

Artículo Original

Software para sistemas de concentración solar: validación experimental

Software for concentrating solar systems: experimental
validation

Hugo Aparicio , *Pablo Dellicompagni , Carlos Cadena 

¹Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO).
Argentina

RESUMEN

Este trabajo presenta avances en el desarrollo de un software de simulación para determinar parámetros termofísicos (Temperatura de salida, Potencia térmica, Energía térmica y Presión) en sistemas de concentración solar, enfocado en el suministro de energía térmica para procesos que requieren calor. La nueva versión incorpora mejoras significativas, como la inclusión de la ganancia solar no concentrada (incidencia directa en el absorbedor) y las pérdidas por no iluminación (*end loss*). Además, se añadió un factor de condensado para cuantificar el fluido no evaporado. La interfaz de usuario se rediseñó, pasando de campos de ingreso verticales a una disposición horizontal más estética, e incluyendo un campo para la orientación del equipo (norte/sur o este/oeste). Para validar el software, se realizaron mediciones experimentales prolongadas durante cinco días de generación, utilizando un concentrador cilindroparabólico de 11 m². Se emplearon modelos de regresión lineal y métricas como RMSE%, MAE% y MAPE%, obteniendo valores aceptables que confirman la utilidad y precisión del software en aplicaciones prácticas.

Palabras clave: concentración solar, simulación numérica, software, validación experimental, calor de proceso.

ABSTRACT

This study presents advancements in the development of simulation software for determining thermophysical parameters in solar concentration systems, focusing on thermal energy supply for heat-driven processes. The new version introduces significant improvements, including the incorporation of non-concentrated solar gain (direct incidence on the absorber) and end-losses (non-illumination losses). Additionally, a condensate factor was added to quantify non-evaporated fluid. The user interface was redesigned, changing the vertical input fields to a horizontal layout. Also, a field for equipment orientation (north/south or east/west) was included. To validate the software, extended experimental measurements were conducted over five days of energy generation using an 11 m² parabolic trough concentrator. Linear regression models were applied, and metrics such as RMSE%, MAE%, and MAPE% were used, yielding acceptable values that confirm the software's accuracy and practical applicability.

Keywords: solar concentration, numeric simulation, software, experimental validation, heat for processes.

***Autor correspondiente:** Pablo Dellicompagni, Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Av. Bolivia 5150. Salta, 4400, Argentina. Email: pablodellcompagni@gmail.com

Fecha de recepción: marzo de 2025. Fecha de aceptación: mayo de 2025

Editora responsable: Graciela María Patricia Velázquez de Saldivar . Universidad del Cono Sur de las Américas, UCSA.



Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons

INTRODUCCIÓN

Desde hace tiempo la informática ha estado colaborando en casi todos los aspectos de la vida de los seres humanos, en tareas de investigación, en tareas de procesamiento de datos, en tareas de diferentes tipos de desarrollo, etc. Y tampoco está ausente en lo que se refiere a energías renovables donde es muy útil el uso de programas computacionales que brindan todo tipo de aporte. En la literatura se proponen diferentes tipos de sistemas de concentración solar que sirven para aprovechar la energía proveniente del sol (Dellicompagni y Franco, 2019). Pero cuando se decide por un tipo de sistemas, el trabajo del desarrollador del sistema informático recién comienza. En casi todos los casos una de las primeras tareas es seleccionar el mejor conjunto de valores de ingreso entre diferentes combinaciones posibles. Es necesario muchas veces el uso de modelos computacionales para investigar las alternativas con las que se cuenta, ya que el costo de la exploración experimental resulta inviable económicamente. El diseño de un sistema de concentración solar consta de diferentes etapas y cada etapa requiere respuesta a preguntas necesarias en ese punto, todo esto también se verá reflejado en el software a desarrollar. Mas allá de si las pruebas experimentales son factibles o no, los buenos programas informáticos de simulación ofrecen un valioso soporte. Se pueden usar para orientar en el diseño, para extrapolar datos, para predecir comportamientos, para analizar los resultados, etc. Para la mayoría de las aplicaciones existe una etapa en la que es necesario contar con una buena comprensión del comportamiento energético y óptico del sistema de concentración solar. En la mayoría de los casos, los programas informáticos específicos sirven para analizar sistemas puntuales, pero que no son aplicables a otras configuraciones ni están disponibles para cualquier usuario (Blanco et al, 2005). Adicionalmente, existen muchos programas de software empleados para determinar los comportamientos de los equipos que trabajan con la energía proveniente del sol, tanto para la generación directa de energía eléctrica como por medio de la concentración solar.

En primer lugar, se pueden mencionar aquellos programas que se basan en el trazado de rayos. El programa Mirval fue uno de los primeros programas diseñados para el trazado de rayos por medio del método de Monte Carlo, se creó para el estudio del rendimiento óptico de heliostatos. Se desarrolló en el laboratorio de Sandia Mirval. Si bien este software ya no se encuentra disponible, su desarrollo constituyó el núcleo de un código llamado Spray basado en Fortran. Spray está disponible comercialmente a través del Instituto de Investigación Solar del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y a través de colaboraciones académicas (Clifford, 2008). Luego, se puede mencionar el software Soltrace, de código abierto, desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL). Simula la trayectoria de un cierto número de rayos entre el sol incidentes sobre un sistema definido y está basado en el algoritmo de trazado de rayos de Monte Carlos (Fan et al., 2018; Zou et al., 2017). Se utiliza para modelar sistemas cilindro parabólicos, Fresnel lineal, discos parabólicos y de torre central. Otro programa disponible en el área de las energías renovables es TONATIUH, también de código abierto y uso libre, y está dirigido al diseño y simulación óptica de sistemas de concentración solar complejos y se basa en el método de Monte Carlo para el trazado de rayos. Está escrito en lenguaje C++ como software multiplataforma y con procesamiento paralelo (Jafrancesco et al, 2018).

Se pueden mencionar otros programas que realizan simulaciones más completas, como por ejemplo, de performance térmico y/o eléctrico, y análisis de otras variables como ser económicas y financieras. Entre los más utilizados está el programa System Advisor Model (SAM) (Blair et al., 2014), también desarrollado por NREL. Este programa abarca un amplio rango en cuanto a la

simulación en energías no convencionales se refiere, que comprende energía eólica, energía fotovoltaica, concentración solar, biomasa, entre otros. En el caso de la energía solar por concentración, SAM simula con respecto a equipos comerciales y cuenta para ello con datos de fábrica y valores por defecto y lo hace de forma horaria, mensual y anual. Es una herramienta de simulación técnica, económica y financiera. Luego, una herramienta para el estudio y el análisis de viabilidad de proyectos de energías renovables es el software RET Screen, desarrollada por el Ministerio de Recursos Naturales de Canadá. La simulación con este programa proporciona una evaluación y optimización de la factibilidad técnica y financiera de potenciales proyectos de energías renovables (Kaddour et al, 2023). Finalmente TRYNSys es una plataforma software que da la posibilidad a los usuarios de diseñar y modelar distintos sistemas transitorios utilizando componentes modulares. Los componentes incluyen colectores solares térmicos, intercambiadores de calor, tanques de almacenamiento térmico, sistemas hidráulicos, controladores etc. Incluye posprocesamiento mediante gráficos e informes. Se desarrolló en la Universidad de Wincosin, Madison (Clifford, 2008).

En la actualidad, las actividades de investigación y desarrollo serían prácticamente imposibles de realizarse sin el soporte informático. Teniendo en cuenta el gran volumen de información y procesamiento de datos que son necesarios llevar a cabo cuando se trata de esta clase de tareas, contar con un programa de computación que procesa la información en una fracción de tiempo es primordial. En este contexto, el software presentado en este trabajo está desarrollado para que pueda ser de utilidad para la toma de decisiones en el diseño de sistemas de concentración solar en cuanto al tamaño y dimensiones propias que se necesite para estos tipos de estos equipos. Entre sus características el programa demostró confiabilidad y flexibilidad, entre otras cosas. En este trabajo se muestran los avances con respecto a la primera versión (Aparicio et al., 2023) abarcando las variables y parámetros que intervienen en el balance de energía de un concentrador solar cilindro parabólico. En cuanto a las particularidades del equipo físico que se quiera simular, acepta cualquier configuración, no tiene que ser necesariamente un equipo comercial. En realidad, el programa está realizado para que se puedan probar y comprobar diferentes medidas y propiedades de equipos de concentración solar y de esto resulta su mayor utilidad. Solo corresponde tener en cuenta que la parábola tiene propiedades que se deben respetar para que sea considerada una parábola, de la misma forma, la latitud y la longitud son de un lugar determinado, por lo tanto, si se corre mucho el sitio como consecuencia de la longitud del equipo, ya se está en otras coordenadas geográficas diferentes a las ingresadas inicialmente. Por estos motivos, entre otros, los valores de ingreso de información deben guardar coherencia con los resultados que se pretenda obtener, es decir deben corresponder a equipos o sistemas que puedan ser factibles de construcción o desarrollo.

En este trabajo se presentan los resultados de validación experimental de la nueva versión del software para el cálculo de generación térmica de un concentrador cilindro parabólico (CCP). La contrastación de los valores medidos y simulados (temperatura de salida) se cuantifica mediante métricas como RMSE%, MAE% y MAPE%. Además, se utiliza en esta etapa, para el procesamiento, la ecuación central de balance de energía con el agregado de otros parámetros adicionales. Como así también se muestra la nueva interfaz de usuario diseñada de manera más práctica y con un perfil más adecuado para el tipo de investigación que lleva a cabo el programa, para el módulo correspondiente a la generación de energía térmica para un sistema de CCP.

METODOLOGÍA

Descripción del concentrador solar e instrumental de medición empleado

Para proceder a la validación del programa informático creado se utilizó un concentrador cilindro parabólico (Figura 1) que se encuentra construido en el campus experimental del Instituto de Investigación en Energías no Convencionales (INENCO) de la Universidad Nacional de Salta (Aparicio et al., 2023; Dellicompagni et al, 2024a). Este equipo tiene una orientación de su eje horizontal Este / Oeste. El fluido de trabajo es agua proveniente de la red de agua común. Cuenta con un sistema propio de seguimiento del sol con eje de rotación paralelo al eje Este/Oeste. La superficie reflectiva del concentrador está hecha de láminas de aluminio pulido de alta reflectancia y representa un área de apertura de 11m². El absorbedor es un caño estructural que se recubrió de pintura negra de alta temperatura, y está protegido por una cubierta de vidrio borosilicato.



Figura 1: Equipo utilizado para las mediciones y posterior validación del software. (a) Vista orientado en incidencia solar. (b) Salida de vapor desde el absorbedor.

Las temperaturas (entrada, salida y ambiente) se midieron empleando termocuplas tipo K y el caudal de agua de ingreso se registró con un caudalímetro de turbina. La irradiancia directa normal al haz (DNI) se mide por medio de un pirheliómetro. En la Tabla 1 se brinda más información sobre los instrumentos de medición empleados.

Tabla 1. Instrumentos de medición, características principales.

Magnitud	Sensor	Error	Adquisidor	Software
Temperatura (entrada, salida y ambiente)	Termocupla Fluke - K	0.1 °C	Digi Sense de doce canales	ScanLink 2.0 Cole Parmer
Caudal másico (entrada)	Caudalímetro Arduino YF-S401	10 ⁻³ kg/s	Arduino UNO	Arduino 1.8.16
Irradiancia directa normal al haz	Pirheliómetro Kipp & Zonen CHP1	2 %	Campbell Scientific CR100	Spyder (Python 3.10)

Balance de energía

Las principales variables necesarias para procesar y que finalmente van a determinar las salidas con las cuales se pretende la validación del programa informático creado, se encuentran en la Ec. (1) de balance de energía (Duffie y Beckman, 2013).

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

A esta Ec. (1) se le incorporaron otros factores como ser irradiancia incidente superior (I_{is}), en W/m², las pérdidas por no iluminación de absorbedor en los extremos y el factor de condensado, ambos adimensionales. Llegándose así a un nuevo balance de energía dado por la Ec. (2).

$$(1 - \Phi_c) * \dot{m} * C_p * (T_s - T_e) = \eta * DNI * A_{con} * K(\theta) * \Gamma(\theta) + I_{is} - U * A_{abs} * (T_s - T_a) \quad (2)$$

Donde:

Φ_c : Factor de condensado, adimensional.

$\dot{m}$: 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/°C*m².

A_{abs} : Área absorbedor, m².

T_a : Temperatura ambiente, °C.

I_{is} : Irradiancia incidente superior, W/m².

$\Gamma(\theta)$: Pérdida por no iluminación de absorbedor, adimensional.

El termino irradiancia incidente superior (I_{is}) corresponde a la potencia solar que llega directamente al absorbedor por la parte de arriba y que *no pasa* por la superficie reflectora. El termino factor de perdida por no iluminación del absorbedor ($\Gamma(\theta)$) corresponde a una disminución en la ganancia solar cuando los haces inciden sobre el concentrador con ángulos de incidencia pronunciados, desarrollándose una discontinuidad en la imagen iluminada tendiente a percibirse como una sombra en los extremos del absorbedor. Este factor se obtiene con la Ec. (3) (Vouros et al, 2020). El factor de condensado (Φ_c) representa aquella parte del agua de ingreso que no se evapora y llega a la salida del concentrador. Su valor, para el concentrador empleado para la validación, se determinó experimentalmente y ronda en el orden del 18% al 23%.

$$\Gamma(\theta) = 1 - \left(\frac{f}{l}\right) * \left(1 + \frac{w^2}{48f^2}\right) * \tan(\theta) \quad (3)$$

Donde:

θ : Angulo de incidencia, ° (grados sexagesimales).

f : Distancia al foco de la parábola, m.

l : Largo del área de apertura del concentrador, m.

w : Ancho del área de apertura del concentrador, m.

La irradiancia incidente superior se obtiene con la Ec (4).

$$I_{is} = DNI * \cos(\theta) * \tau * \alpha * (D_{abs} * L_{abs}) \quad (4)$$

Donde:

τ : Transmitancia de la cubierta, adimensional.

α : Absortancia del tubo absorbedor, adimensional.

D_{abs} : Diámetro del absorbedor, m.

L_{abs} : Largo del absorbedor, m.

El valor del modificador del ángulo de incidencia $K(\theta)$, conocido en la literatura como *IAM*, mantiene su estructura matemática plasmada en la versión anterior (Aparicio et al., 2023) y basada en la formulación de Balado (2011) para CCPs.

Por otro lado, las Ecs. (1) y (2) incorporan el coeficiente global de pérdidas U. Este coeficiente ha sido estudiado y cuantificado mediante termografía infrarroja y los resultados se podrán observar en Dellicompagni et al. (2024b). Para las validaciones, se adoptó $U = 50 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2$.

Mediciones experimentales realizadas

Se procedieron a tomar las mediciones con el objeto de poder compararse con los resultados que muestra el programa software (Aparicio et al, 2023), corriendo con los mismos parámetros con que trabaja el concentrador cilindro parabólico. Se optó por realizar la validación comparando la temperatura de salida. Esto es así debido a que esta variable es una consecuencia del funcionamiento del sistema concentrador generada por todos los valores de las otras variables que actúan sobre el mismo. Y por otra parte es un valor que no se calcula, sino que se mide directamente. La acción de la irradiancia incidente, de la temperatura de entrada del fluido, de la temperatura ambiente y del caudal mismo, determinan la temperatura de salida. Se llevaron a cabo cinco pruebas de medición cinco días diferentes. La Tabla 2 reúne información sobre los días en que se realizaron los ensayos. En todos los casos el caudal masico presentó variaciones propias a la variación de presión de la red de agua.

Tabla 2. Días de ensayos tomados como referencias para la validación.

Nº	Día	Datos tomados
1	13-09-23	186
2	9-10-23	240
3	7-11-23	99
4	30-4-24	189
5	19-6-24	243

Métricas para la validación

La comparación de los valores medidos y los simulados se realizan empleando diversas métricas de comparación como lo son el error absoluto medio (MAE), el error cuadrático medio (RMSE) (Kambezidis, 2012) y el error porcentual absoluto medio (MAPE) (Hyndman and Koehler, 2006; Montaña et al, 2013), todos en términos porcentuales con respecto a la variable simulada. Las mencionadas métricas se determinan con las Ecs. (5-7).

$$MAE\% = \frac{1}{N} \cdot \sum_1^N |T_{sim} - T_{med}| \tag{5}$$

$$RMSE\% = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_1^N (T_{sim} - T_{med})^2}{\frac{1}{N} \sum_1^N (T_{sim})}} \tag{6}$$

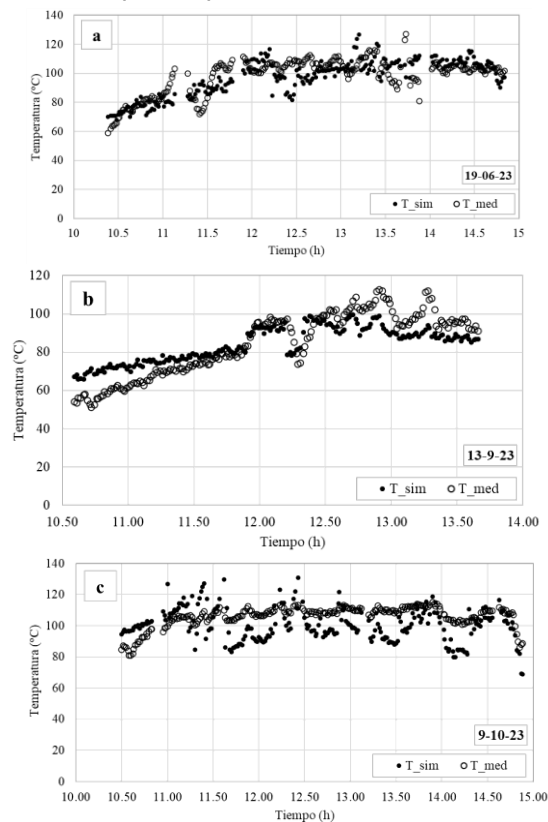
$$MAPE\% = \left(\frac{100}{N}\right) \cdot \sum_1^N \left| \frac{T_{sim} - T_{med}}{T_{sim}} \right| \tag{7}$$

Donde T_{sim} , T_{med} y N corresponden a las temperaturas simuladas, medidas y el número de datos obtenidos en cada ensayo, respectivamente. Es menester mencionar las definiciones de las métricas empleadas en este trabajo. MAE es una de las medidas más comunes y cuantifica la magnitud promedio de los errores absolutos en un conjunto de predicciones, sin considerar su dirección. RMSE proporciona información sobre el desempeño a corto plazo de un modelo al permitir una comparación término por término de la diferencia real entre el valor estimado y el medido. Finalmente, MAPE es una medida estadística que ayuda a

determinar qué tan precisas son las predicciones o pronósticos en relación con los valores reales.

RESULTADOS

La validación del modelo numérico desarrollado, y por ende del software que emplea dicho modelo, se realiza comparando las temperaturas de salida. Para ello, en la Figura 2,a-e se muestra la superposición de los perfiles de temperaturas simuladas y medidas. Se observa que, durante los ensayos, el concentrador operó la mayor parte del tiempo generando vapor, y que las oscilaciones que se producen son seguidas por las oscilaciones en el perfil de temperatura simulado. Por otro lado, se observa que el período de calentamiento difiere entre los valores medidos y simulados, y esto se debe principalmente a que el modelo numérico no contempla tal proceso inercial. Esta discrepancia puede asociarse a una fuente de error *adicional* que gravita en los valores de las métricas obtenidas. No obstante, se logran resultados de MAE%, RMSE% y MAPE con suficiencia para inferir en que el modelo numérico se encuentra en muy buena correlación con el fenómeno representado (Tabla 3).



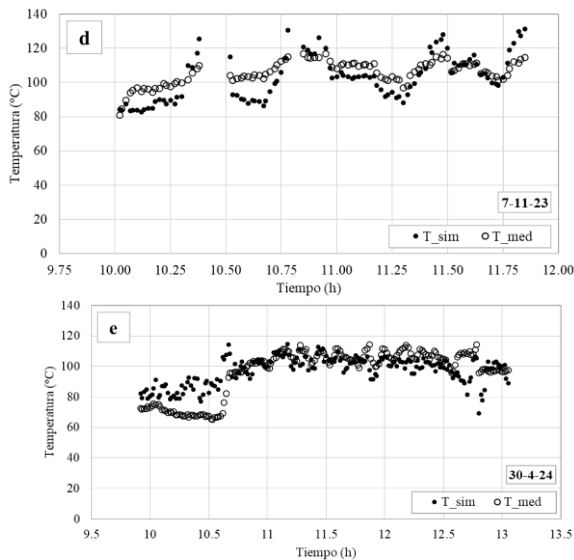


Figura 2: Perfiles de temperatura simulada vs. temperaturas medidas, para cada día de ensayo.

Tabla 3. Métricas estadísticas de validación.

Día	RMSE%	MAE%	MAPE%
19-06-2023	10.35	8.13	8.25
13-09-2023	10.71	9.23	9.46
09-10-2023	12.04	25.65	11.09
07-11-2023	8.67	7.57	7.79
30-04-2024	11.37	8.62	9.08
Promedio	10.63	11.84	9.13

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El programa software desarrollado, es un modelo que muestra la performance térmica de un sistema de concentración solar cilindro parabólico. A partir de valores de entrada ingresados por el usuario se generan salidas correspondientes a la temperatura de salida del fluido, la potencia térmica alcanzada, la energía térmica generada y la presión, en formato de tablas y gráficos. Este modelo se hizo utilizando tecnologías de desarrollo informático de libre uso, no exige el pago de licencias. La Figura 3 muestra cómo es la interfaz del software para el ingreso de los parámetros de configuración, para la simulación de sistemas de concentración solar cilindroparabólica. Se observan principalmente tres cuerpos o bloques dentro de la interfaz. La primera correspondiente a la presentación del software y la pertenencia (donde estará alojado en servidor) correspondiente a la Facultad de Ciencias Exactas, de la Universidad Nacional de Salta. El segundo cuerpo presenta una imagen a modo ilustrativo que indica el tipo de concentrador solar que se está por simular (imagen extraída de Dellicompagni et al. (2024a)). El tercer modulo corresponde a la sección de ingreso de la información necesaria para llevar a cabo el cálculo computacional. Subdividido en tres partes, se

observan campos para parámetros de geolocalización, de configuraciones globales del concentrador y de especificaciones más precisas relacionadas a las condiciones de operación.

ENERGIA SOLAR




Tecnologías de Concentración Solar



COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO

Ruta absoluta del archivo excel: Caudal y Temperatura de entrada: (Constante) Factor de condensado: Localidad: Latitud: ° Longitud: ° asnm: m Meridiano estándar: °	Orientación: Sur Año: (Año normal) Mes: (Enero) Día: Largo concentrador: m Ancho concentrador: m Eficiencia óptica: Distancia focal: m	Diámetro tub. absorbedor: m Longitud tub. absorbedor: m V' de: Área receptor: m ² Coeficiente global U: W/m ² °C Temperatura de entrada: °C Calor específico: J/kg°C Flujo masico: kg/s
---	---	--

[Enviar]

Figura 3: interfaz de usuario para el módulo de concentración solar cilindro parabólica, para generación de energía térmica.

El principal objetivo de este desarrollo es construir con un programa informático que sirva o ayuda cuando se requiera construir un equipo de concentración solar, una vez que se hallan obtenidos los resultados numéricos deseados. En cuanto a los valores de ingreso, deben ser coherentes con los valores reales, los valores de ancho del concentrador y distancia focal deben cumplir con las propiedades de una parábola. La longitud del concentrador, absorbedor y receptor también deben considerar valores lógicos, porque, por ejemplo, de ser muy grandes (el largo en km) también están variando la longitud (meridiano) y tal vez hasta la latitud geográfica, que son valores principales dentro del proceso. En este sentido las coordenadas geográficas (latitud y longitud) ingresadas deben corresponder al sitio o lugar de las pruebas, de otra manera los cálculos que se generen no serán consecuentes con la información aportada en este aspecto. En lo que concierne a otros parámetros, como por ejemplo el coeficiente global de pérdidas (U), podemos inferir que el mismo se halla condicionado por la variable climática viento, y la relación entre la temperatura exterior del absorbedor y la temperatura ambiente. Tanto la velocidad (y dirección) del viento y la temperatura ambiente modifican la temperatura exterior de las superficies, por lo tanto, actúan sobre los mecanismos de pérdidas de calor. En definitiva, es el usuario quien debe *controlar* los parámetros de ingreso e *interpretar* los resultados arribados con la simulación.

En base a las mediciones realizadas en cinco días, y sus correspondientes simulaciones aplicando la nueva versión del software, se procedió a realizar las validaciones. Para ello se optó por métricas como ser RMSE%, MAE% y MAPE%, habiéndose obtenidos valores promedio de 10.63%, 11.84% y 9.13%, respectivamente, lo cual permite decir que la coincidencia entre la simulación y la medición es aceptablemente precisa. Cuando se emplean métricas de regresión

para convalidar resultados obtenidos, es preciso tener en cuenta qué tipo de información se está cotejando, para saber cuánta precisión tienen los valores obtenidos por simulaciones. Para el caso aquí abordado, se eligió tomar las mediciones de temperaturas de salida medidas y compararlas con las simuladas por el software. Entonces cuando el equipo concentrador alcanza temperaturas altas, la diferencia o distancia que marcan las métricas está dentro de lo aceptable. Sin embargo, los perfiles de temperaturas simuladas presentan fluctuaciones pronunciadas con respecto a los perfiles medidos. Esto se debe principalmente a oscilaciones repentinas del caudal másico en la práctica. En el caso de la simulación, esta se realiza con los valores de caudal que recibe para *correr* el algoritmo y en el instante al que corresponde, en otras palabras, el modelo no está diseñado -aun- para evaluar lo que pudo haber ocurrido hasta llegar a ese instante.

Como trabajo a futuro, una nueva versión de software podría contemplar las inercias térmicas tanto en la etapa de calentamiento (justo después del enfoque) y de enfriamiento (inmediatamente después del desenfoque), lo cual permitirá determinar con mayor celeridad los tiempos de puesta en marcha y parada de los sistemas de concentración solar. Por otro lado, se está trabajando en la incorporación de módulos para generación de calor con tecnología Fresnel lineal, como así submódulos de generación de electricidad. Asimismo, se incorporará un módulo visor del tipo SIG (sistema de información georreferenciado) que permita ver distintos escenarios de generación térmica -y/o eléctrica- para los departamentos de la provincia de Salta. Finalmente, el software, en su versión más actualizada y mejorada, estará a disposición de cualquier usuario que tenga interés en su uso, ya que se mostrará como una página web, es decir que se podrá acceder al programa con solo escribir o copiar su dirección URL en un navegador de internet. Para esto último, se está gestionando el espacio de alojamiento del software en los servidores locales de la Facultad de Ciencias Exactas, de la Universidad Nacional de Salta.

Financiamiento: El presente trabajo se encuentra financiado mediante un proyecto PICT (FONCYT), N° 2019-01729, denominado Generación de energía térmica con tecnología de concentración solar cilindro parabólica para procesos industriales en la región NOA.

Contribución de autores: HA: Escritura de código informático, desarrollo de interfaz usuario. Análisis e interpretación de datos numéricos y experimentales. Redacción del manuscrito. PD: Diseño y construcción del sistema de concentración. Ensayos de caracterización y procesamiento de datos medidos. Análisis e interpretación de datos numéricos y experimentales. Redacción del manuscrito, revisión crítica del manuscrito y aprobación de su versión final. CC: Confección de manuscrito. revisión crítica del manuscrito y aprobación de su versión final.

Conflictos de interés: No existe conflicto de interés de ninguna de las partes por la publicación de este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, H., Dellicompagni, P., Cadena, C. (2023). Software para el estudio del desempeño térmico de sistemas de concentración solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 27, pp. 146-157. ISSN 2796-8111. Disponible en <https://portalderrevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/4618>.
- 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>.

- 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.
- Blanco, M., Amieva, J., Mancilla, A. (2005). The tonatiuh software development proyect: An open source approach to the simulation of solar concentrating systems. Disponible en:
- Clifford, K. H. (2008). Software and Codes for Analysis of Concentrating Solar Power Technologies. Sandia Report. 8053. <https://doi.org/10.2172/946571>.
- Dellicompagni, P., Aparicio, H. E., Franco, J., López Ruiz, C. B. (2024b). Pérdida de calor en el absorbedor de un concentrador cilindro parabólico de mediana entalpía. Energías Renovables y Medio Ambiente. En prensa (Aceptado el 2-Septiembre-2024).
- 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., Aparicio, H., Linares, J. (2024a). Concentrador solar cilindro parabólico de mediana entalpía: Ensayos de operación y caracterización. Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 53, pp. 11-17. ISSN en línea 2684-0073. <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/4751>.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. Chichester: John Wiley and Sons Ltd. ISBN: 9780470873663. Online ISBN: 9781118671603.
- Fan, M., You, S., Xia, J., Zheng, W., Zhang, H., Liang, H., Li, X., Li, B. (2018). An optimized Monte Carlo ray tracing optical simulation model and its applications to line-focus concentrating solar collectors. Applied Energy. Volume 225. Pages 769-781. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.067>.
- Hyndman, R. J., Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy, International Journal of Forecasting, 22 (4), pp. 679-688. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>.
- Jafrancesco, D., Cardoso, J., Mutuberria, A., Leonardi, E., Les, I., Sansoni, P., Francini, F., Fontani, D. (2018). Optical simulation of a central receiver system: Comparison of different software tools. Renewable and Sustainable Energy Reviews 94, 792-803. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.028>.
- Kaddour, A., Belgasim, B., Agagna, B., Behar, O., Achouri, A., Nedjimi, M., Tlili, S., Daoui, H. (2023). A review of tools dedicated to the modeling and simulation of concentrating solar systems. Neuro Quantology. Volume 21. Issue 6. Page 1630-1651. https://www.neuroquantology.com/media/article_pdfs/15868_Neuroquantology_01-32-26.pdf.
- Kambezidis, H. D. (2012). Comprehensive Renewable Energy. Volume 3, Pages 27-84. ISBN 978-0-08-087873-7.
- Montaño, J., Palmer, A., Sese, A., Cajal, B. (2013). Utilizando el índice R-MAPE como medida resistente de precisión de pronóstico. Psicothema. Vol. 25 (4). 500-506. ISSN 0214 - 9915. doi: 10.7334/psicothema2013.23.
- Vouros, A., Mathioulakis, E., Belessiotis, V. (2020). Modelling the overall efficiency of parabolic trough collectors. Sustainable Energy Technologies and Assessments. Volume 40, 100756. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100756>.
- Zou, B., Dong, J., Yao, Y., Jiang, Y. (2017). A detailed study on the optical performance of parabolic trough solar collectors with Monte Carlo Ray Tracing method based on theoretical analysis. Solar Energy. Volume 147. Pages 189-201. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.055>.