



Artículo de investigación

Simulación de un sistema de calentamiento solar mediante Python

Simulation of a solar heating system using Python



David Espinosa Gómez^{1,3} , Luis Bernardo López Sosa² , Alejandro Adrián Sepúlveda Cisneros³ , Kevin Aldair Méndez Alfaro³ 

¹Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Múgica S/N, 58060 Morelia, Michoacán, México.

²Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km3, C.P. 61614. Pátzcuaro, Michoacán, México.

³Instituto Tecnológico Superior de Puruándiro, Carretera Puruándiro-Galeana km 4.3, C. P. 58532, Puruándiro, Michoacán, México.

Autor de correspondencia: David Espinosa Gómez, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. E-mail: despinosa3187@gmail.com. ORCID: [0000-0003-2200-9156](https://orcid.org/0000-0003-2200-9156).

Enviado: 3 de Junio del 2023

Aceptado: 11 de Agosto del 2023

Publicado: 19 de Septiembre del 2023

Resumen. - Actualmente, la dependencia a los recursos fósiles sigue dominando, aún con los impactos económico-ambientales que estos generan; por lo que es necesario incentivar la producción y uso de fuentes renovables, asequibles y sustentables. En este sentido, el presente trabajo se enfoca en desarrollar un software de simulación termosolar para la evaluación de materiales de bajo costo y bajo impacto ambiental que puedan ser utilizados en calentadores solares o acumuladores térmicos. Optimizando el uso de materiales pétreos, orgánicos y aquellos disponibles localmente con propiedades optotérmicas de alta absorción y gran residencia térmica, para utilizarlos como contenedores de energía termosolar. De este modo, se ha desarrollado una aplicación de escritorio en lenguaje de programación Python, para simular la absorción y acumulación térmica de materiales con las características mencionadas utilizando propiedades como temperatura ambiente del lugar de prueba, absorción solar, conductividad térmica y masa del material. Este software pretende eficientar los procesos experimentales, reduciendo recursos económicos, tecnológicos y materiales, al contar con un modelo de la física térmica de acumulación termosolar en materiales naturales, prediciendo su comportamiento energético sin la necesidad de construir prototipos a escala real. Finalmente, se ha comprobado que el simulador desarrollado, proporciona un análisis mucho más dinámico y fácil de interpretar con datos estadísticos de fácil obtención. Es decir, permite observar no solo la curva sino también proporciona la dispersión de un sistema continuo de valores, el cual puede ayudar a inferir los datos de una investigación con mayor sencillez y efectividad sobre las propiedades ópticas y térmicas de los materiales estudiados. No obstante, el desarrollo del programa computacional puede ser mejorado, por lo que mantiene un esquema de libre acceso y código abierto.

Palabras clave: Algoritmo computacional; Simulación; Energías renovables.

Abstract. - Currently, dependence on fossil resources continues to dominate, even with the economic-environmental impacts that they generate; Therefore, it is necessary to encourage the production and use of renewable, affordable and sustainable sources. In this sense, this work focuses on developing solar thermal simulation software for the evaluation of low-cost and low environmental impact materials that can be used in solar heaters or thermal accumulators. Optimizing the use of stone, organic materials and those available locally with optothermal properties of high absorption and great thermal residence, to use them as containers for solar thermal energy. In this way, a desktop application has been developed in the Python programming language to simulate the absorbance and thermal accumulation of materials with the aforementioned characteristics using properties such as ambient temperature of the test site, solar absorbance, thermal conductivity and mass of the material. This software aims to make experimental processes more efficient, reducing economic, technological and material resources, by having a model of the thermal physics of solar thermal accumulation in natural materials, predicting their energy behavior without the need to build full-scale prototypes. Finally, it has been proven that the developed simulator provides a much more dynamic and easy-to-interpret analysis with easily obtained statistical data. That is, it allows not only the curve to be observed but also provides the dispersion of a continuous system of values, which can help to infer research data with greater simplicity and effectiveness on the optical and thermal properties of the materials studied. However, the development of the computer program can be improved, so it maintains a free access and open-source scheme.

Keywords: Computational algorithm; Simulation; Renewable energy.

1. Introducción

Actualmente, el uso de tecnologías de la información aplicado a estudios de energía sostenible se ha incrementado, posibilitando el estudio de diversos prototipos que aprovechan la energía solar incidente para aplicaciones térmicas. En este sentido, es común analizar problemas de fluidos termodinámicos aplicados a la industria solar que requieren de sistematización en plataformas informáticas [1]. Por otro lado, se ha sabido en trabajos previos sobre aplicaciones solares enfocados en la caracterización de hollín, de algunas áreas de oportunidad en los procesos y técnicas de caracterización fisicoquímicas, estructurales y funcionales en sistemas termosolares [2-5], donde la modelación matemática y la informática podrían conjugarse para resolver algunas dificultades que presentan estos sistemas.

Por ello, este trabajo se enfoca a desarrollar un software de simulación para revisión y mejoramiento de materiales de bajo costo y aprovechamiento de fuentes renovables de energía, para su posible aplicación en calentadores solares aprovechando las características optérmicas de los materiales. Con esto, se garantiza la optimización de recursos requeridos, tales como el ahorro de tiempo, recursos económicos y materiales utilizados en los prototipos.

Existen diferentes softwares para el estudio de comportamiento térmico de materiales, sin embargo, estos están enfocados en análisis térmico de edificios o sistemas a gran escala que poco incentivan la incorporación de dimensiones de sustentabilidad en sus materiales, ambientales, económicas y sociales, tales programas son por ejemplo ANTESOL, SIMEDIF y ENERGY [6-8]. ANTESOL es un software desarrollado por Martín Monroy que simula el comportamiento térmico de cerramientos de edificios con cualquier inclinación y composición constructiva, considerando rigurosamente las

condiciones ambientales exteriores e interiores, especialmente el soleamiento y la radiación infrarroja [6].

En cuanto a SIMEDIF 2000, es un software que permite realizar la simulación térmica de edificios con acondicionamiento natural a través de sistemas solares pasivos, donde es desarrollado íntegramente en el INENCO en el año 1984 [7, 8].

Finalmente, ENERGY-10 es un programa de diseño creado en 1996 por el NREL (National Renewable Energy Laboratory) que permite simular el comportamiento térmico de edificios con sistemas de acondicionamiento de aire pasivos, híbridos y/o activos [7]. También, se han hecho estudios de materiales de absorción térmica de bajo impacto ambiental y bajo costo con López-Sosa *et al.*, donde los autores afirman que se ha realizado el análisis numérico sobre el comportamiento térmico de los materiales en función de la temperatura usando Mathematica 11.

A su vez, sustentan que el resultado del modelo propuesto es favorable, siendo 4% el error total del modelo en cuanto al ajuste a los datos experimentales, que es un valor aceptable. Con la información anterior, se puede observar que existen diversos softwares para el análisis de comportamiento térmico de edificios, sin embargo, hay escasa información referente al estudio de materiales de bajo costo con características de absorción solar como se menciona anteriormente, es decir, no hay una herramienta de fácil uso y sencilla para el análisis de datos como son ANTESOL, SIMEDIF y ENERGY.

Ante esta situación, surge el interés de investigar y mejorar algunos estudios previos, con la implementación de un programa computacional en Python, donde se pretende desarrollar una herramienta que proporcione una estructura gráfica para hacer un análisis sencillo y preciso

de los datos estadísticos, en inferir a partir del uso de variables se fácil acceso de los materiales, propiedades como la absorción solar y la temperatura de máxima acumulación térmica. Así el software que se ha desarrollado para tal efecto y que se describe en este trabajo, es innovador y actual, además puede realizar

2. Metodología

Para llevar a cabo el objetivo de nuestro trabajo, se describen brevemente los principales conceptos físicos que se utilizan en la formulación del balance energía del sistema a estudiar.

2.1. Conducción

Es el proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre dos cuerpos, sin intercambio de materia. La transmisión de calor por conducción intercambia energía interna, que es la combinación de la energía cinética y la energía potencial de sus partículas microscópicas: moléculas, átomos y electrones. La conductividad dependerá de su estructura microscópica: en un fluido se debe a las colisiones aleatorias de sus moléculas, mientras que en un sólido es por el intercambio de electrones libres (metales), o de los modos de vibración de sus partículas (dominante en los materiales no metales) [9]. Para el caso simplificado de flujo de calor estacionario en una sola dirección, el calor transmitido es proporcional al área perpendicular al flujo de calor, a la conductividad del material y a la diferencia de temperatura, y es inversamente proporcional al espesor [9, 10]:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Aquí, k es la conductividad térmica, Δx es el espesor del material y A es el área de la superficie de contacto. Si el espesor del material, se considera muy pequeño, entonces, la expresión queda [10].

predicción de la absorción de materiales de bajo impacto ambiental y bajo costo sin la implementación de un prototipo, lo que posibilita una herramienta de interés para la comunidad investigativa solar y para los especialistas en el área de ecotecnologías.

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

donde el término de la izquierda es la velocidad de transferencia de calor en una dirección x . El signo negativo significa que el calor fluye de la temperatura más alta a la más baja.

2.2. Convección

La convección en sí, es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido. Del mismo modo que en la conducción, requiere un material para la transferencia [11]. Este tipo de transferencia de energía puede ser externa, donde el fluido se mueve sobre las superficies. Se dice que es interna, cuando el fluido se mueve por dentro de las superficies. Para calcular la transferencia de calor por convección se utiliza la siguiente fórmula [9-11]:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf}) \quad (3)$$

siendo h el coeficiente de convección, A_s es el área del cuerpo en contacto con el fluido. Aquí, T_s es la temperatura en la superficie del cuerpo y T_{inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo, ambos en grados Kelvin. Es importante mencionar que el coeficiente convectivo de transferencia de calor se predice de fórmulas empíricas que correlacionan números adimensionales. Este depende del tipo de fluido, la geometría del sistema, la velocidad de flujo y la diferencia de temperaturas [10].

2.3. Radiación

La radiación térmica es la radiación emitida por un cuerpo debido a su temperatura. Esta radiación es radiación electromagnética que se genera por el movimiento térmico de las partículas cargadas que hay en la materia. Es bien sabido que todos los cuerpos (a excepción de aquellos que posean el cero absoluto) emiten radiación electromagnética gracias a este efecto, y su intensidad es dependiente de la temperatura y de la longitud de onda considerada. La radiación térmica es uno de los mecanismos fundamentales de la transferencia térmica [11,12]. Por otra parte, se ha sabido que la energía total emitida por unidad de tiempo y superficie emisora, es dado por la ley de Stefan-Boltzmann [9,10]:

$$Q_{\text{rad}} = \sigma AT^4 \quad (4)$$

esto es para un cuerpo negro con emisividad de uno ($\epsilon = 1$). Sin embargo, todos los cuerpos reales, tienen emisividades menores que 1 (cuerpos grises). Por lo tanto, emite energía electromagnética por unidad de tiempo y superficie como [9, 10].

$$Q_{\text{rad}} = \epsilon \sigma AT^4 \quad (5)$$

siendo T la temperatura absoluta de la superficie, σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) y A es el área de la superficie en metros cuadrados.

3. Procedimiento

En este trabajo se analizan las propiedades de materiales de bajo impacto ambiental, como reservorio de almacenamiento térmico para calentar el aire; este sistema se esboza en la Figura 1. En este sentido, la simulación del comportamiento de las temperaturas de los Materiales de Absortancia y Acumulación Térmica denotado como MAT, se ha desarrollado en lenguaje de programación *Python* [13,14].

Para ello, se toma datos para el análisis según los componentes de los diferentes MAT, el cual está compuesto de la siguiente forma [2-5]: (a) Prototipo MAT 1: 95% grava -5% hollín (b) Prototipo MAT 2: 95% piedra caliza-5% hollín (c) Prototipo MAT 3: 50% grava-50% piedra caliza (. Prototipo MAT 4: 45% grava-45% piedra caliza-10% hollín. La construcción experimental de los dispositivos de calentamiento de aire se puede ver a detalle en la ref. [2]. Este sistema termo-solar se plantea a partir del balance de energía considerando las principales componentes del prototipo [6] como se aprecia en la Figura 1.

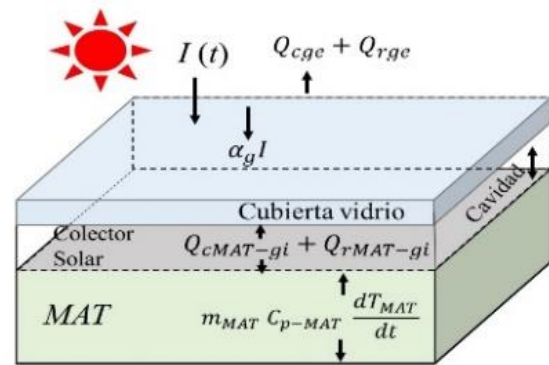


Figura 1. Balance de energía del sistema.

Las variables que intervienen en el sistema son: el término $\alpha_g I A$ representa la ganancia de energía por radiación incidente, $Q_{cge} + Q_{rge}$ es la pérdida de energía debido a la transferencia de calor por convección y la transferencia de calor radiante de la superficie del vidrio al medio ambiente. De modo similar, la $Q_{cMAT-gi} + Q_{rMAT-gi}$ es la ganancia de energía debido al calor transferido por la convección natural del aire y la transferencia de calor radiante entre la superficie del MAT y el vidrio, respectivamente. En consecuencia, la conservación de energía en el MAT da lugar a una ecuación diferencial de primer grado que tiene la siguiente forma.

$$m_{MAT} C_{p-MAT} \frac{dT_{MAT}}{dt} = \alpha_{MAT} \tau_g I A_{MAT} - h_{1MAT} A_{MAT} (T_{MAT} - T_{gi}) - Q_{kMAT-b} \quad (6)$$

donde $\alpha_{MAT} \tau_g I A_{MAT}$ es la ganancia de energía debido a la radiación incidente, $-h_{1MAT} A_{MAT} (T_{MAT} - T_{gi})$ es la pérdida de energía que se origina en la superficie del MAT al vidrio por convección natural del aire y por la transferencia de calor radiante entre la superficie del MAT hacia el vidrio. Finalmente, Q_{kMAT-b} es la pérdida de energía debido a la transferencia de calor por conducción del MAT hacia la base de la bandeja.

La solución de la ecuación (6) encontrada es

$$T_{MAT} = e^{-\beta t} f_1(t) + T_{MAT0} e^{-\beta t} \quad (7)$$

con $f_1(t) = \int_0^t f(t) e^{\beta t} dt$ y $T_{TMAT0} = T_{MAT}(0)$ que es la temperatura inicial del MAT. El parámetro $\beta = \frac{h_{1MAT} h_{g0} A_{MAT} t_h}{m_{MAT} C_{MAT} (h_{MAT} + h_{g0})}$ y $f(t) = \frac{A_{MAT} t_h}{m_{MAT} C_{MAT}} [(\alpha_{MAT} \tau_g - \alpha'_b) I + \frac{h_{1MAT}}{h_{1MAT} + h_{g0}} (\alpha_g I + h_{g0} T_e) + h_{cbe} (T_b - T_e)]$.

Aquí, $\alpha'_b = \alpha_b \alpha_{MAT} \tau_g$ es la fracción de absorptancia que experimenta la base de la

bandeja y $t_h = 3600 s/h$. Este resultado se relaciona también con otros parámetros, tales como la temperatura ambiente en función del tiempo, la irradiancia térmica, la absorptancia, entre otros; dichos parámetros se pueden encontrar en las referencias [2,15-19], además la nomenclatura de cada una de las variables está dada en el Apéndice. En particular, los valores de la absorptancia y de la temperatura inicial de los diferentes MAT computados son dados en la siguiente Tabla [2].

Tabla 1. Las diferentes absorptancias de los MAT y las temperaturas iniciales en grados Celsius.

	MAT 1	MAT 2	MAT 3	MAT 4
Absortancia	0.935	0.437	0.341	0.725
$T_{MAT}(0)$ [°C]	12.3	12.1	12.4	12.2

El siguiente punto es establecer la secuencia de pasos necesarios para obtener las respuestas deseadas a partir de los datos proporcionados anteriormente. Por consiguiente, describimos el pseudocódigo principal para resolver el problema planteado y modelar la solución a través del lenguaje de programación *Python*, el cual se puede apreciar en la Figura 2.

```

var sy= math.asin(math.sqrt(6 * d/w))

Agregar lista vacia fdt
Procedimiento graficar()

#Declaración de variables

var Cmat1= Escribe "Valor Cmat1"
var Mmat1= Escribe "Valor Mmat1"
var Tmat01= Escribe "Valor Tmat01"
var Amat1= Escribe "Valor Amat1"
var amat1= Escribe "Valor amat1"

# Variables en función de las variables anteriores
var abp1= ab * amat1 * tg

var Beta1=(h1T * hgo * Amat1 * th) / (Mmat1 *
Cmat1 * (h1T + hgo))

#Variables constantes

var Tb=25

var Ta=te

var hcbe=4*v+5.60

Agregar lista vacia hours
#Iteraciones con respecto al tiempo

for i in range(0,13):
    var IG= (2*w/Tos)*sin((math.pi*x)/Tos + sy)**2
    var TA= a *sin(2 * math.pi * ((x - b1) / (2 * b2))) + B

    var result1= ((Amat1 * th) / (Mmat1 * Cmat1)) *
    (((amat1 * tg - abp1)* IG)+( h1T / (h1T + hgo)) *
    (ag *IG + hgo * TA) +(hcbe * (tb - TA)))

    var resultint1= integrate(result1 * e ** (Beta1 * x),
(x, 0, i))

    var resultfdt1= resultint1*e ** (-Beta1 * i) +
Tmat01*e **(-Beta1 * i)

    Agregar(resultfdt1) en lista fdt1

    Agregar(i) en lista hours

```

Figura 2. Descripción del algoritmo implementado en Python.

Al compilar este algoritmo se obtiene una aplicación o un fichero ejecutable, donde proporciona la interpretación grafica del comportamiento de los MATs. Dicho pseudocódigo se traduce a código Python dado en el Apéndice, además, este programa recoge datos introducidos desde el teclado en el Menú principal y finalmente ejecutamos para análisis de resultados.

3.1 Funcionamiento del programa desarrollado en Python

Para acceder al simulador térmico de los materiales se debe observar el comportamiento de la temperatura ambiente y de la irradiancia térmica a través de los dos primeros botones que se muestran en la Figura 3. Posteriormente, entrar en el botón, llamado “Temperatura del Material (TMAT)” para introducir los datos como se muestran en la Figura 4. Estos datos corresponden a la capacidad calorífica del MAT (CMAT), la masa del MAT (MMAT), el área del MAT (AMAT), la temperatura inicial del MAT(T0_MAT) y la absortancia del MAT (AlfaMAT).

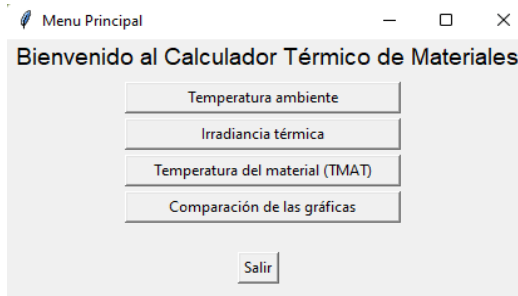


Figura 3. Componentes del Menú principal.

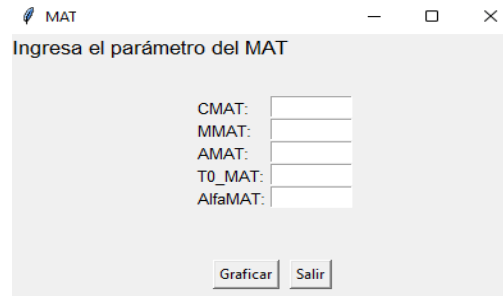


Figura 4. Características para el ingreso de datos.

El botón, denominado “Comparación de las gráficas”, está formada por cuatro módulos como se presenta en la Figura 5. Este permite ingresar cuatro valores de los parámetros de los MATs y genera cuatro gráficas para un análisis efectiva, dinámico

y comparativa de cada MAT. Asimismo, se puede observar que disponen de dos botones: el botón “Graficar” para generar las gráficas y el botón “Salir” para dejar el sistema. El resultado de las gráficas se puede visualizar en la sección de resultados.

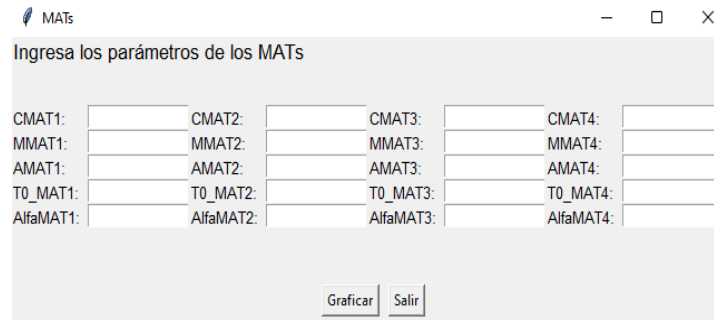


Figura 5. Elementos de ingreso de valores para diferentes TAM.

Mediante las variables de alimentación a la aplicación de escritorio, será posible inferir la absorción solar y la temperatura máxima que acumularía el MAT. Este software proporciona una gráfica con los datos de mayor temperatura alcanzada durante un intervalo de prueba de exposición al sol. El software supone una forma comparativa se puede considerar hasta 4 diferentes materiales expuestos a condiciones de operación constantes, en energía de entrada (Irradiancia solar), y da como respuesta la máxima temperatura que alcanzaría cada material, en consecuencia, determina de forma comparativa aquel de mejor absorción y acumulación térmica, esa es la principal aplicación de esta propuesta.

4. Discusión y resultados

En esta sección tiene la finalidad de dar a conocer los resultados obtenidos a través de la simulación de un programa que ha sido desarrollado en *Python* [13,14]. Cabe resaltar, que el objetivo principal es desarrollar una simulación mediante programación computacional para obtener el comportamiento térmico de materiales de bajo costo en función del tiempo. Además, de su utilidad en el ámbito científico, la estructura gráfica nos permite hacer un análisis sencillo y preciso de los datos estadísticos, permitiéndonos comprender la materia numérica compleja en contexto del estudio de materiales opto-térmicos que poseen características similares a la que se ha considerado en este trabajo. A

continuación, se resumen los resultados más relevantes de dicho trabajo de investigación.

En la Figura 6, se muestra el comportamiento de la temperatura de un solo MAT durante el día de prueba experimental. Este tipo de gráfico es muy útil para el análisis fenomenológico, dado que refleja con claridad los puntos

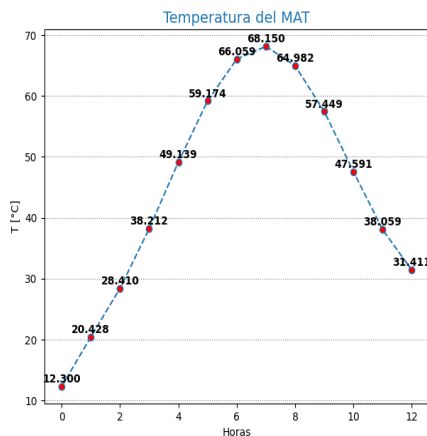


Figura 6. Temperatura del MAT1 en función de tiempo.

Cabe resaltar que el programa computacional desarrollado proporciona un gráfico interactivo y dinámico, ya que puede aportar los datos situándose en la coordenada que se analiza con el uso del cursor. También facilita la investigación en forma más sencilla usando el botón zoom para llevar a cabo una observación más cercana y asertiva. En este sentido, se ha logrado obtener un resultado eficiente y funcional, donde se puede extraer la información relevante empleando elementos visuales de fácil interpretación numérica.

Por lo tanto, la representación visual obtenida es de suma importancia, dado que sirve de apoyo en mostrar y comprender de manera sintetizada los datos recabados en una investigación de este tipo. Con ello, este

producidos de la temperatura ambiente en función del tiempo.

Con respecto a la Figura 7, se muestra el comportamiento de los MATs en función de las horas del día generadas con el programa desarrollado. Aquí, se aprecia claramente que el gráfico facilita una interpretación numérica mucho más rápida y visual.

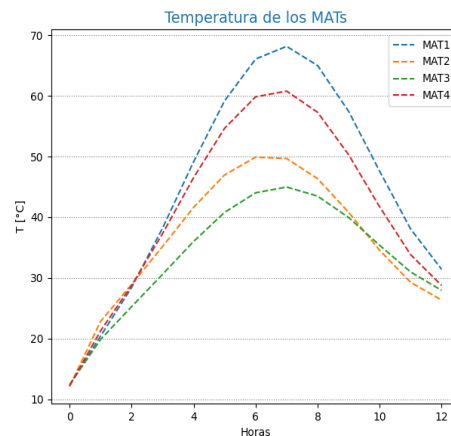


Figura 7. MAT en función del tiempo.

programa garantiza obtener resultados más sencillos de interpretar, que pueden ser utilizados como referencia o como punto de contraste ante la realización de nuevas investigaciones.

Siguiendo con el análisis comparativo sobre las temperaturas del MAT derivadas del modelo propuesto, junto con el valor experimental reportado en [2], se pueden observar en la Figura 8 y Figura 9 las diferencias encontradas y la certeza del modelo. Dado que los valores de las temperaturas de los TAMs más sobresalientes caen para el MAT1 y MAT4 (ver Figura 7), entonces, es necesario poner atención en comparar estos dos materiales para la validación de la herramienta tecnológica. De esta manera, en la Figura 8 se tiene el comportamiento de las

temperaturas en función del tiempo para el análisis experimental de los MATs, mientras que la estimación teórica es dada en la Figura 9. Esto revela que el comportamiento es similar en ambos casos, tal es así, que el “error relativo absoluto

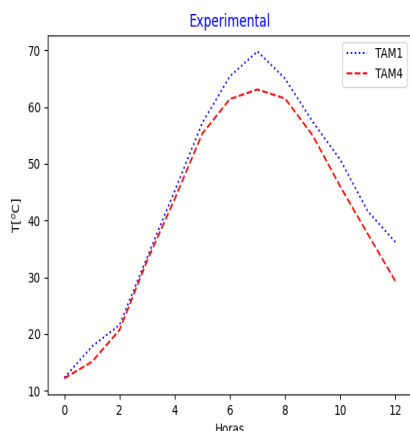


Figura 8. Resultado experimental del MAT1 y MAT2.

medio porcentual” denotado en sus siglas en inglés PMARE [20] es de 8%. Esto indica que el modelo se ajusta adecuadamente a los resultados experimentales y se clasifica como muy bueno de acuerdo al índice de simulación dado en [20].

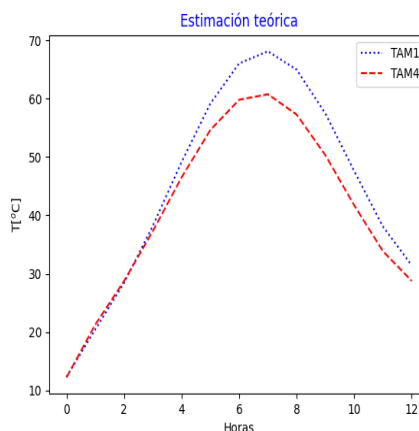


Figura 9. Resultado teórico del MAT1 y MAT2.

Esta aplicación es de fácil manejo, y se puede utilizar para cualquier material que se pretenda usar en sistemas de acumulación termosolar, sólo se requiere contar con las variables descritas en el apartado anterior.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha implementado un algoritmo computacional que permite sistematizar un modelo matemático desarrollado para sistemas termosolares de acumulación energética, que tiene un error del 8% con respecto a los datos experimentales mostrados en trabajos previos. Y que permite identificar la absorbancia solar de diversos materiales y la temperatura máxima de acumulación, a partir de variables como la temperatura ambiente, la masa y conductividad térmica del material. La sistematización del modelo permite mostrar graficas de las temperaturas del material térmico mediante el uso del lenguaje de programación *Python*. Una vez

concluido el simulador para los materiales de acumulación térmica, se puede concluir sobre su uso lo siguiente:

- Los resultados de su uso son favorables, ya que se garantiza la optimización de tiempos de ejecución en comparación con software como Mathematica 11, es decir, el resultado obtenido es mucho más práctico y eficiente para el análisis de datos.
- Se comprueba que el simulador desarrollado, proporciona un análisis mucho más dinámico y fácil de interpretar respecto a los datos estadísticos que se generan
- El modelo implementado tiene un error relativo absoluto medio porcentual de 8% con respecto a los datos experimentales; mostrando una simulación funcional, permitiendo estudiar la absorbancia solar de los materiales de interés. Esta propiedad es

fundamental para el funcionamiento del sistema de calentamiento de aire.

- El simulador como aplicación de escritorio es de fácil uso, y se puede aplicar a todos los materiales que deseen utilizarse para sistemas de acumulación termosolar, solo requiere variables de fácil acceso para mostrar los resultados de su uso en dichas tecnologías solares.

6. Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles del autor correspondiente a pedido razonable.

7. Reconocimiento de autoría

David Gómez: Conceptualización; Recursos; Ideas; Investigación; Metodología; Análisis formal; Recursos; Análisis de datos; Borrador original; Escritura; Revisión y edición; Validación. *Luis Bernardo López Sosa*: Conceptualización; Ideas; Investigación; Análisis de datos experimentales; Escritura; Revisión y edición; Validación. *Alejandro Adrián Sepúlveda Cisneros*: Conceptualización; Metodología; Desarrollo de software. *Kevin Aldair Méndez Alfaro*: Conceptualización; Metodología; Análisis; Desarrollo de software.

Referencias

[1] J. A. Duffie, W. A. Beckman y W. M. Worek, "Solar Engineering of Thermal Processes", *Journal of Solar Energy Engineering* 116, 67-68, (1994). <https://doi.org/10.1115/1.2930068>

[2] L. B. López-Sosa, M. González-Avilés, A. Ortiz-Carrión, D. Espinosa-Gómez y J. Zárate Medina, "Solar air

heating system with low environmental impact materials: Mathematical model and optothermal characterization", *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 47, 101399 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101399>

[3] L. B. López-Sosa, M. González-Avilés y L. M. Hernández-Ramírez, et al., "Ecological solar absorber coating: A proposal for the use of residual biomass and recycled materials for energy conversion", *Solar Energy* 202, 238-248 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.102>

[4] L. B. López-Sosa, M. González-Avilés, M. Hernández-Ramírez, A. Medina-Flores, I. Santos-Ramos y J. Zárate-Medina, "Electron microscopy characterization of forest biomass soot as solar energy absorption material", *Microscopy and Microanalysis* 25(S2), 2234-2235 (2019). <https://doi.org/10.1017/S1431927619011905>

[5] L. B. López-Sosa, J. Zárate-Medina, L. M. Hernández-Ramírez, H. Servín-Campuzano y M. González-Avilés, "Development a low-cost solar absorber coating based on soot of biomass-forest: Thermal characterization and application in a solar cooking system", *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 17, 651-668 (2018). <https://doi.org/10.24275/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n2/LopezL>

[6] M. Martín Monroy, "ANTESOL: Programa de simulación del comportamiento térmico de cerramientos

soleados", SOCIEDAD ANÓNIMA CANARIA DE TRABAJOS Y OBRAS, Las Palmas de Gran Canaria, (2000). <http://hdl.handle.net/10553/7501>

[7] S. Flores Larsen, . C. Filippin y G. Lesino, "Simulación mediante SIMEDIF y ENERGY-10 de un edificio liviano", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 25-30, (2001). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/79818>

[8] S. Flores Larsen y G. Lesino, "SIMEDIF 2000: nueva versión del programa de diseño y cálculo de edificios", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 4, 53-58, (2000). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/85681>

[9] R. W. Serth y T. Lestina, "Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb", Second Edition ed., Academic Press, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397195-1.00009-1>

[10] C. E. O Alzate, "Procesamiento de alimentos", 1ª ed. Sede Manizales: Universidad Nacional de Colombia, (2003). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11607>

[11] W. M. Rohsenow, J. R. Hartnett y Y.I. Cho, "Handbook of heat transfer", 3rd ed. New York: McGraw-Hill, (1998). https://acortar.link/handbook_of_HeatTransfer

[12] T. Matsopoulos, The European Southern Observatory (ESO), (2016).

https://www.eso.org/public/spain/videos/Thermal_radiation/?lang

[13] Python Software Foundation, (2022). Python (V2, 3.11.1). <https://www.python.org/doc/>

[14] J. VanderPlas. "Python Data Science Handbook: Essential tools for working with data", 1rd ed. 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472: O'Reilly Media, Inc.,. (2016). [Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data - Jake VanderPlas - Google Libros](https://www.pythondatasciences.com/)

[15] E. Mirambell, "Criterios de diseño en puentes de hormigón frente a la acción térmica ambiental (Universitat Politècnica de Catalunya)", (1987). <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5914/TEMA5de5.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

[16] J. L Calmon, "Estudio térmico y tensional en estructuras masivas de hormigón. Aplicación a las presas durante la etapa de construcción (Universitat Politècnica de Catalunya)", (1995). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=243925>

[17] M. Emerson, "The calculation of the distribution of temperature in Bridges", (1973). <https://trid.trb.org/view/137561>

[18] L. Agulló Fité, A. Aguado and E. Mirambell, "Comportamiento térmico de presas de hormigón en servicio", Monograph CIMNE (1995). [https://www.scipedia.com/public/Agullo et al 2019a](https://www.scipedia.com/public/Agullo_et_al_2019a)

[19] Solargis. Data provided by "Global Solar Atlas 2.0".

<https://globalsolaratlas.info>

(2012).

<https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.01>

[20] M. H. Ali and I. Abustan, "A new novel index for evaluating model performance". Journal of Natural Resources and Development, 04: 1-9

Derechos de Autor (c) 2023 David Espinosa Gómez, Luis Bernardo López Sosa, Alejandro Adrián Sepúlveda Cisneros, Kevin Aldair Méndez Alfaro



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)