Entre los recursos utilizados como generadores de energía tenemos las llamadas energías renovables. Y entre otras a considerar, tenemos a la energía solar, el sol provee a la tierra todos los días de una gran cantidad de energía que se debe aprovechar. El ser humano a desarrollado algunas tecnologías para el aprovechamiento de la energía procedente del sol. Una de ellas es la tecnología de concentración solar que aprovecha la irradiación solar para transformarla en energía térmica. De forma paralela a los desarrollos tecnológicos, la informática se constituye en una ciencia soporte para prácticamente todo tipo de investigación y consecuentemente también para el estudio del aprovechamiento tecnológico de las energías renovables. Actualmente hay una gran cantidad de programas informáticos que se utilizan para la evaluación, cálculo y diseño de sistemas para la generación de energía a través de la radiación solar. Entre los más usados podemos mencionar: System Advisor Model (SAM), TRNSys y PVSyst.

El programa SAM (SAM, 2020; Blair et al., 2014) permite llevar adelante gran cantidad de cálculos relacionados con sistemas que se usan para producir energías a través de las energías renovables. Se pueden simular con este software sistemas fotovoltaicos, de concentración solar y eólicos entre otros. Cuenta con una gran cantidad de opciones de uso y muestra como salida un extenso volumen de información. Para su utilización, permite elegir entre algunos modelos de equipos comerciales y en razón de esta elección se ajustan los parámetros o valores para la simulación. Muchos de los valores se encuentran puestos por defecto. Tiene algunas restricciones en este sentido, solo se pueden simular equipos comerciales y predefinidos que ya vienen para ser utilizados por defecto por el programa, algunos valores de ingreso no dan todas las opciones sino solo las que los diseñadores del software definieron. Utiliza además para los cálculos una planilla Excel con gran cantidad de información y del mismo modo genera una gran cantidad de gráficos.

TRNSys (Almeida et al., 2014; Remlaoui et al., 2018) es un software de simulación energética, que sirve para el cálculo de los llamados procesos transitorios o cambiantes en los sistemas. Es capaz de evaluar además de la generación de energía, diferentes tipos de procesos como ser tráfico de vehículos y procesos de tipo biológico. TRNSys está constituido de dos partes. La primera parte es un motor (llamado kernel) que lee y procesa los archivos de entrada, resuelve iterativamente, determina las convergencias y grafica las variables del sistema. También entrega otras utilidades. La segunda parte es una biblioteca de componentes que modelan el rendimiento de una parte del sistema cada uno. Permite el agregado de componentes propios a quienes tengan experiencia en programación o codificación y en la construcción de algoritmos. Estos algoritmos se pueden agregar luego como parte del software TRNSys, para ello es necesario contar con conocimientos básicos en los lenguajes de programación C++, Delfi y Fortran. Esta característica significa que este programa cambiara de versión a medida que se le agreguen componentes. Se utiliza para Simulación de Edificios, Geotermia, Sistemas Solares y Eólicos entre varios más.

En un contexto regional, en Argentina no existen proyectos finalizados con respecto a energía solar térmica de concentración, mas allá de los proyectos realizados por el Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO), principalmente sistemas de concentración cilindroparabólico, heliostatos de concentración y Fresnel lineal (Dellicompagni y Franco, 2019; Placco et al., 2019;) y el Laboratorio de Óptica, Calibraciones y Ensayos (LOCE), basados en tecnología cilindroparabólica y disco parabólica (Panaroni et al., 2017, Panaroni et al., 2020). Por otro lado, empresas de referencia nacional, cómo Jujuy Energía Minería S. E. (JEMSE) e INVAP llevaron adelante estudios de factibilidad para instalar una planta solar de torre central híbrida fotovoltaica en la Puna jujeña con vistas de diseño, construcción y comercialización en el mercado nacional con proyección de competencia internacional (JEMSE, 2021). El interés por las tecnologías de concentración solar se ve reflejado tanto en el sector académico cómo en el sector privado que, si bien no ha alcanzado un grado de madurez nacional relativamente alto, sigue a la tendencia global hacia la inserción de estas tecnologías en diferentes ámbitos como ser residencial e industrial, para el abastecimiento de calor de climatización y procesos (IEA, 2023). De lo precedente, resulta necesario contar con herramientas de calculo y prediseño que se adapte a la necesidad de conocer las posibilidades de abastecimiento de energía térmica en el sector productivo y residencial, y que a la vez sean de fácil uso en conjunción con el diseño sencillo en su arquitectura, pero de alta confiabilidad en cuanto a los resultados.

En el presente trabajo se muestran las características de un software de cálculo y prediseño de sistemas de concentración solar cilindroparabólico, y que tiene como objetivo servir a los usuarios como una herramienta más a las que ya están en uso. En este estado de desarrollo, el software se emplea para calcular la potencia térmica, la energía térmica, la temperatura y la presión que puede producir como salida un concentrador cilindroparabólico. El programa pretende ser un poco más flexible que otros softwares que se utilizan en el campo de energía solar, con el fin de que se puedan ingresar valores de prueba, prácticamente sin restricción y que no esté sujeto solo a equipos predeterminados. Se presentan en este trabajo las consideraciones que se tomaron en cuenta para realizar el desarrollo del software, las pruebas, los datos que se utilizaron y se muestran los resultados y las conclusiones a las que se arribaron.

METODOLOGIA

En primer lugar, se definió el modelo termofísico con el cual se trabajó, seleccionando las variables de entradas necesarias en función de los resultados a los cuales se desea arribar. Se plantearon la ecuación general de balance energético, cómo así la determinación de las variables solares siguiendo las ecuaciones de geometría solar descritas en la bibliografía. Seguidamente, se optó por desarrollar el software en un contorno web que permitiera trabajar directamente en línea sin necesidad de instalar ninguna herramienta adicional en el computador. Para ello se emplearon lenguajes cómo HTLM, PHP y CSS. Se corre el programa en dos oportunidades. La primera a modo de validación cotejando los resultados numéricos con mediciones experimentales. La segunda, se plantean dos escenarios de generación de energía térmica para dos caudales fijos.

Variables para el calculo

Se determinaron las variables físicas que intervienen en el proceso de captación de energía solar por medio de un concentrador cilindroparabólico. En este orden, determinar el modelo termodinámico de un concentrador cilindroparabólico requiere contar con un balance energético (Ec. 1) del sistema formado por el concentrador solar propiamente dicho y el tubo absorbedor. Se tiene que el calor útil aprovechable resulta de descontar a la ganancia solar las pérdidas hacia el ambiente.

$$\dot{m} * C_p * (T_s - T_e) = \eta * DNI * A_{con} * K(\theta) - U * A_{abs} * (T_s - T_a) \quad (1)$$

Donde:

- \dot{m} : Flujo másico, kg/s.
- C_p : Calor Especifico, J/kg °C.
- T_s : Temperatura de salida, °C.
- T_e : Temperatura de entrada, °C.
- η : Eficiencia óptica, adimensional.
- DNI: Irradiancia normal directa, W/m².
- A_{con} : Área concentrador, m².
- $K(\theta)$: Modificador del ángulo de incidencia, adimensional.
- U : Coeficiente global de pérdidas, W/°Cm².
- A_{abs} : Área absorbedor, m².
- T_a : Temperatura ambiente, °C.

La Fig. 1 muestra el esquema general de un concentrador cilindroparabólico adoptado para la determinación del calor útil (potencia térmica) según la Ec. 1. El fluido ingresa al absorbedor con una temperatura T_e y egresa del mismo con T_s . El caudal másico \dot{m} puede ser fijo o variable. No obstante, en el presente trabajo se considera fijo. Por otro lado, el ángulo de incidencia solar θ se lo determina mediante las ecuaciones de geometría solar establecidas en Duffie y Beckman (2013) y Berman et al. (2011), cómo así también la inclinación β que depende fundamentalmente de la altura solar proyectada en el plano N-S. La orientación del concentrador, es decir el ángulo azimutal γ es de 180°, orientado hacia el norte.

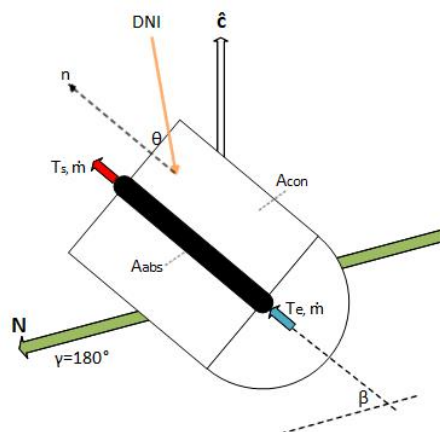


Figura 1: Esquema de concentrador solar cilindro-parabólico.

Descripción del software

El software tiene como objetivo principal servir de apoyo o de soporte a las tecnologías de concentración solar, permitiendo generar resultados útiles con respecto al desempeño de estos sistemas. Brinda la posibilidad de poder comparar distintos resultados de acuerdo a diferentes datos de entrada sin la necesidad de tener que contar para ello con el dispositivo físico de concentración solar. Representa, asimismo, una significativa ventaja al momento de diseñar una planta de generación de energía por concentración solar, ya que con solo ingresar los valores o parámetros convenientes se podrán tener los resultados representativos del desempeño de los equipos que se pretendan usar y el tamaño necesario que deberán tener los mismos.

El programa informático que se codificó para probar el desempeño de un concentrador cilindroparábólico se hizo utilizando lenguajes de programación de alto nivel y del lado del servidor. Esto último significa que el programa no corre directamente en la PC personal del usuario sino en un servidor remoto. A este servidor se accede por medio de internet y desde cualquier lugar físico siempre que haya conexión a la red y se cuente con una computadora (o cualquier otro dispositivo con conexión a Internet) para tal fin. Se hizo de esta forma porque se pensó en un software con las características de una página web que estuviera al alcance de cualquiera que lo necesitara. En este sentido los lenguajes principales sobre los que se construyó el programa fueron: HTML, PHP y CSS.

HTML es el marco de una página web, se denomina lenguaje de hipertextos, común para todo sitio web, siendo éste el marco empleado por excelencia. En PHP se desarrollaron los algoritmos que se necesitan para mostrar los resultados térmicos de un colector cilindroparábólico. Existen otras herramientas como ser Python, Java, Ruby, pero se optó por PHP dada su facilidad de implementación a los fines del software aquí presentado. Además, PHP es un lenguaje exclusivo para su uso en servidores, mientras que Python y demás se emplean mayormente del lado “cliente”. CSS (del inglés hoja de estilo en cascada) es un complemento de HTML y permite, mediante múltiples opciones gráficas y de diseño, ajustar el diseño del software generando una interfaz conveniente. Tanto HTML, PHP y CSS son de código abierto. Para la generación de los gráficos se utilizó la librería gráfica `chart.js`, esta es una librería desarrollada en JavaScript. Es muy práctica y es de código abierto, posee innumerables tipos de gráficas y de opciones de programación para incluir en cualquier proyecto donde se necesite contar con gráficos. También fue necesario contar con `PhpSpreadSheet`, que es también una biblioteca de código abierto, que incluye un conjunto de clases que permiten interactuar y utilizar varios formatos de archivo de hoja de cálculo como Excel de Microsoft. Una clase es una característica de los lenguajes de programación orientada a objeto, en este tipo de lenguajes todo lo que constituye el mundo real es un objeto (ya sea físico o conceptual). Un objeto tiene sus propias características: nombre, atributos y comportamiento. Un objeto se crea a instancias de una clase. Es decir, cuando se programa orientado a objeto, primero se declara una clase (con nombre, atributos y comportamiento) y luego se crea (si se necesita) un objeto de esa clase. Es decir, un objeto es una instancia de alguna clase que hereda todas las características de la clase (de la cual es una instancia).

El desarrollo del programa incorpora las ecuaciones relativas a la geometría solar (Duffie and Beckman, 2013) para realizar los cálculos de la posición del sol en determinadas horas coincidentes con las horas de control de la irradiancia normal directa incidiendo sobre el plano de apertura del concentrador cilindroparábólico. El software en esta fase está conformado por cuatro páginas dependientes una de la otra de dos en dos. La primera es la encargada de presentar la interfaz de inicio al usuario, donde se ingresará la información que se solicita para su procesamiento. Un formulario HTML, conformado por distintas opciones de ingreso de información, es el encargado de recibir y transferir los datos de entrada a los algoritmos que se encuentran en la segunda página que es la encargada de procesar los datos. El software presenta en esta etapa, dos opciones de cálculo: 1) Realizar los cálculos usando información y datos recolectados en un día en particular y 2) Realizar los cálculos usando información y datos recolectados en un mes completo en particular. En el primero de los casos desarrollado se solicita elegir el mes y el día. Estos datos de día y mes son necesarios para el cálculo del ángulo de declinación (δ) del sol, lo que posteriormente será utilizado para el cálculo del ángulo de incidencia (θ) de los rayos solares sobre la superficie dada y finalmente de esta manera se determina el índice modificador del ángulo de incidencia $K(\theta)$. La Fig. 2 muestra los formularios de datos de entrada para el cálculo de un día de generación térmica y para un mes completo.

Figura 2: Formulario web para el ingreso de datos de entrada. Izq.: para un único día de cálculo. Der.: para un mes completo. Para ambos formularios, el caudal másico puede ser seteado como constante (para lo cual el usuario deberá definir su valor), o bien como variable, para lo cual se deberá incorporar los datos horarios de caudal en la planilla Excel.

La solicitud de ingreso de la información de la localidad es en razón de que a ese sitio corresponderán los datos de irradiancia normal directa, temperatura ambiente, caudal másico y hora a la que se tomaron los datos para ser procesados por los algoritmos. Como los datos ingresados de hora corresponden a la hora reloj y los ángulos de la geometría solar están relacionados con la hora solar, corresponde hacer un ajuste entre ambas horas. Para ello y para saber cuan desfasados se hallan la hora reloj y la hora solar se utiliza el algoritmo de la Ec. 2 que relaciona ambas horas (Duffie and Beckman, 2013; Berman et al., 2011).

$$HSE = HSL - 4 * (L_s - L_e) - E_t \quad (2)$$

Donde:

HSE: Hora solar estándar, horas decimales.

HSL: Hora solar local, horas decimales.

L_s : Longitud del meridiano estándar, grados decimales.

L_e : Longitud del meridiano del lugar, grados decimales.

E_t : Ecuación del tiempo, horas decimales.

Un algoritmo calcula la ecuación del tiempo teniendo en cuenta entre otras cosas el número de orden del día del año, y con este dato finalmente se determina el tiempo que hay de diferencia entre la hora solar y la hora reloj. Entonces el programa determina el ángulo horario a la puesta del sol (Ec. 3).

$$\cos\omega_s = (-\sin\delta * \sin\Phi) / (\cos\delta * \cos\Phi) \quad (3)$$

Siendo δ la declinación solar y Φ la latitud. Luego se determina la hora de puesta del sol (Ec. 4).

$$h_{ps} = 12 + \omega_s / 15 \quad (4)$$

A la hora de puesta del sol el programa adiciona la diferencia encontrada anteriormente cuando se calcula la relación entre la hora reloj y la hora solar y así se obtiene la hora reloj de puesta del sol y también se determina el ángulo horario de puesta del sol a esa hora. De esta forma el software creado lleva adelante todos los cálculos necesarios para finalmente dar como salida la potencia térmica generada por un concentrador cilindroparabólico de forma horaria. Para ello el siguiente paso es conocer la hora de salida del sol mediante la Ec. 5.

$$h_{ss} = 12 - \omega_s/15 \quad (5)$$

También aquí el código del programa suma la diferencia mencionada en los párrafos anteriores a la hora de salida del sol calculada y de esta manera se tiene la hora reloj de salida del sol. Luego, el algoritmo lleva la hora de puesta del sol a su valor entero menor más cercano y la hora de salida del sol a su valor entero mayor más cercano. Esto se hace necesario porque las mediciones de irradiancia normal directa solar se toman a horas enteras y porque no se conoce cuantas horas de medición por día serán necesario procesar. Por eso se determina la hora entera de puesta del sol y la hora entera de salida del sol más próxima a su valor real.

Haciendo retroceder la hora (entera) de puesta del sol iterativamente, restándole el valor 1 hasta que coincida con la hora (entera) de salida del sol y a su vez restando iterativamente al ángulo de puesta del sol el valor 15, finalmente tenemos la hora reloj de salida del sol junto con el ángulo horario del sol a esa hora (hora entera). El código posee en su estructura un algoritmo mediante el cual se determinan los ángulos horarios para cada hora correspondiente a la medición de irradiancia normal directa que se ingresó para su procesamiento. El archivo Excel al que se hace mención en el formulario de ingreso de datos, debe contener la información de la hora a la que se midió la DNI, los datos de la DNI medidas y la temperatura ambiente y el caudal másico a las mismas horas. Con estos datos el programa procederá a calcular el desempeño de un concentrador cilindroparabólico. El programa se ejecutará sin ningún tipo de restricciones, solo es necesario ingresar los valores que se deseen probar, estos valores son factibles de cambio libremente y el software mostrará los resultados del desempeño del sistema de concentración solar.

Para el caso de cálculo mensual se utiliza un formulario de ingreso similar al que se mostró en la Fig. 1. Ya no se pide que se indique el día puesto que se realizan los cálculos para todo el mes, también en este caso los valores de ingreso no están sujetos a ningún tipo de condición, salvo la coherencia que deben tener los valores de prueba a fin de obtener resultados razonables.

En cuanto a la determinación de la presión de salida, el programa calcula en primer lugar la temperatura de ebullición en razón de la altura sobre el nivel del mar (asnm), con la Ec. 6 (Negret, 1986; Güemez et al., 2002).

$$T_e = -0,0034 * (asnm) + 99,884 \quad (6)$$

Luego la presión atmosférica se determina con la Ec. 7.

$$P_a = -0,0001 * (asnm) + 0,9967 \quad (7)$$

Las Ecs. 6 y 7 fueron generadas mediante regresiones lineales a partir de las dependencias con la altura sobre el nivel del mar tanto de la temperatura de ebullición como la presión atmosférica. Si la temperatura de salida (T_s) es igual o menor a la temperatura de ebullición previamente calculada, entonces la presión de salida (P_s) es igual a la presión atmosférica, en bar. Si la temperatura de salida (T_s) es mayor a la temperatura de ebullición previamente calculada, entonces la presión de salida (P_s) se calcula con la Ec. 8, que es un polinomio de sexto orden confeccionado a partir de las tablas de vapor de agua saturado.

$$P_s = 2 \times 10^{-14} (T_s)^6 - 2 \times 10^{-11} (T_s)^5 + 2 \times 10^{-8} (T_s)^4 - 2 \times 10^{-6} (T_s)^3 + 3 \times 10^{-4} (T_s)^2 - 6.2 \times 10^{-4} (T_s) + 0,0538 \quad (8)$$

Por último, se emplea la Ec. 9 para determinar el índice modificador del ángulo de incidencia θ (Balado, 2011).

$$K(\theta) = \cos(\theta) - (2,859621 * 10^{-5} * \theta^2) - (5,25097 * 10^{-4} * \theta) \quad (9)$$

Datos utilizados para la validación del software

Para la validación experimental del modelo aquí propuesto se empleó un concentrador cilindroparabólico cuyo absorbedor presenta una longitud de 6 m y un área de apertura de 11 m² (Fig. 3). El mismo se construyó en el campus experimental del INENCO de la Universidad Nacional de Salta. Orientado hacia el norte y con seguimiento solar en la dirección de la altura solar, es decir, con eje Este-Oeste. El caudal másico de ingreso fue variable dado que el equipo se conecta directamente a la red.



Figura 3: Equipo concentrador cilindroparabólico tomado como caso de estudio. Superficie reflectora de aluminio pulido espejo, absorbedor metálico y cubierta transparente de borosilicato.

La información que se requiere para correr el programa y comprobar su desempeño es la referida a la ubicación geográfica de la localidad, como así también otros datos con respecto al tamaño del sistema cilindroparabólico y datos específicos de operación, que son ingresados en el formulario de entrada de la Fig. 2 (izq.). A continuación, se listan los valores de los parámetros de prueba.

- a. Área de apertura del concentrador $A_{con} = 11 \text{ m}^2$.
- b. Área del absorbedor $A_{abs} = 0.623 \text{ m}^2$.
- c. Eficiencia óptica $\eta = 0.4$.
- d. El coeficiente de pérdidas del tubo absorbedor $U = 50 \text{ W m}^2\text{°C}$.
- e. Angulo azimut: 180° .
- f. Temperatura de entrada: 25°C .
- g. Calor específico: $4185 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$.
- h. Flujo másico: configurado cómo variable.

El valor correspondiente al coeficiente de perdidas U es un valor tomado de manera aleatoria, que no corresponde a absorbedores comerciales específicos, sino más bien a concentradores de una fabricación no seriada. Este valor debe ser encontrado de forma experimental, en argentina no existe un mercado de concentradores cilindroparabólicos actualmente (Dellicompagni et al., 2019).

La localidad corresponde a Salta, cuyas coordenadas son latitud -24.7286 y longitud -65.4095 . Se realizó el ensayo del equipo, con condiciones de cielo claro el día 11/9/23. Los resultados experimentales y simulados se sintetizan en la Tabla 1, con los respectivos coeficientes de determinación para la temperatura de salida y la potencia térmica desarrollada. Cabe mencionar que se tomaron 3 puntos de medición una vez pasado el régimen transitorio de arranque y calentamiento del equipo, abarcando la franja horaria alrededor del medio día solar. Las temperaturas de entrada, salida y ambiente se midieron empleando termocuplas tipo k, cuyas señales se registraron mediante un datalogger Digisense® de doce canales (error de medición: 0.1°C). El caudal másico se midió con un caudalímetro Arduino tipo turbina modelo YF-S401 y su señal se procesó mediante una placa Arduino UNO (error de medición: 10^{-3} kg/s).

los valores de DNI se obtuvieron mediante un pirheliómetro Kipp & Zonen CHP1 (error de medición: 2%). Si bien se tomaron mediciones puntuales, los coeficientes de determinación fueron superiores al 90% comparando los valores de temperatura de salida y potencia térmica.

Tabla 1: Comparación entre valores medidos y simulados de temperatura de salida y potencia térmica.

| | Variables medidas | | | | | | Variables simuladas | |
|------|-------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------------|---------------------|--------|
| hora | \dot{m} (kg/s) | DNI (W/m ²) | Ta (°C) | Te (°C) | Ts (°C) | Qs (W) | Ts (°C) | Qs (W) |
| 12 | 0.004 | 969.9 | 29.2 | 27.6 | 110.9 | 1353 | 98.5 | 1316 |
| 13 | 0.013 | 974.5 | 32.2 | 25.0 | 80.70 | 2759 | 74.0 | 2728 |
| 14 | 0.006 | 956.6 | 37.0 | 28.1 | 106.80 | 1927 | 103.3 | 1947 |
| | | | | | | R ² | 92.4% | 99.8% |

Consideraciones de la prueba

En este punto es necesario tener en cuenta las condiciones de operación para la prueba del programa desarrollado. En primer lugar y como los datos de ingreso no tienen restricciones, se corre el software con valores que no representan específicamente a algún sistema comercial en particular. Los datos de las características del sistema concentrador no están tomados de manera predeterminada de ninguna planta de energía solar ni de ningún equipo de concentración solar, es decir, no se pensó en ningún equipo concentrador solar conocido previamente. En esta etapa se simula sin restricciones en cuanto a determinados sistemas de concentración para demostrar la versatilidad y flexibilidad del programa en cuanto a su ejecución.

La localidad elegida para correr el programa es General Güemes en la provincia de Salta, Argentina. Esta localidad tiene como coordenadas geográficas: Latitud -24.6682 y Longitud 65.0482. Los datos de DNI con los cuales se simuló corresponden al mes de enero del 2021 habiéndose obtenido los datos climáticos del sitio Climate.OneBuilding.Org. De esta página se pueden descargar datos del clima de algunos sitios, pero se puede utilizar cualquier página que sirva para este fin, o bien emplear datos medidos existentes. En particular y en este caso a la información que se descarga hay que transformarla al formato CSV (valores separados por coma) para de esta forma poder editarla como un archivo Excel. En realidad, el archivo comprimido que se descarga de Climate.OneBuilding.Org contiene una gran cantidad de información, para la finalidad del uso del software solo interesan, para calcular el desempeño térmico por día, la hora, el valor de DNI y de temperatura ambiente. En caso de que se quiera calcular un mes completo se deben agregar a los datos también el día del mes de cálculo, es decir la fecha

Con esta información se crea un archivo simple, no siendo necesaria la primera fila el nombre de los datos, conteniendo la primera columna la hora, en la segunda columna la temperatura ambiente, en la tercera columna los datos de DNI y en la cuarta columna los datos de caudal. Si se trata de un mes completo en la primera columna debe incluirse el día del mes. El programa se probó utilizando como fluido caloportador agua, cuyo calor específico se considera igual a 4185 J/Kg °C. También se debe hacer mención que el sistema de concentrador cilindroparabólico está orientado mirando al norte, desde el hemisferio sur, y solo tendrá seguimiento en un eje, es decir, solo seguirá la posición del sol en altura. Pero también es factible que se oriente mirando al sur desde el hemisferio norte o darle cualquier otra orientación, ya que al ángulo azimut es un parámetro de entrada en el programa y como tal puede hacerse variar.

RESULTADOS

En primer término, se corrió el programa con datos para la localidad de General Güemes de la provincia de Salta, que se tomaron el día 19 de enero del año 2021. Se utilizó para la simulación una temperatura de entrada 30°C, apertura de 60 m², área de absorbedor 4.5 m², eficiencia óptica 0.8 y caudal constante. Con respecto a esto último, se hicieron dos simulaciones para dos caudales diferentes: 0.01 kg/s y 0.05 kg/s (Tablas 2 y 3).

Tabla 2: resultados horarios de la simulación con agua como fluido caloportador y caudal másico de 0.01 kg/s, para el día 19/1/2021.

| Hora | T. salida (°C) | P. térmica (W) | E. térmica (kWh) | Presión (bar) |
|------|----------------|----------------|------------------|---------------|
| 9 | -10.42 | -1691 | -1.69 | 0.93 |
| 10 | 62.01 | 1339 | 1.34 | 0.93 |
| 11 | 133.44 | 4327 | 4.33 | 3.05 |
| 12 | 184.28 | 6455 | 6.46 | 9.92 |
| 13 | 205.96 | 7362 | 7.36 | 15.4 |
| 14 | 175.29 | 6078 | 6.08 | 8.18 |
| 15 | 112.85 | 3466 | 3.47 | 1.78 |
| 16 | 72.47 | 1776 | 1.78 | 0.93 |
| 17 | 48.28 | 764 | 0.76 | 0.93 |
| 18 | 14.46 | -650 | -0.65 | 0.93 |

Tabla 3: resultados horarios de la simulación con agua como fluido caloportador y caudal másico de 0.05 kg/s, para el día 19/1/2021.

| Hora | T. salida (°C) | P. térmica (W) | E. térmica (kWh) | Presión (bar) |
|------|----------------|----------------|------------------|---------------|
| 9 | 5.11 | -5206 | -5.21 | 0.93 |
| 10 | 49.71 | 4123 | 4.12 | 0.93 |
| 11 | 93.69 | 13323 | 13.32 | 0.93 |
| 12 | 125 | 19874 | 19.87 | 2.46 |
| 13 | 138.35 | 22666 | 22.67 | 3.45 |
| 14 | 119.46 | 18715 | 18.72 | 2.12 |
| 15 | 81.02 | 10673 | 10.67 | 0.93 |
| 16 | 56.15 | 5470 | 5.47 | 0.93 |
| 17 | 41.26 | 2355 | 2.36 | 0.93 |
| 18 | 20.43 | -2002 | -2.00 | 0.93 |

Asimismo, el programa de simulación arroja gráficos correspondientes a las variables de salida. Los resultados que se obtuvieron para la potencia térmica generada utilizando agua como fluido caloportador y un flujo másico de 0.01 kg/s y 0.05 kg/s, se muestran en la Fig. 4.

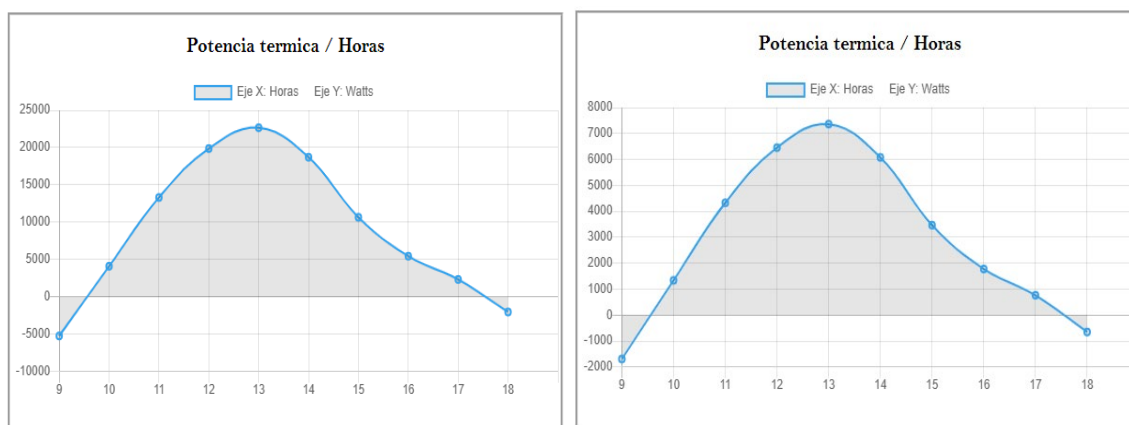


Figura 4: Potencia térmica para el día 19/1/21, con agua como fluido caloportador y caudal másico de 0.01 kg/s (izq.) y 0.05 kg/s (der.).

Luego se realizó otra prueba utilizando datos correspondientes a la misma localidad de General Güemes, pero para el mes de febrero del año 2021. La temperatura de entrada utilizada es de 20°C. Los datos correspondientes al mes de febrero fueron tomados entre las 10:00 horas y las 14:00, es decir que se tomaron cinco datos por día, definiendo así un rango horario de trabajo fijo. La Fig. 5 muestra como presenta la interfaz del programa los resultados numéricos de la simulación, para un flujo másico de 0.01 kg/s, mientras que las Figs. 6 y 7 muestran específicamente la potencia térmica generada durante todo el mes, para caudal másico de 0.01 kg/s y 0.05 kg/s, respectivamente.

| DIA | HORA | T SAL (°C) | P TERM (W) | E TERM (kWh) | PRESION (bar) |
|-----|------|------------|------------|--------------|---------------|
| 1 | 10 | 43.96 | 1002 | 1 | 0.93 |
| 1 | 11 | 80.56 | 2533 | 2.53 | 0.93 |
| 1 | 12 | 106.59 | 3622 | 3.62 | 1.5 |
| 1 | 13 | 113.5 | 3912 | 3.91 | 1.81 |
| 1 | 14 | 66.92 | 1963 | 1.96 | 0.93 |
| 2 | 10 | 27.11 | 297 | 0.3 | 0.93 |
| 2 | 11 | 46.17 | 1094 | 1.09 | 0.93 |
| 2 | 12 | 68.61 | 2033 | 2.03 | 0.93 |
| 2 | 13 | 71.82 | 2168 | 2.17 | 0.93 |
| 2 | 14 | 82.33 | 2607 | 2.61 | 0.93 |
| 3 | 10 | 42.07 | 923 | 0.92 | 0.93 |
| 3 | 11 | 80.78 | 2543 | 2.54 | 0.93 |
| 3 | 12 | 119.13 | 4147 | 4.15 | 2.11 |
| 3 | 13 | 134.55 | 4792 | 4.79 | 3.13 |
| 3 | 14 | 86.73 | 2791 | 2.79 | 0.93 |
| 4 | 10 | 51.78 | 1329 | 1.33 | 0.93 |

Figura 5: Resultados de desempeño térmico para febrero de 2023.

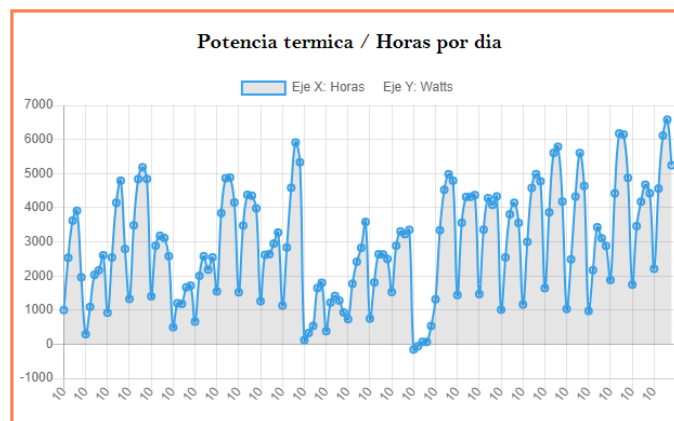


Figura 6: Resultados de potencia térmica para febrero de 2023. caudal másico de 0.01 kg/s.

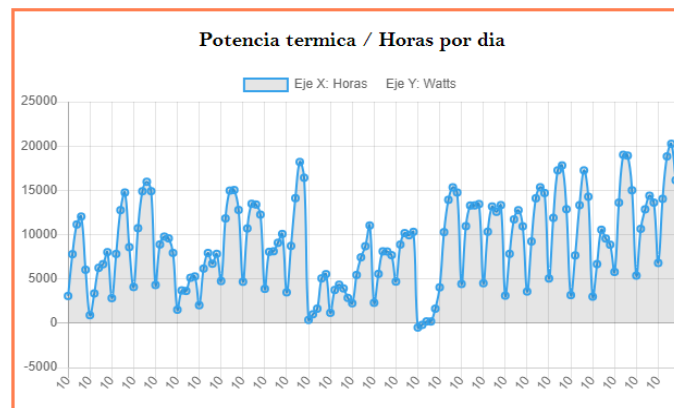


Figura 7: Resultados de potencia térmica para febrero de 2023. caudal másico de 0.05 kg/s.

Estas corridas del programa utilizando datos tomados durante todo un mes. generan gráficas que presentan en el eje x el valor correspondiente a la primera hora en que se tomó el dato. en nuestro caso la primera hora en que se registraron los datos del día es la hora 10:00. Cada valor 10 representa un día y cada nodo sobre la línea del grafico representa la hora siguiente de toma de datos 10. 11. 12. 13. 14 y luego el siguiente valor 10 es la primera hora de toma de datos del día siguiente. Es decir que el primer valor 10. es el día 1. y el ultimo valor 10 es el día 28.

Se observa que los máximos valores de temperatura de salida, potencia térmica y vapor de salida se consiguieron generalmente a las 13:00 horas, esto coincide con la hora 12 solar, es decir cuando el sol se encuentra en su mayor altura. En los casos que se simuló un día de datos. cuando se utilizó un flujo másico de 0.01 kg/s se obtuvo la temperatura de salida igual a 205.96 °C, la potencia térmica igual a 7632 W y la presión igual a 1.4 bar. Cuando se aumentó el flujo másico igual a 0.05 kg/s la temperatura de salida generada fue de 138.35 °C, la potencia térmica igual a 22666 W y la presión igual a 3.45 bar.

Cuando se simuló con datos de un mes completo, también se muestran en los gráficos, que para el caso del flujo másico igual 0.01 kg/s la potencia térmica está en el orden de casi 7000 W, pero cuando se incrementó el flujo másico a 0.05 kg/s la potencia térmica supera los 20000 W.

CONCLUSIONES

Las simulaciones de la performance térmica de un concentrador cilindroparabólico con el software que se describe en este artículo cumplieron con el objetivo en cuanto a su versatilidad y flexibilidad. El programa puede generar resultados diversos, no estando restringido al cálculo de una variable única. Es confiable ya que no presenta como resultado ningún valor que se pueda considerar anómalo, pues los resultados numéricos son producto de los parámetros que se ingresan y del procesamiento que de ellos hacen los algoritmos. También resulta flexible, puesto que admite cualquier valor siempre que tenga que ver con la materia que se está tratando.

Para una simulación de un día, se observa que, cuando se aumenta el flujo másico:

- 1) En general disminuye la temperatura de salida.
- 2) En general aumenta la potencia térmica.
- 3) Disminuye la presión.

Similar comportamiento se observa cuando la simulación se realiza para un mes completo. Los resultados a los que se arriban sirven para tomar las decisiones a la hora de definir bajo qué condiciones un sistema de concentración solar debe trabajar, de manera de conseguir la mejor prestación posible dentro de los límites reales de funcionamiento. En estas simulaciones solo se hizo variar un parámetro de entrada (caudal másico), siendo posible otras combinaciones como ser utilizando distintas áreas de superficie concentradora o de superficie absorbidora. De esta forma cambiando distintos parámetros de ingreso como por ejemplo el coeficiente global de pérdida, la eficiencia óptica, etc., se pueden obtener diferentes resultados que son materia de análisis en busca de una mayor eficiencia del sistema.

El programa tiene una característica muy valiosa y de gran practicidad y ayuda para la investigación. Se pueden realizar las todas las pruebas que se necesiten llevar adelante y hacerlos con los valores de entrada que se requieran. A futuro, estará disponible como una página web para quien la necesite, no siendo necesaria su descarga y/o instalación. Solo será necesario emplear el dispositivo conectado a internet, colocar la dirección URL en el navegador y contar con un archivo Excel con los datos a procesar. Se podrán obtener los resultados de múltiples combinaciones de parámetros de entrada para los casos de tomas de decisiones.

Por último, y también de carácter de trabajo futuro, se seguirá en el desarrollo y ajuste de los modelos y algoritmos mediante validación experimental exhaustiva. Para ello, en el INENCO se dispone de un concentrador cilindroparabólico de 6 m de largo con área de apertura de aproximadamente 11 m², correspondiente a un proyecto del tipo PICT denominado *Generación de energía térmica con tecnología de concentración solar cilindro parabólica para procesos industriales en la región NOA*. La validación realizada hasta el momento se encuentra en su fase inicial, por lo que esto podría representar una limitación no de uso, sino en la confiabilidad de los resultados según el criterio del usuario. Por otro lado, el software no contempla las pérdidas ocasionadas por desenfoque debido a deformaciones en las estructuras como así en las superficies reflectoras de los haces solares.

REFERENCIAS

- Almeida P., Carvalho M. J., Amorim R., Mendes J. F., Lopes V. (2014). Dynamic testing of systems – Use of TRNSYS as an approach for parameter identification. *Solar Energy* Volume 104. Pages 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.010>.
- Balado E. (2011). Prototipo de campo de colectores solares cilindro-parabólicos para generación de calor a alta temperatura. Proyecto final de carrera Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/12857>.

- Berman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P. and Dewitt D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. Jhon Wiley and Sons. 2011. ISBN 13 978-0470-50197-9.
- Blair N., Dobos A., Freeman J., Neises T., Wagner M., Ferguson T., Gilman P., Janzou S. (2014). System Advisor Model. SAM 2014.1.14: General Description. NREL/TP-6A20-61019. National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. www.nrel.gov/docs/fy14osti/61019.pdf.
- Dellicompagni P., Franco J. (2019). Potential uses of a prototype linear Fresnel concentration system. *Renewable Energy*. Volume 136, Pages 1044-1054. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.005>.
- Dellicompagni P., Franco J., Flexer V. (2019). CO2 Emission Reduction by Integrating Concentrating Solar Power into Lithium Mining. *Energy Fuels* 2021. 35. 19. 15879–15893. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01951>.
- Duffie, J. A. y Beckman W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.
- Güemez J., Fiolhais C., Fiolhais M. Revisiting Black's experiments on the latent heats of water. *The Physics Teacher* Vol 40. January 2002. pp. 26-31. <http://dx.doi.org/10.1119/1.1457825>.
- International Energy Agency – IEA. (2023). *Renewable Energy Market Update. Outlook for 2023 and 2024*. Reporte accesible en www.iea.org. Ultimo acceso: 30 de marzo de 2023.
- JEMSE. (2021). Artículo: JEMSE proyecta construir y vender usinas híbridas con INVAP. Disponible en <https://jemse.gob.ar/2021/04/29/jemse-proyecta-construir-y-vender-usinas-hibridas-con-invap/>, ultimo acceso: 30 de marzo de 2023.
- Negret J. P. Boiling Water and the Height of Mountains. *The Physics Teacher*. May 1986. pp. 290-292. <http://dx.doi.org/10.1119/1.2342018>.
- Panaroni D., Castro Luna A., Martorelli L. (2020). Obtención de la eficiencia óptica de un disco parabólico mediante método SHOT modificado. *AJEA – Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTNV. Jornadas de Intercambio y Difusión de los Resultados de Investigaciones de los Doctorandos en Ingeniería*. ISBN: 978-950-42-0200-4. <https://doi.org/10.33414/ajea.5.684.2020>.
- Panaroni D., Mujica M., Abal Matos M., Corujo L., Cervini F., Castro Luna A., Martorelli L. (2017). Diseño óptico de un colector cilíndrico parabólico inclinado para generación directa de vapor. IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017.
- Placco C., Gea M., Casimiro R., Hongn M., Fernández C., Suligoy H., Lacuadra D. (2019). Construcción y ensayos de un helióstato de foco lineal para un horno solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 23, pp 02.45-02.56, 2019. ISSN 2314-1433.
- PVsyst (Photovoltaic software). Dirección URL: <https://www.pvsyst.com> [consulta: mayo 2023]
- Remlaoui A., Nehari D., Elmeriah A. (2018). A TRNSYS dynamic simulation model for a concentrating Solar Power Plant (CSP). JSDD 201. 1ère Journée des Structures et Développement Durable. Tissemsilt.
- Repositorio de datos climáticos gratuitos para la simulación del rendimiento de edificios. De los creadores de EPW. Dirección URL: <https://climate.onebuilding.org/> [consulta: mayo 2023].
- System Advisor Model Version 2020.11.29 (SAM 2020.11.29). National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. sam.nrel.gov. [consulta: mayo 2023].

SOFTWARE FOR THE STUDY OF THE THERMAL PERFORMANCE OF SOLAR CONCENTRATION SYSTEMS

ABSTRACT: A numerical tool was developed with the aim of providing a practical option for simulating the behavior of concentrating solar systems, which is flexible enough to be used without major restrictions. This software was created with high level programming languages with web page characteristics. The program processes the entered data using the solar geometry equations corresponding to the energy balance of a solar concentrator system, pressure, outlet temperature, etc. The outputs of the program include the values of thermal power, thermal energy, etc., of the solar concentrator systems. The possibility of combining the input data is the main strength of the software, since it helps to simulate a large number of scenarios, which is a interesting contribution for making-decisions process regarding the characteristics of size, efficiency, heat losses, etc., that a concentrating solar technology must have.

Keywords: solar concentration, numerical simulation, tool, decision making.