

Gestión de proyectos para el desarrollo de un prototipo de reactor solar en Guadalajara (México)

Project management for the development of a solar reactor prototype in Guadalajara (Mexico)

Alán Gerardo Jardón-Medina^{1*}  <https://orcid.org/0000-0002-3940-9378>

Recibido 26 de September de 2023, aceptado 28 de diciembre de 2023

Received: September 26, 2023 Accepted: December 28, 2023

RESUMEN

La gestión de proyectos permite planificar los procesos, los productos y los servicios necesarios para el desarrollo de cálculos de transferencia de calor. En esta investigación se desarrolló un prototipo de reactor solar con un alcance de temperatura de operación de 170 a 240 °C, mediante el despliegue de ciclos de vida de proyectos y la irradiancia recibida en Guadalajara (México). Se aplicó la gestión de proyectos en sus procesos de inicio, planificación, ejecución, monitoreo y cierre. Un colector solar, diseñado conceptualmente, captó la radiación asumiendo una irradiancia de 1000 W/m². Los procesos de inicio se usaron para estimar la temperatura en la cámara del reactor por cálculos de transferencia de calor por radiación, convección y conducción. Los procesos de planificación, ejecución y monitoreo se utilizaron para desarrollar el prototipo y los de cierre para validar su funcionamiento mediante mediciones de temperatura e irradiancia solar. El prototipo de reactor solar aportó evidencia sobre su capacidad para alcanzar una temperatura promedio de 188 °C en estado estacionario y para recibir una irradiancia media de 1260 W/m² en otoño. Los cálculos de transferencia de calor son válidos para desarrollar reactores que funcionan mediante energía solar, siendo de utilidad en zonas geográficas con irradiancias similares.

Palabras clave: Colectores solares, diseño de proyectos, energía solar, proyectos piloto, transferencia térmica.

ABSTRACT

Project management allows the planning the processes, products, and services necessary for the development of heat transfer calculations. This research developed a solar reactor prototype with an operating temperature range of 170 to 240 °C by deploying project life cycles and the irradiance received in Guadalajara (Mexico). Project management uses the processes of initiation, planning, execution, monitoring, and closure. A conceptually designed solar collector captured the radiation, assuming an irradiance of 1000 W/m². The startup processes were used to estimate the temperature in the reactor chamber by transfer heat calculations (radiation, convection, and conduction). The planning, execution, and monitoring processes were used to develop the prototype, and closing processes were used to validate its operation through temperature and solar irradiance measurements. The solar reactor prototype provided evidence of its ability to reach an average temperature of 188 °C in a steady state and to receive an average irradiance of 1260 W/m² in autumn. Heat transfer calculations are valid for developing reactors that work with solar energy and are helpful in geographical areas with similar irradiances.

Keywords: Pilot projects, project design, solar collectors, solar energy, thermal transfer.

¹ Universidad Internacional Iberoamericana. Área de proyectos medio ambiente, calidad y prevención. Campeche, México.

* Autor de correspondencia: alanjardon@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Gestión de proyectos

La gestión de proyectos es un proceso que contribuye a la aplicación de los conocimientos, las habilidades, las herramientas y las técnicas necesarias para solventar las actividades de un trabajo. Concretamente, esta gestión se produce mediante cinco grupos de procesos: el inicio, la planificación, la ejecución, el monitoreo y control y el cierre [1]. El ciclo de vida de un proyecto se guía por fases que dividen al proyecto en entregables intermedios y que proporcionan un marco de referencia para dirigirlo. Este ciclo, a su vez, tiene un enfoque adaptativo que se desarrolla tras múltiples iteraciones que aumentan el entendimiento del producto a desarrollar. El alcance de estos procesos, además, se detallan al inicio de cada iteración.

La propuesta de esta investigación, construida mediante la metodología de gestión de proyectos y el uso de cálculos de transferencia de calor, permite diseñar y desarrollar un prototipo de reactor solar sin necesidad de utilizar simuladores complejos. Las correlaciones consideran un reactor de forma cilíndrica que funciona a presión atmosférica con el aire circundante o al vacío, en cuyo caso se introducen conexiones para la conducción de gases hacia un condensador. Del mismo modo, la metodología contempla la irradiación solar incidente, las condiciones ambientales y la temperatura de operación que se alcanza en la cámara del reactor.

Irradiancia en la zona del reactor solar

Guadalajara (México) se localiza entre las coordenadas geográficas: sur 20° 36' 13,464" (20.603740°), norte 20° 45' 9.2448" (20,752568°) de latitud norte, este 103° 15' 58,6656" (103,263764°) y oeste 103° 24' 25,218" (103,407005°) de longitud oeste. Esta zona geográfica está influenciada por climas cálidos la mayor parte del año, con temperaturas mayores a 18 °C. Esto favorece la captación de energía emitida por el sol recibiendo más de 270 días al año un promedio mínimo de nueve horas de sol y 5.57 kW h/m²/día, siendo ideal para el uso de energía solar y para la producción eléctrica [2]. González-Salazar *et al.*, citados en Ulloa-Godínez *et al.* [2], indicaron que la irradiancia de la zona metropolitana de Guadalajara puede alcanzar hasta 600,5 cal/cm²/día en mayo (primavera), 446,8 cal/cm²/día en octubre, 411,4 cal/cm²/día en noviembre y 343,3 cal/cm²/día en diciembre.

Equipos solares

Los equipos solares pueden funcionar con elementos sencillos que se construyen con elementos simples. Amar-Gil *et al.* [3] construyeron un reactor a partir de una lata de pintura (1 mm de espesor x 8,5 cm de diámetro externo x 10 cm de altura) y lo recubrieron con fibra de vidrio para aislarlo térmicamente. Además, como fuente de calor usaron un fogón de gas natural doméstico. Al reactor se le adaptó una manguera para retirar los vapores producidos en el proceso, que fue enfriada previamente y que se condujo a un sistema de enfriamiento. Esto evitó la acumulación de condensados y ayudó a mantener una pendiente a la salida del producto y a recolectar en recipientes de vidrio el producto líquido. Finalmente, como se observa en la Figura 1, se generaban productos gaseosos no condensables.

Colector solar

La energía solar se absorbe por medio de dos tubos de vidrio (uno interior y uno exterior) que generan un vacío para disminuir las pérdidas de calor. Los tubos suelen fabricarse de boro silicato, por sus condiciones ópticas y por su resistencia mecánica [4].

Transferencia de calor por convección desde una superficie cilíndrica horizontal

La transferencia de calor por convección desde una superficie cilíndrica horizontal se estima por medio de las siguientes ecuaciones [1]-[5]:

$$Q_{convección} = hA_o(T_o - T_{\infty}) \quad (1)$$

$$h = \frac{k}{D_o} Nu \quad (2)$$

$$Nu = \left[0,6 + \frac{0,387 Ra_a^{1/6}}{\left[1 + \frac{0,559}{Pr} \right]^{8/27}} \right]^2 \quad (3)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_o - T_{\infty})D_o^3}{\nu^2} Pr \quad (4)$$

En la que:

h = coeficiente de transferencia de calor desde una superficie cilíndrica.

A_o = área de transferencia por convección.

T_o = temperatura de la superficie cilíndrica.

T_{∞} = temperatura ambiente.

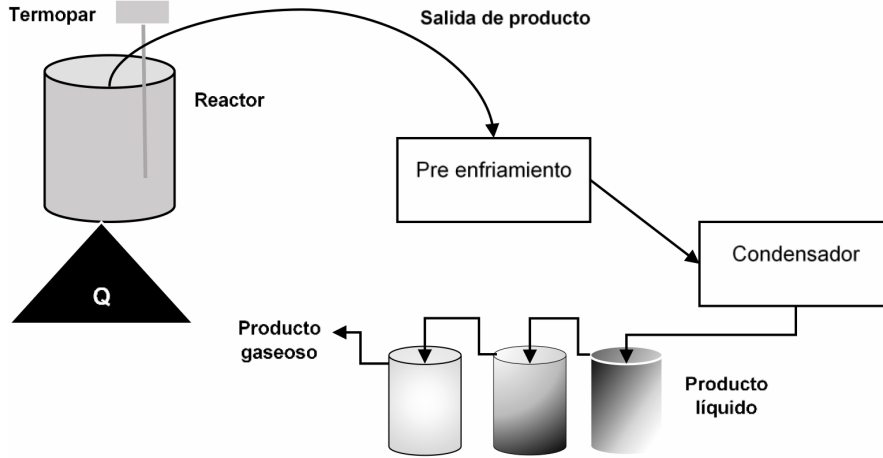


Figura 1. Esquema de reactor por lotes. Fuente: adaptado de Amar-Gil *et al.* [3].

k = conductividad del medio de transferencia (W/m K).
 Do = diámetro exterior del colector.
 Nu = número de Nusselt.
 Ra = número de Rayleigh.
 g = gravedad (9,8 m/s²).
 β = coeficiente de expansión volumétrica del aire.
 ν = viscosidad cinemática.
 Pr = número de Prandt.

Las propiedades del fluido β , k , ν , Pr deben evaluarse a la temperatura promedio.

Transferencia de calor por radiación

El calor por transferencia de radiación desde una superficie y para dos cilindros concéntricos se calcula mediante la siguiente ecuación [5]:

$$Q_{0,rad} = \epsilon_0 \sigma A_0 (T_0^4 - T_\infty^4) \quad (5)$$

$$Q_{i,rad} = \frac{\sigma A_i (T_i^4 - T_0^4)}{\frac{1}{\epsilon_i} + \left(\frac{1 - \epsilon_0}{\epsilon_0} \right) \left(\frac{D_i}{D_0} \right)} \quad (6)$$

En la que:

$Q_{0,rad}$ = transferencia de calor por radiación desde una superficie.
 $Q_{i,rad}$ = transferencia de calor por radiación para dos cilindros concéntricos.
 ϵ = emisividad del material involucrado.
 σ = constante de Boltzman = 5,67 x 10⁻⁸ W/m² K⁴.
 A_o = área de transferencia por convección.

T_o = temperatura en el cilindro exterior.
 Do = diámetro del cilindro exterior.
 T_∞ = temperatura ambiente.
 T_i = temperatura en el cilindro interior.
 Di = diámetro del cilindro interior.

Transferencia de calor por convección y conducción entre dos cilindros

La razón de la transferencia de calor a través del espacio anular entre dos cilindros por convección natural entre ellos se expresa mediante la siguiente ecuación [5]:

$$Q = \left[\frac{2\pi k_{ef}}{\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)} \right] (T_i - T_o) \quad (7)$$

$$K_{ef} / k = 0,386 \left[\frac{Pr}{0,861 + Pr} \right]^{1/4} [F_{cil} Ra_L]^{1/4} \quad (8)$$

$$F_{cil} = \frac{\left(\ln \frac{D_o}{D_i} \right)^4}{Lc^3 \left(D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5} \right)^5} \quad (9)$$

$$Ra_L = \frac{g\beta (T_i - T_o) Lc^3}{\nu^2} Pr \quad (10)$$

$$Lc = \frac{(D_o - D_i)}{2} \quad (11)$$

En la que:

Q = transferencia de calor a través de espacio anular entre dos cilindros por convección.

K_{ef} = conductividad efectiva.

k = conductividad del medio de transferencia.

T_o = temperatura en el cilindro exterior.

D_o = diámetro del cilindro exterior.

T_i = temperatura en el cilindro interior.

D_i = diámetro del cilindro interior.

Pr = número de Prandt.

F_{cil} = factor para cilindros concéntricos.

Ra_L = número de Rayleigh.

L_c = longitud característica.

g = gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$).

β = coeficiente de expansión volumétrica del aire.

ν = viscosidad cinemática.

Transferencia de calor por conducción a través de una pared cilíndrica

La transferencia de calor por conducción mediante una pared cilíndrica se estima con las siguientes ecuaciones [5]:

$$Q = \frac{T_{ir} - T_i}{R_{cil}} \quad (12)$$

$$R_{cil} = \frac{\ln(r_i/r_{ir})}{2\pi Lk} \quad (13)$$

En la que:

Q = transferencia de calor por conducción a través de una pared cilíndrica.

R_{cil} = factor de resistencia de la pared cilíndrica.

T_{ir} = temperatura interior del reactor.

T_i = temperatura exterior.

r_i = radio exterior del reactor.

r_{ir} = radio interior.

L = longitud del reactor.

k = conductividad térmica del cobre.

METODOLOGÍA

Colector solar

El colector solar es un tubo evacuado al alto vacío, marca Siesol modelo 47-1500 y fabricado en boro silicato con nitrato de aluminio y cobre. Este colector solar soporta temperaturas de 300°C , con un diámetro exterior de 58 mm, un diámetro interior de 47 mm, una longitud 1,5 m y una capacidad aproximada de 2 L. El tubo de vidrio colecta la energía solar y logra una mayor incidencia solar. En este estudio se ubicó en una estructura a 30° respecto a la horizontal.

Propuesta inicial

Esta propuesta se realizó a partir de una revisión de la literatura, en la que se exploraron elementos para construir de manera simple un reactor [3] y para reconocer el funcionamiento del colector solar [4]. El prototipo de reactor operó por lotes y se impulsó con energía solar. Debido a que el reactor se ubicó dentro del colector, algunas variables se limitaron según el tamaño del colector y se fijaron las siguientes:

- Forma del reactor: cilíndrica con diámetro exterior de 25,4 mm; y largo: 0,5 m.
- Material: cobre pulido calibre 14.
- Temperatura del medio ambiente: 25°C .

El reactor se selló por uno de sus extremos y por el otro se enroscó para crear una tapa con una salida hacia un depósito que permitía coleccionar los condensados y con una entrada que posibilitaba incluir un termómetro. A la salida se le podían adaptar conexiones para incluir una bomba de vacío manual para operación con presión negativa (ver Figura 2).

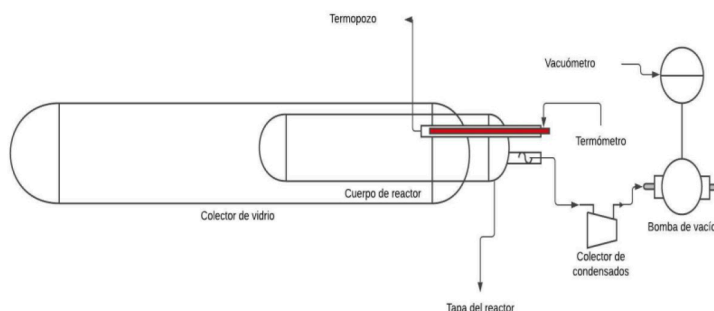


Figura 2. Propuesta de prototipo funcional de reactor solar.

El colector capta la energía por transferencia de calor mediante radiación solar y después el aire caliente transfiere su calor al reactor por convección. Finalmente, por transferencia del calor conducido a través de las paredes del reactor se calentaba la cámara del reactor.

Gestión de proyectos

La gestión de proyectos se dividió en tres etapas, que incluyen los cinco procesos de gestión:

- Etapa 1. La verificación de la propuesta de diseño de reactor solar, que requería que se alcanzaran de 170 a 240 °C. En esta etapa se consideraron los procesos de inicio.
- Etapa 2. La construcción de esta propuesta, una vez comprobada. En esta etapa se tuvieron en cuenta los procesos de planificación, de ejecución, de monitoreo y de control.
- Etapa 3. La validación de la temperatura de operación y su correlación con la irradiancia en el momento de las pruebas. En esta etapa se contemplaron los procesos de cierre.

En la Figura 3 se presenta un diagrama de flujo de la metodología.

Verificación de la propuesta de diseño

El balance de energía integral del sistema en estado estacionario fue:

$$Q_{\text{radiación}} = Q_{\text{perdido_colector}} = Q_{\text{perdido_reactor}} = Q_{\text{cámara}} \quad (14)$$

Donde:

$Q_{\text{radiación}}$	=	Calor incidente por radiación.
$Q_{\text{perdido_colector}}$	=	Calor perdido del colector hacia los alrededores.
$Q_{\text{perdido_reactor}}$	=	Calor perdido del reactor hacia el colector.
$Q_{\text{cámara}}$	=	Calor en la cámara del reactor.

El término estacionario significa que no se produce ningún cambio en la temperatura y en el flujo de calor con el tiempo en una ubicación específica. Por ejemplo, la transferencia de calor a través de las paredes del colector hacia la cámara del reactor es estacionaria cuando las condiciones permanecen constantes durante varias horas. Se realiza el análisis en régimen estacionario puesto que permite determinar si el reactor logrará su temperatura de operación en las peores condiciones supuestas (por

ejemplo, con un mínimo de irradiancia). Por este motivo, la ecuación (14) se resuelve por el uso de ecuaciones de transferencia de calor por radiación, convección y conducción en las que adicionalmente, se considera la geometría del reactor propuesto.

En la zona metropolitana de Guadalajara (Jalisco, México) se estima en octubre una irradiancia de 446,8 calorías/cm²/día [2], con irradiancia de una hora solar pico de 1000 W/m². Si se considera la irradiancia de una hora solar de 1000 W/m², en otoño se calcula un promedio de 5,2 horas solar pico (HSP) de 1000 W/m², cantidad suficiente para que funcione el reactor solar. Con la irradiancia y el área efectiva expuesta del colector se calcula la energía incidente en el colector. En estado estacionario, esa energía debe ser la misma que la energía perdida desde la superficie del colector por convección y por radiación, así como debe ser la misma que la energía perdida por el reactor hacia la superficie del colector por convección y por radiación.

- Estimar la energía perdida desde la superficie del colector por convección y por radiación para conocer la temperatura en la superficie del reactor. Se asume una temperatura en la superficie del colector, iniciando con 100 °C, y se realizan iteraciones.
- Obtener la media entre la temperatura ambiental y la asumida en superficie del colector y de las propiedades del aire (β , k , ν , Pr) a esa temperatura.
- Calcular el número de Rayleigh con la ecuación (4), el número de Nusselt con la ecuación (3), el coeficiente de transferencia de calor por convección con la ecuación (2), la pérdida de calor desde la superficie del colector por convección con la ecuación (1) y la pérdida por radiación con la ecuación (5).
- Sumar el calor perdido por convección y la radiación desde la superficie del colector. Si este calor perdido es aproximadamente igual a la energía incidente en el sistema, entonces la temperatura en la superficie del colector es correcta; de lo contrario, se realizan iteraciones hasta encontrar la solución.

Una vez obtenida la temperatura en la superficie del colector, se estima la energía perdida desde la superficie del reactor por convección y por radiación hacia la superficie del colector. Para ello, se asume

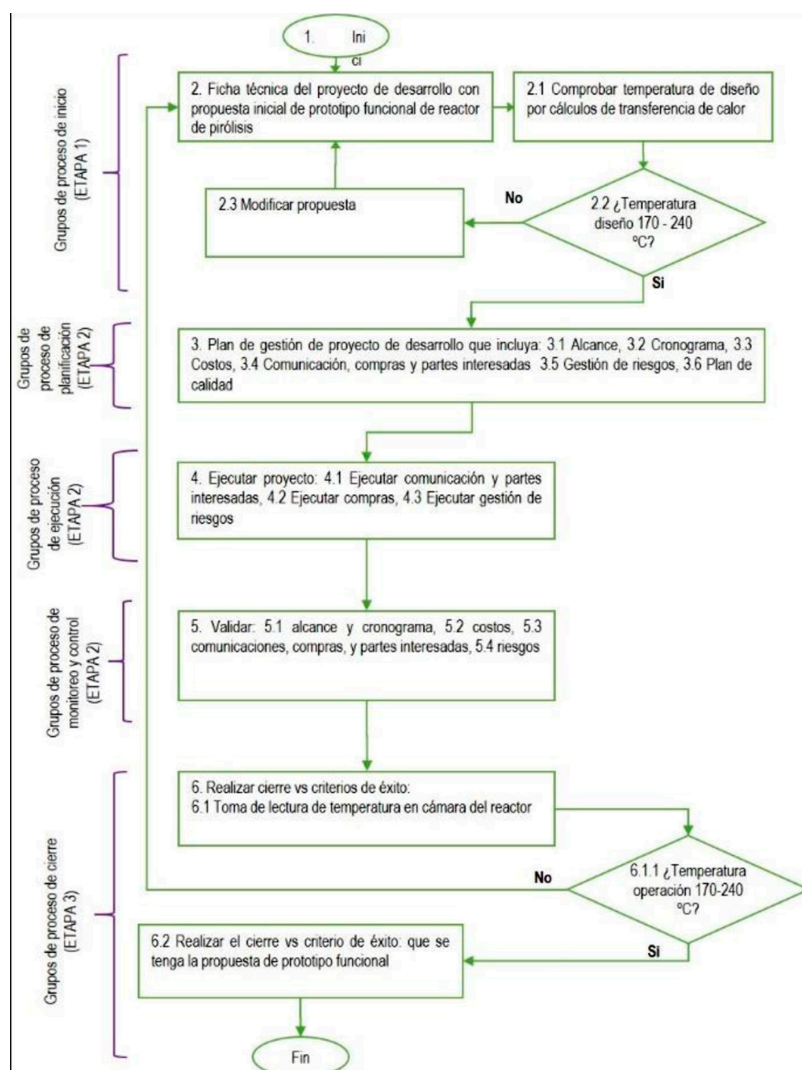


Figura 3. Diagrama de flujo de metodología.

una temperatura inicial en superficie del reactor de 240 °C y se realizan iteraciones.

- Obtener el promedio entre la temperatura de la superficie del colector T_o y la asumida del exterior del reactor, así como de las propiedades del aire que rodea al reactor y el contenido del colector (β , k , ν , Pr) a esa temperatura.
- Estimar la longitud característica con la ecuación (11), el factor de cilindros concéntricos con la ecuación (9), el número de Raleigh con la ecuación (10), la conductividad térmica con la ecuación (8), la razón de pérdida de calor entre 2 cilindros concéntricos por convección con la

ecuación (7) y la pérdida por radiación con la ecuación (6).

- Sumar el calor perdido por convección y radiación entre dos cilindros concéntricos. Si la pérdida de calor anterior es aproximadamente igual a la energía incidente en el sistema, entonces la temperatura en la superficie del reactor es correcta. Si la energía incidente es menor que las pérdidas implican que la temperatura asumida en superficie del reactor debe ser menor; de lo contrario, se realizan iteraciones hasta encontrar la solución.
- Calcular la temperatura en la cámara del reactor con la ecuación (12) y la ecuación (13).

Construcción o desarrollo de la propuesta

Se elabora un plan de gestión del proyecto que está dividido en cinco procesos: (1) la planificación del alcance, (2) la planificación del cronograma, (3) la planificación de la gestión de costos, (4) la planificación de la gestión de la comunicación, compras y partes interesadas y (5) la planificación de la gestión de los riesgos. Todos los procesos anteriores se ejecutaron para desarrollar el prototipo de reactor solar.

Validación de la temperatura de operación y su correlación con la irradiancia

Para los procesos de cierre se validó el cumplimiento de la temperatura de operación. Además, se utilizó un termómetro digital (termopar tipo K marca TEKCOPLUS modelo THE-27, resolución 0,1 °C), cuyo sensor se ubicó en el centro del reactor solar. Simultáneamente, y con una frecuencia de cada 15 minutos, se realizaron mediciones de irradiancia usando un equipo SM-206 SOLAR, resolución 0,1 W/m², error +/- 10 W/m². Se ejecutaron tres ciclos en días diferentes para revisar la repetibilidad del funcionamiento, procurando que las condiciones ambientales fueran similares y que la irradiancia media fuera superior a 1000 W/m². La variable independiente fue la irradiancia y la variable dependiente fue la temperatura de operación. La influencia de cada factor se ajustó mediante una regresión múltiple, lo que permitió obtener las condiciones de los factores que proporcionaban los mejores valores de la variable de respuesta. Estos análisis se realizaron con el apoyo del Minitab ® 2020 Statistical Software.

RESULTADOS

Verificación de la propuesta inicial

La irradiancia solar pico para el diseño fue de 1000 W/m², con incidencia efectiva del 70% de la superficie $A_0 = \pi (0,058 \text{ m}) (0,5 \text{ m}) (0,7) = 0,06377 \text{ m}^2$; es decir: $Q_{\text{radiación}} = (1000 \text{ W/m}^2) (0,06377 \text{ m}^2) = 63,77 \text{ W}$. Ver las iteraciones para estimar la temperatura en el colector en la Tabla 1.

En la tercera iteración las pérdidas por radiación y por convección desde la superficie del colector fueron de 63,77 W, igual a la energía incidente en los colectores. Además, la temperatura en la superficie del colector fue de 80,55 °C (353,55 K). Con esa temperatura de la superficie del colector se realizó un proceso similar para determinar la temperatura en la pared externa del reactor. Las iteraciones para su cálculo se describen en la Tabla 2.

En la tercera iteración las pérdidas por radiación y por convección, desde el exterior del reactor hacia la superficie del colector, fue de 63,76 W y la energía incidente de 63,77 W. Además, la temperatura en la superficie del reactor fue de 189,6 °C (462,6 K). Por conducción, el interior del reactor logró 189,61 °C en estado estacionario.

Construcción o desarrollo de la propuesta

Se realizaron los procesos de ejecución, construyendo el prototipo de reactor (Figura 4).

El plan de gestión de proyectos, así como su ejecución y su monitoreo posibilitaron que se desarrollara el

Tabla 1. Iteraciones de temperatura en la superficie del colector.

	1ª iteración	2ª iteración	3ª iteración
Temperatura del colector, T_0 (K)	373	363	353,55
Temperatura media (K)	335,5	330,5	325,78
Coefficiente expansión, β (1/K)	0,00298	0,003025	0,003069
Conductividad, k (W/ m K)	0,028262	0,027897	0,027552
Viscosidad cinemática, ν (m ² /s)	$1,92 \times 10^{-5}$	$1,87 \times 10^{-5}$	$1,83 \times 10^{-5}$
Número de Prandtl, Pr	0,719575	0,72085	0,722078
Número de Rayleigh	833706	774138	706712
Número de Nusselt	13,84	13,56	13,22
Coefficiente convección, h (W/m ² K)	6,74	6,52	6,28
Calor perdido convección (W)	46,08	38,62	31,79
Calor perdido radiación (W)	47,40	39,16	31,98
Pérdida desde superficie (W)	93,48	77,78	63,77

Tabla 2. Iteraciones de temperatura en la superficie del reactor.

	1ª iteración	2ª iteración	3ª iteración
Temperatura del reactor (K)	513	488	462,6
Temperatura media (K)	433,28	420,78	420,68
Coefficiente expansión, β (1/K)	0,002308	0,0023765	0,002450
Conductividad, k (W/ m K)	0,035128	0,034827	0,033397
Viscosidad cinemática, ν (m ² /s)	$2,978 \times 10^{-5}$	$2,831 \times 10^{-5}$	$2,69 \times 10^{-5}$
Número de Prandt, Pr	0,701369	0,702856	0,70488
Número de Rayleigh	8694	8368	7777
Factor cilindro, F_{cil}	0,147	0,147	0,147
Conductividad, K_{ef} (W/ m K)	0,066	0,064	0,061
Calor perdido convección (W)	95,85	78,15	60,66
Calor perdido radiación (W)	5,51	4,22	3,1
Pérdida desde reactor (W)	101,36	82,37	63,76



Figura 4. Partes y ensamble del prototipo funcional de reactor solar.

prototipo de reactor solar en tiempo y forma según el cronograma, los costos y los acuerdos con los proveedores y con las partes interesadas.

Validación de la temperatura de operación y su correlación con la irradiancia

Las mediciones de temperatura de operación del reactor solar se realizaron durante octubre, mes en el que se presentó nubosidad. En esas condiciones el prototipo logró cumplir el criterio de aceptación. En la Tabla 3 se presenta el resumen de las lecturas promedio de temperatura de operación y media del registro de irradiancia, registradas en los ciclos de operación. En la Figura 5 se muestra la curva de la temperatura de operación del reactor solar con respecto al tiempo y en la Figura 6 se muestra la curva de irradiancia con respecto al tiempo.

Las condiciones estacionarias se alcanzaron aproximadamente al minuto 100, con una temperatura media de operación de 188 °C y con una irradiancia media de 1260 W/m². Las condiciones ambientales medias en esas condiciones fueron de 28.5 °C y de 55% de humedad relativa.

Se realizó un análisis de regresión con transformación de Box-Cox $\lambda = 2$ para correlacionar la temperatura de operación del reactor con la irradiancia, aplicando el siguiente método: λ redondeado = 2; λ estimado = 2,21308; IC de 95% para λ (1.58458; 3.12858). Los coeficientes para la respuesta transformada se indican en la Tabla 4.

La ecuación (15) para la temperatura de operación (T) en función de irradiancia (I) fue:

Tabla 3. Temperatura de operación y registro de irradiancia.

Tiempo minutos	Irradiancia W/m ²	Temperatura operación °C	Temperatura ambiente °C	% HR ambiente
0	729	29	22	65
15	810	110	22	65
30	893	130	23	66
45	980	140,3	23	66
60	1100	151	24	65
75	1210	160	25	66
90	1230	173	26	63
105	1250	181	25	64
120	1270	183	26	64
135	1280	186,2	25	61
150	1283	187	28	59
165	1290	187	28	59
180	1273	189,7	30	53
195	1290	195,1	30	53
210	1250	194	32	46
225	1212	190,5	31	47
240	1215	190,6	30	47

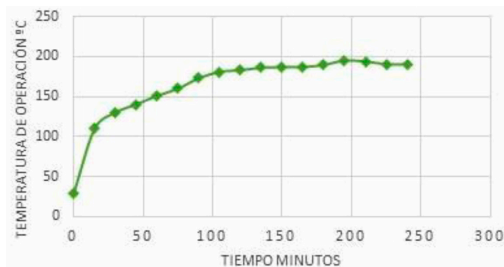


Figura 5. Temperatura de operación respecto al tiempo.

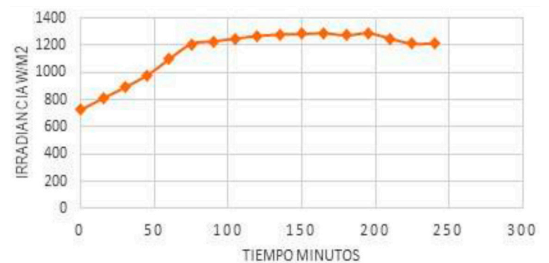


Figura 6. Irradiancia con respecto al tiempo.

Tabla 4. Coeficientes de respuesta.

Término	Coefficiente	EE coeficiente	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-35846	5039	-7,11	0,000	
Irradiancia	55,83	4,33	12,90	0,000	1.00

$$T = \sqrt[3]{55.83I - 35846} \quad (15)$$

Como se observa en la Tabla 5, el resumen del modelo para respuesta transformada mostró una correlación adecuada.

Tabla 5. Resumen del modelo.

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (predicho)
3155,75	91,73%	91,18%	88,58%

DISCUSIÓN

Los colectores para transferir la energía solar se han desarrollado mediante un lecho absorbente que permite el calentamiento de aire. Albizzati y Rossetti [6], por ejemplo, diseñaron un colector solar formado por láminas de nylon, por una cámara de aire y por un lecho absorbente de virutas de acero pintadas de negro mate. En este proceso el aire pasaba por este colector y se calentaba. Las mediciones de temperatura de este esquema fueron:

aire de entrada (80 °C), aire de salida de (95 °C) y lecho absorbente (93 °C). En el transcurso del tiempo las temperaturas decrecieron hasta que en los 120 minutos se encontraban alrededor de 70 a 75 °C, lo que indicó un cierto grado de estabilización del sistema. Estos mismos autores indicaron un coeficiente de pérdidas de $2,22 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y una eficiencia térmica que al inicio estaba en 0,75, pero que a los 120 minutos se reducía a 0,42.

Esos resultados contrastan contra el reactor solar desarrollado en esta investigación, que alcanzó una media de 188 °C a los 100 minutos, con un error de -0,84% respecto al cálculo esperado. La eficiencia térmica de nuestro reactor solar fue de 0,77 en condiciones estacionarias, aprovechándose una energía útil de 981 W/m^2 ($62,6 \text{ W} \div 0,06377 \text{ m}^2$). La incidencia solar fue de 1260 W/m^2 . Además, se estimó que las diferencias entre las temperaturas alcanzadas y las eficiencias térmicas estaban relacionadas principalmente con la capacidad calorífica de los materiales utilizados, así como a la diferente disposición de los elementos de colector-reactor empleados. Sin embargo, por la misma disposición, este reactor solar perdió más rápido el calor, estimándose un coeficiente de pérdidas de $3,69 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

En Colombia [7] para la industria de la curtiduría, se construyeron ocho colectores solares en paralelo mediante las que circulaban agua, con superficies de aluminio con excelentes propiedades ópticas y térmicas. Se estimó una eficiencia de 0,712 y se lograron temperaturas de agua de 37,9 °C que podían incrementar en el área efectiva de colectores. Finalmente, se concluyó que podían superar los 85 °C con 10 colectores. Aunque la eficiencia de estos colectores es consistente con el reactor solar propuesto, la temperatura alcanzada es menor debido a las diferencias de fluidos. Del mismo modo, las áreas efectivas de los colectores y de las superficies en contacto con el fluido a calentar fueron consistentes, ya que de la disposición de estos elementos se deriva la efectividad de una solución de un equipo solar.

Existe concordancia con investigaciones en las que los equipos impulsados con energía solar requieren de zonas geográficas con grandes irradiancias y en las que el desempeño está afectado por la incidencia solar [8], [9], [10]. Muñoz *et al.* [9] evaluaron mediante

fluido aire el comportamiento de temperaturas en un colector solar de lecho de rocas. En este estudio se alcanzó temperaturas a la salida del equipo de 40 a 50 °C en función de la irradiancia y se indicó que los colectores solares no se debían construir con longitudes mayores a 7 metros, considerando que el incremento de temperatura por cada metro de colector disminuía en un 70%. Esto es relevante por el incremento de las pérdidas según la superficie del colector. Aunque el colector de esta investigación tiene una longitud de 1,5 m, es necesario que futuras investigaciones indaguen la posibilidad de modificar la configuración, incrementando el diámetro sin añadir más superficie a costa de la longitud del colector.

Torres-Gallo *et al.* [11] diseñaron, construyeron y evaluaron un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar para el secado de yuca. En ese estudio lograron mantener temperaturas de aire de secado de 42 a 54 °C durante 10 horas y 45 minutos, con una eficiencia de 0,44. Las diferencias en la eficiencia se identificaron según del porcentaje de humedad del insumo a secar, por lo que en el reactor solar propuesto también se consideró la humedad del propósito de uso. En la presente investigación se lograron tiempos de funcionamiento mayores a 10 horas. Esto se debe a que se explicó un sistema híbrido en el que no solo se usó la transferencia de calor solar, sino que también se aprovechó la combustión de biomasa. Finalmente, el equipo de reactor solar es compatible con diferentes aplicaciones [12] como, por ejemplo, para la producción de agua caliente o vapor; para la desintoxicación de fluidos; y para el desarrollo de procesos de secado o de calentamiento de espacios, entre otros.

El costo del diseño y desarrollo del reactor solar fue de 900 USD (aproximadamente 17,850 MXN), los cuales fueron erogados en un periodo de 9 semanas conforme se indica en la Figura 7. Los costos más significativos fueron los relativos a la compra de materiales para la construcción y servicios de recolección, instalación, monitoreo y pruebas.

El costo-beneficio del reactor está en función del producto de pirólisis a obtener, su producción; así como en su precio [13]. Asimismo, su costo-beneficio puede ser apreciado por el uso que se den a sus productos; por ejemplo, se ha reportado el uso de

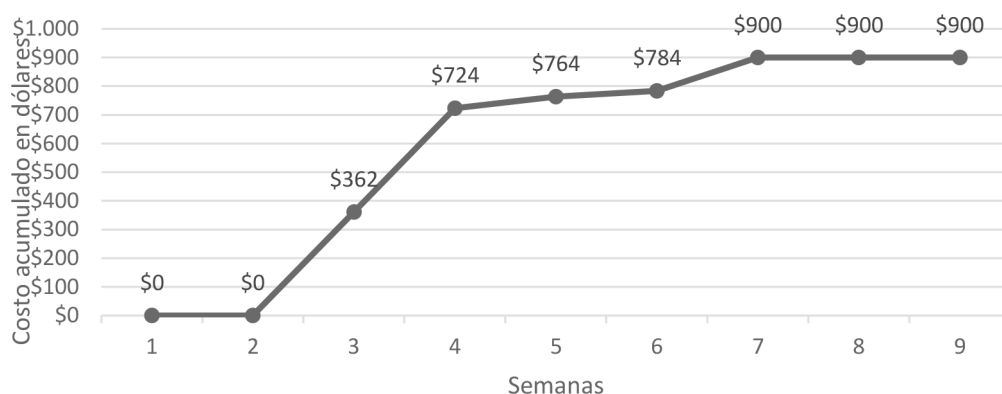


Figura 7. Costo acumulado del diseño y desarrollo del reactor solar.

biocarbón como mejorador de suelos o como alimento en piscicultura en sistemas integrados de cultivo de arroz y peces; ya que mejora significativamente el peso y longitud de tilapias; así como el crecimiento de arrozales [14].

CONCLUSIONES

En este estudio se diseñó y se desarrolló un reactor solar con un alcance de temperatura de operación de 188 °C, con una irradiancia de 1260 W/m² en la zona metropolitana de Guadalajara y con un fluido aire con una eficiencia de 0,77. Para ello, se recurrió a la aplicación de ciclos de vida iterativos y se utilizaron los grupos de proceso de la gestión de proyectos La aplicación de la gestión de proyectos para la planificación de actividades fue esencial para la comprensión del diseño y su verificación, así como para el desarrollo y su respectiva validación. Con la gestión de este proyecto, se obtuvo un prototipo de reactor solar con materiales sencillos y no peligrosos, como lo es un colector solar de boro silicato, un reactor de cobre y aditamentos de plástico. Finalmente, este prototipo de reactor de pirólisis solar fue usado para procesar lirio acuático y transformarlo en biocarbón, el cual puede ser valorizado energéticamente por su poder calorífico superior de 17,56 MJ/kg o como medio de captura de carbono ya que presenta una proporción de 20,11% en peso de carbón fijo y 6,89 en su relación carbono-hidrógeno [15].

REFERENCIAS

[1] Project Management Institute, *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos*,

6ta. ed. Pennsylvania, USA: Editorial Project Management Institute, 2017.
 [2] H. Ulloa-Godínez, M.E. García-Guadalupe, A. Pérez, Á. Meulenert-Peña y D. Ávila-Ramírez, “Clima y radiación solar en las grandes ciudades: zona metropolitana de Guadalajara (Estado de Jalisco, México)”, *Investigaciones Geográficas*, vol. 56, pp. 165, 2011, doi.org/10.14198/ingeo2011.56.09.
 [3] S. Amar-Gil, A.N. Ardila-Arias y R. Barrera-Zapata, “Simulation and obtaining of synthetic fuels from the pyrolysis of plastic wastes”, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 37, no. 2, pp. 306-326, 2020, doi.org/10.14482/inde.37.2.1285.
 [4] L. Bérril-Pérez, and M. Álvarez-González, *Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares*, 1ra. ed. La Habana, Cuba: Editorial Cubasolar, 2008.
 [5] Y.A. Cengel, et al., *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*, 3ra. ed., Ciudad de México, México: Editorial McGraw-Hill Interamericana, 2007.
 [6] E. Albizzati y G. Rossetti, “Experiencia didáctica de calentamiento aprovechando la energía solar”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 6, pp. 37-42, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/80597>
 [7] S.A.F. Jaramillo, I.R. Tarquino y S.A.D. Jaramillo, “Instalación solar para calentamiento de agua de proceso aplicado a una industria de curtiembre, empleando materiales y topología de alta eficiencia desarrollados en Colombia”, *Revista Energía*

- y *Computación*, vol. 14, no. 2, pp. 41-48, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10893/1457>
- [8] J. Franco, S. Esteban y C. Fernández, “Calentamiento solar para un destilador multi etapa pasivo compacto”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 4, pp. 71-76, 2000. [En línea]. Disponible en: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/79078>
- [9] D.M. Muñoz, G. Cifuentes y C. Marín, “Comportamiento de la temperatura del flujo de aire en un absorbedor solar”, *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 7, no. 2, pp. 32-39, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/718>
- [10] M.F. Quiroga, E.J. Condorí, G.J. Durán y C.C. Martínez, “Sistema integrado de secado y acondicionamiento térmico de un sustrato de propagación”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 17, no. 1, p. 11, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/982>
- [11] R. Torres-Gallo, P.J. Miranda-Lugo y K.A. Martínez-Padilla, “Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico para secado de yuca”, *TecnoLógicas*, vol. 20, no. 39, pp. 69-81, 2017, doi.org/10.22430/22565337.693,
- [12] S. Agudelo-Flórez y A. Pineda-Ríos, “Aplicaciones de la energía solar en diferentes procesos agrícolas e industriales”, *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, vol. 27, pp. 83-89, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/326411>
- [13] T. Haeldermans, L. Campion, T. Kuppens, K. Vanreppelen, A. Cuypers, and S. Schreurs, “A comparative techno-economic assessment of biochar production from different residue streams using conventional and microwave pyrolysis,” *Bioresource Technology*, vol. 318, 2020, doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124083.
- [14] T. Najmudeen, M. Arakkal Febna, G. Rojith, and P. Zacharia, “Characterisation of Biochar from Water Hyacinth Eichhornia crassipes and the Effects of Biochar on the Growth of Fish and Paddy in Integrated Culture Systems,” *Journal of Coastal Research*, vol. 86, no. sp1, pp. 225-234, 2019, doi.org/10.2112/SI86-033.1.
- [15] A. Jardón-Medina y A. Ortiz-Fernández “Obtención y caracterización de biocarbón a partir de Eichhornia crassipes usando un prototipo de reactor de pirólisis solar”, *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 57, no. 1, pp. 1-23, 2022, doi.org/10.15359/rca.57-1.13.