



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Energía solar térmica para el Secado de Alfarería de
Barro en Ixtaltepec-México

presentada por

Ing. Sergio Vidaña Cano

como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. José Jassón Flores Prieto

Cuernavaca, Morelos, México. Mayo de 2024.

Cuernavaca, Mor.,
No. De Oficio:
Asunto:

17/abril/2024
SAC/136/2024
Autorización de
impresión de tesis

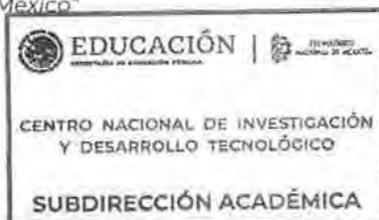
SERGIO VIDANA CANO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Energía solar térmica para secado de alfarería de barro en Ixtaltepec México”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
“Conocimiento y tecnología al servicio de México”



CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C. c. p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



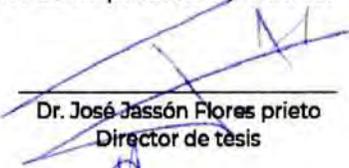
Cuernavaca, Mor., 09/abril/2024

OFICIO No. DIM/041/2024

Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Sergio Vidaña Cano con número de control M22CE036, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "Energía solar térmica para secado de alfarería de barro en Ixtaltepec México" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.


Dr. José Jassón Flores prieto
Director de tesis


Dr. Efraín Simá Moo
Revisor 1


Dr. Rafael Campos Amezcua
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
Iniciales RCA/mrsr

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a mis padres y a mi hermano por ser mi motivación a superar cualquier obstáculo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **Dios** la sabiduría y bendiciones que me brinda. A mis padres la **C. Miriam Cano Reyes** y el **C. Sergio Vidaña Saynes** por sus consejos y apoyo incondicional en mis proyectos, en especial para la realización de este posgrado. A mi hermano **Jesús †** por enseñarme el valor de la vida. Cada logro es dedicado a ti.

A la **Sra. Patricia** y su esposo el **Sr. José Luis** Por abrirme las puertas de su taller para desarrollar mi proyecto de tesis.

A los alfareros el **C. Carlos, Catalino, Rigoberto, Héctor y Rubén** por compartirme sus conocimientos y enseñarme la labor que implica la creación y el proceso de secado de las piezas de alfarería de barro.

Al **Dr. José Jassón Flores Prieto** por su profesionalismo y experiencia como director de mi proyecto de maestría, por sus consejos, comentarios y vivencias que me han ayudado a mi desarrollo personal.

A mis compañeros, **Jessica, Danier, Antonio** por los buenos momentos en el Lab Solar.

A mi comité revisor, el **Dr. Rafael Capos Amezcua** y el **Dr. Efraín Simá Moó** por sus comentarios y observaciones que contribuyeron a mi trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (**CONAHCYT**) por las facilidades para realizar mis estudios y por la Beca Nacional que fue de gran apoyo para el desarrollo de la investigación. Al Tecnológico Nacional de México-Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (**TecNM-CENIDET**) por abrirme las puertas al programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, y por su apoyo en la realización del proyecto de investigación, así como al personal docente, de apoyo y administrativo.

ÍNDICE GENERAL

Lista de figuras	I
Índice de tablas	II
Nomenclatura	III
Subíndices	IV
Letras griegas	IV
Acrónimos	V
Resumen	VI
Abstract	VIII
Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1 Motivación	2
1.2 Revisión literaria	2
1.3 Objetivos	6
1.4 Escritura de tesis	6
Capítulo 2	7
Materiales y método	7
2.1 Fundamentos teóricos	8
2.2 Caso de estudio	9
2.3 Metodología general	9
2.3.1 Recurso solar y condiciones climáticas del lugar de estudio	11
2.3.2 Método de estudio térmico	11
2.3.3 Método de estudio económico	15
Capítulo 3	17
Estrategias de solución	17
3.1 Calentador solar (referencia)	18
3.2 Construcción del simulador en TRNSYS	18
3.3 Validación del simulador en TRNSYS	19
Capítulo 4	21
Resultados	21
4.1 Muestras de barro	22
4.2 Requerimientos energéticos (Ixtaltepec)	24

4.3 Desempeño térmico del calentador (propuesta tecnológica)	26
4.4 Evaluación económica	29
4.4.1 Costos nivelados específicos secado tradicional	29
4.4.2 Costos nivelados específicos de propuesta tecnológica	30
4.4.3 Tiempo de retorno de la Muestra 1	35
Capítulo 5	37
Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros	37
Conclusiones.....	38
Recomendaciones para trabajos futuros.....	40
Referencias	41

Lista de figuras

Figura 2.1. Metodología general para identificar la viabilidad de la energía solar térmica para el secado de artesanías de barro.....	10
Figura 2.2. Lugar de estudio Ixtaltepec-México.....	11
Figura 2.3. Temperatura promedio mensual.....	11
Figura 2.4. Humedad relativa promedio mensual.....	11
Figura 2.5. Irradiación del lugar de estudio.....	11
Figura 2.6. Modelo físico del sistema de secado.....	13
Figura 2.7. Metodología para desarrollar el análisis económico.....	15
Figura 3.1. Subrutinas auxiliares.....	18
Figura 3.2. Componentes de calentamiento directo de aire.....	19
Figura 3.3. Plataforma de simulación.....	19
Figura 3.4. Comparativo numérico-experimental de la temperatura de salida T_{o_coll} de los colectores de aire para el 13 de julio del 2020 de 11:00 a.m. a 16:00 p.m.....	20
Figura 4.1. Muestras representativas.....	22
Figura 4.2. Cinética de secado de la Muestra 1 (152.8 kg/lt).....	23
Figura 4.3. Cinética de secado de la Muestra 2 (360.0 kg/lt).....	23
Figura 4.4. Cinética de secado de la Muestra 3 (945.0 kg/lt).....	23
Figura 4.5. Humedad relativa y temperatura en el secado para los tres tipos de lotes.....	23
Figura 4.6. Porcentaje de humedad diario para la Muestra 1.....	24
Figura 4.7. Porcentaje de humedad diario para la Muestra 2.....	24
Figura 4.8. Porcentaje de humedad diario para la Muestra 3.....	24
Figura 4.9. Energía solar suministrada promedio por lote de secado.....	25
Figura 4.10. Energía específica promedio por lote de secado.....	25
Figura 4.11. Energía requerida promedio por lote de secado.....	25
Figura 4.12. Energía requerida promedio diario para la Muestra 1.....	26
Figura 4.13. Energía requerida promedio diario para la Muestra 2.....	26
Figura 4.14. Energía requerida promedio diario para la Muestra 3.....	26
Figura 4.15. Temperatura e irradiancia del calentador mínima, máxima y promedio de la Muestra 1.....	26
Figura 4.16. Temperatura e irradiancia del calentador máxima, mínima y promedio de la Muestra 2.....	27
Figura 4.17. Temperatura e irradiancia del calentador máxima, mínima y promedio de la Muestra 3.....	27

Índice de tablas

Tabla 3.1. Especificaciones del calentador solar de aire.....	18
Tabla 4.1. Consumo y desempeño energético para tres calentadores solares.....	28
Tabla 4.2. Análisis paramétrico del calentador para tres muestras características.....	28
Tabla 4.3. Evaluación económica con los costos nivelados del secado tradicional para tres muestras características.....	29
Tabla 4.4. Plataforma de evaluación económica del calentador solar para la Muestra 1.....	30
Tabla 4.5. Costos nivelados de la propuesta térmica para la Muestra 1.....	31
Tabla 4.6. Plataforma de evaluación económica del calentador solar para la Muestra 2.....	32
Tabla 4.7. Costos nivelados de la propuesta térmica para la Muestra 2.....	33
Tabla 4.8. Plataforma de evaluación económica del calentador solar para la Muestra 3.....	34
Tabla 4.9. Costos nivelados de la propuesta térmica para la Muestra 3.....	35
Tabla 4.10. Progresión anual de los costos nivelados del calentador solar y su valor actual para 91 lotes en paralelo anuales.....	36

Nomenclatura

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
a_0	Constante de la ecuación de eficiencia térmica del colector solar	(-)
a_1	Término lineal de la ecuación de eficiencia térmica del colector solar	$W/m^2 K$
a_2	Término cuadrático de la ecuación de eficiencia térmica del colector solar	$W/m^2 K^2$
A_c	Área de colectores	m^2
A_{sr}	Área de secado de referencia	m^2
$C_{p,ar}$	Calor específico	$kJ/kg K$
C_{OP}	Costo anual de operación y mantenimiento	\$
C_{st}	Costo del secado tradicional	$$/kg$
C_g	Costo de renta de galera	$$/kg$
C_m	Costo por mano de obra	$$/kg$
d	Días de secado	(-)
f_i	Flujo de caja	\$
$f_{(f-1)}$	Flujo de caja acumulado al año inmediato anterior	\$
h	Horas	h
$HR(t)$	Relación de humedad	(-)
h_{fg}	Entalpia de evaporación del agua	kJ/mol
I_d	Irradiancia diaria sobre la horizontal	MJ
I_{nv}	Inversión inicial	\$
k	Constante de secado	(-)
M	Contenido de humedad	$\%, w.b.$
M_w	Masa de agua a evaporar	kg
$M(t)$	Contenido de humedad	$\%, w.b.$
M_e	Contenido de humedad de equilibrio	$\%, w.b.$
M_o	Contenido de humedad inicial	$\%, w.b.$
N_c	Número de colectores	(-)
$N_{(N-1)}$	Promedio inmediato anterior	\$
P_{za}	Número de piezas	(-)
Q_d	Irradiación promedio diaria	MJ/m^2
Q_c	Carga de calentamiento requerida diaria	MJ
$Q_{s,ar}$	Radiación solar incidente en los colectores de aire	$KJ/h.m^2$
Q_{u_lt}	Capacidad energética del calentador por lote	MJ
Q_{req_lt}	Energía requerida por lote	MJ
Q_{req_a}	Energía requerida anual	MJ
Q_{ua}	Capacidad energética del calentador anual	MJ

Q_{esp}	Energía específica	MJ/kg
Q_u	Energía útil	MJ
Q_{ud}	Capacidad energética del calentador por día	MJ/m^2
Q_G	Irradiación solar durante el tiempo de secado	MJ
Q_s	Irradiación anual	MJ/m^2
t_i	Tiempo de secado inicial	h
t_f	Tiempo de secado final	h
T_{o_coll}	Temperatura promedio de salida del calentador	$^{\circ}C$
T_a	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
TIR	Tasa interna de retorno	$\%$
TR	Tiempo de recuperación de la inversión	$años$
VAN	Valor actual neto	$\$$
W_i	Peso muestra inicial	kg
W_d	Peso masa seca	kg

Subíndices

ar	Aire
sol	Solar
req	Requerida
Op	Operador
sr	Secado referencia
lt	Lote

Letras griegas

Símbolo	Descripción	Unidades
ε_{abs}	Error absoluto	$(-)$
η_c	Eficiencia del calentador	$(-)$
δ	Peso de piezas de barro por lote	kg/lt
\dot{m}	Caudal del aire en el calentador	kg/s

Acrónimos

Abreviatura	Descripción
RMSE	Error medio cuadrático estándar
SST	Sistemas solares térmicos
SCSDA	Sistema de Calentamiento Solar Directo de Aire
TecNM/CENIDET	Tecnológico Nacional de México/Centro nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
NOM	Norma oficial mexicana

Resumen

La viabilidad del uso de la energía solar térmica para el secado de alfarería de barro se estudia a usanza de los artesanos de Ixtaltepec-México. La viabilidad de un calentador solar para el secado se establece evaluando el desempeño térmico-económico con la energía requerida, los costos nivelados y el retorno de la inversión, considerando muestras representativas. La definición de las muestras de estudio y consumos energéticos se hicieron considerando los usos y costumbres de los alfareros de la región. Los requerimientos energéticos se establecieron con las condiciones ambientales del lugar de estudio, y más puntualmente con el recurso solar. Las características térmicas y energéticas de las muestras se determinaron con la cinética de secado por lotes de piezas, obtenida con datos recolectados en un taller de alfarería en Ixtaltepec. La propuesta del calentador solar térmico se realizó buscando satisfacer las cargas térmicas mediante simulación por componentes de acuerdo a la norma NOM-020-STPS-2011, utilizando TRNSYS. El recurso solar anual en Ixtaltepec, Oaxaca es de 6571 MJ/m^2 considerando un año meteorológico típico. Las muestras de barro más representativas de la comunidad de alfareros se identificaron con tres lotes de 152.8, 360.0 y 945.0 *kg*. La cinética de secado mostró humedades iniciales y finales de 44.6 y 2.0% (*w.b*), y tiempos de secado de 4-8 días (38-65 *h*).

En relación a los costos energéticos, para el caso de la **Muestra 1** (152.8 *kg/lt*), el menor consumo implicó un tiempo de secado de cuatro días con eficiencia térmica del calentador de 0.47. La energía útil anual del calentador solar fue de 50.9 *GJ/a* (117.9 *MJ/lt*), requiriendo un área de captación de 16.4 *m*² que corresponde a siete colectores planos de aire, con un área de apertura de 2.33 *m*² cada uno. Los intervalos de temperatura y humedad relativa durante el secado fueron de 29.5-33.7 °C y 60.2-77.9%, con un flujo de aire de 1.16 *kg/s* y velocidades de 0.22 *m/s*. En el caso de la **Muestra 2** (360.0 *kg/lt*), el tiempo de secado fue de siete días y la eficiencia térmica permaneció sin cambios significativos en relación a la Muestra 1. La energía útil anual del calentador solar fue de 64.3 *GJ* (151.5 *MJ/lt*), con lo que se observa que la demanda energética aumentó, en relación a la Muestra 1. La demanda de calor se cubre con nueve colectores de aire de 2.33 *m*² cada uno (21.0 *m*²). Los intervalos de temperatura y humedad relativa fueron de 29.9-32.1 °C y 60.2-68.9%. El caudal de aire disminuyó ligeramente 0.01 *kg/s* en relación a la Muestra 1. La velocidad del aire permaneció prácticamente sin cambios en relación a la Muestra 1. La **Muestra 3** (945.0 *kg/lt*) presentó un tiempo de secado de seis días, mientras que la eficiencia del calentador disminuyó ligeramente 0.09 en relación a la Muestra 1. La energía útil anual del calentador fue de 119.9 *GJ* (343.0 *MJ/lt*). El calentamiento de aire con la Muestra 3 se cubre con 20 colectores solares de aire de 2.33 *m*² cada uno

(47.6 m²). Los intervalos de temperatura y humedad relativa fueron de 33.21-36.33 °C y 60.13-77.94%. El flujo y la velocidad del aire permanecieron semejantes a los dos casos anteriores.

En relación al análisis económico de los tres calentadores, los costos nivelados en pesos mexicanos, el costo de cada kilogramo de barro con el método tradicional para cada muestra fue de 6.16, 3.29 y 1.59 \$/kg, con costos anuales de \$1,004,414.73, \$540,755.15 y \$630,431.28. Los costos nivelados con el calentador solar propuesto de cada kilogramo de barro fueron de 3.29, 3.44 y 2.25 \$/kg, con un costo de operación anual de \$536,027.44, \$565,442.28 y \$892,532.38. Así, el costo de la propuesta tecnológica para la Muestra 1 fue considerablemente menor que el del secado tradicional, observándose viabilidad únicamente en este caso. Los costos del secado de las muestras 2 y 3 con tecnología solar resultaron 4.57 y 41.56% más elevados, y no se observaron viables bajo las consideraciones que se tuvieron en este trabajo. El calentador de la Muestra 1 fue el único que presentó ahorros y tiempo de recuperación de la inversión adecuados, con un escenario de inversión a 20 años. El tiempo de retorno de la inversión fue de 0.8 años, el ahorro total por el proyecto de \$9,365,290.00, el VAN de \$421,869.00, y la *TIR* de 121%. En el caso de las Muestras 2 y 3, no se generó un tiempo de retorno de la inversión al no generarse ahorros. Los costos del proyecto para la Muestra 2 y 3 fueron de \$493,742.60 y \$5,242,022.00 por arriba de la Muestra 1.

Abstract

The artisans of Ixtaltepec-Mexico study the feasibility of using solar thermal energy to dry clay pottery. The feasibility was established by evaluating the thermal-economic performance of a solar heater, considering specific energy, levelized costs and return on investment for the drying. The region's potters determined the samples and energy consumption. The energy requirements follow the environmental conditions of Ixtaltepec and, more specifically, its solar resources. The kinetics of batch drying of pieces was determined using data collected in a pottery factory in Ixtaltepec to determine energetic sample characteristics. The solar heater proposal sought to satisfy the thermal loads through simulation by components according to the NOM-020-STPS-2011 standard, using TRNSYS. The annual solar resource in Ixtaltepec, Oaxaca, was 6571 MJ/m^2 , a typical meteorological year. The most representative clay samples identified were with three batches of 152.8, 360.0 and 945.0 kg. The drying kinetics of the samples showed initial and final humidity of 44.6 and 2.0% (*w.b*) and drying times of 4 to 8 days (38-65 effective hours).

Regarding energy costs, in the case of **Sample 1** (152.8 kg/lt), the lowest consumption implied a drying time of four days with a heater thermal efficiency of 0.47. The annual useful energy of the solar heater was 50.9 GJ/a (117.9 MJ/lt), requiring a collection area of 16.4 m^2 corresponding to seven flat air collectors, with an opening area of 2.33 m^2 each. Temperature and relative humidity during drying were $29.5\text{-}33.7 \text{ }^\circ\text{C}$ and $60.2\text{-}77.9\%$, with an airflow of 1.16 kg/s and velocities of 0.22 m/s . In the case of **Sample 2** (360.0 kg/lt), the drying time was seven days, and the thermal efficiency remained without significant changes from Sample 1. The annual useful energy of the solar heater was 64.3 GJ (151.5 MJ/lt), which shows that the energy demand increased about Sample 1. The heat demand is covered by nine air collectors of 2.33 m^2 each (21.0 m^2). The temperature and relative humidity ranges were $29.9\text{-}32.1 \text{ }^\circ\text{C}$ and $60.2\text{-}68.9\%$. The airflow rate decreased slightly by 0.01 kg/s relative to Sample 1. The air velocity remained virtually unchanged relative to Sample 1. **Sample 3** (945.0 kg/lt) had a drying time of six days, while the heater efficiency decreased slightly by 0.09 relative to Sample 1. The annual useful energy of the heater was 119.9 GJ (343.0 MJ/lt). Air heating with Sample 3 is covered by 20 solar air collectors of 2.33 m^2 each (47.6 m^2). The temperature and relative humidity ranges were $33.21\text{-}36.33 \text{ }^\circ\text{C}$ and $60.1\text{-}77.94\%$. The airflow and velocity remained similar to the previous two cases.

Concerning economic analysis in Mexican costs, the drying levelized costs of each kilogram of clay with the traditional method for each sample were 6.16, 3.29 and 1.59 $\$/\text{kg}$, with annual costs of \$1,004,414.73, \$540,755.15 and \$630,431.28. The levelized costs with the proposed solar heater per kilogram of mud were \$3.29, \$3.44 and \$2.25 $\$/\text{kg}$, with annual operating costs of \$536,027.44,

\$565,442.28 and \$892,532.38. Thus, the cost of the technological proposal for Sample 1 was considerably lower than that of traditional drying, observing feasibility only in this case. The drying costs of samples 2 and 3 with solar technology were 4.57 and 41.56% higher, so they were not viable under the considerations taken into account in this work. The three heaters, with a 20-year scenario, the Sample 1 heater was the only one that presented adequate savings and payback time. The payback time was 0.8 years, the total savings for the project was \$9,365,290.00, the VAN was \$421,869.00, and the TIR was 121%. For Samples 2 and 3, no-payback time was generated. The project costs for Samples 2 and 3 were \$493,742.60 and \$5,242,022.00 above Sample 1.

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta la motivación, la revisión literaria y los objetivos del proyecto. La revisión literaria se divide en estudios teóricos sobre el secado, evacuación térmica de calentadores solares, secado de productos artesanales y secado de barro, normativa en el secado y conclusiones generales del estado del arte.

1.1 Motivación

La fabricación de artesanías de barro y cerámica son actividades que han venido dando identidad a México y a varias comunidades en la escala mundial desde hace cientos de años, como es el caso de la comunidad de Ixtaltepec-México, actualmente solo el 5% de la mano de obra se dedica a esta actividad Flores-Prieto *et al.*, (2014), Aguilar-Castro *et al.*, (2012), INEGI pueblos (2023). En la fabricación de las piezas torneadas de barro, previo a la cocción en hornos a altas temperaturas, un proceso importante es el secado Zaccaron *et al.*, (2020). El secado de las piezas de barro se considera la etapa más crítica, este se realiza en galeras o espacios sombreados, expuestos a las cambiantes condiciones climáticas que provocan considerables incertidumbres en el proceso. Las grietas en las piezas son el resultado de un desequilibrio energético interno en la masa de arcilla causado por la compactación de la muestra en su construcción y el proceso durante el secado como menciona Lakshmikantha (2009). Un secado no uniforme provoca agrietamientos en las piezas, por lo que es muy importante garantizar la homogeneidad en el secado Slevin, (2002). La pérdida de calidad se atribuye a micro fracturas en las piezas que limitan su resistencia mecánica, solo después de horneadas se llegan a tener pérdidas del producto de 10-30%. El limitado cuidado en el secado de las piezas causa gradientes de humedad considerables y evaporación súbita debido al choque térmico en el horno de cocción, lo que conlleva al agrietamiento de las piezas, disminuyendo así la competitividad de los artesanos en el mercado López *et al.*, (2013). Hoy en día, el secado de sólidos es uno de los procesos de mayor consumo de energía en diferentes tipos de industrias, de elementos arcillosos como los ladrillos de arcilla, tejas y piezas de alfarería Bououd *et al.*, (2018), actualmente los costos energéticos son desconocidos. Oliveira *et al.*, (2018) recomienda mejorar la calidad de los productos con un secado más eficiente, controlando la temperatura, los flujos de aire y la humedad. Para esto, los sistemas de calentamiento solares con sistemas de control son una alternativa Boughali *et al.*, (2009). Sin embargo, a la fecha, los alfareros en Ixtaltepec, aun colocan sus productos en el suelo pavimentado de galeras y patios, llegan a quemar neumáticos y madera para secar los productos, lo que hace que se afecte la calidad de los productos, y al medio ambiente. Las limitadas alternativas energéticas en el secado de artesanías de barro recién moldeadas es una de las principales barreras en el desarrollo de la competitividad de los productores de la comunidad de Ixtaltepec, Oaxaca.

1.2 Revisión literaria

En esta sección se presenta la revisión literaria afines de los motores de búsqueda, de *Science Direct*, *Springer*, *Elsevier*, *Cross Reference*; específicamente de revistas como *Ceramics International*, *FUDMA Journal of Sciences*, *Energy Renewable*, *Hydrogen Energy*, *Journal of Food Engineering*, *Energies*, *Renewable and Sustainable Energy*, *International Journal of Thermophysics*, *Procedia Engineering*, *AIP Conference Proceedings*, *Solar Energy*, *Case Studies in Thermal Engineering*, *Applied Clay Science*, *Ingeniería investigación y tecnología*, *Metalurgia y ciencia de los materiales*. Relacionados con: Estudios teóricos sobre el secado, la evaluación de calentadores solares, el secado de productos artesanales, y secado de barro.

En los estudios teóricos de secado se especifican los parámetros que influyen en el proceso. En el secado se reportan estudios de productos alimenticios y agrícolas con energía solar, generalmente entregan el aire entre 30-70 °C, con eficiencias entre 0.5-0.7, y en muy pocos casos se utiliza almacenamiento térmico. En los estudios existentes, el secado solar se emplea para diferentes productos y materiales, donde resaltan las frutas, vegetales, granos, cárnicos y materiales cerámicos como pastas cerámicas, piezas de barro, materiales refractarios, materiales para construcción como ladrillos y tejas como reportan Luz *et al.*, (2021), Khanlari *et al.*, (2020), Yin *et al.*, (2017), Zoukit *et al.*, (2019) y Lauterbach *et al.*, (2014). Hoy en día, el secado a convección forzada es la técnica más empleada para el secado de alimentos, cerámica y materiales para construcción entre otros Álvarez-Sánchez *et al.*, (2021). La cinética de secado es la manera más utilizada para caracterizar el secado, permite identificar el contenido de humedad del producto en el tiempo Luz *et al.*, (2021) y Yin *et al.*, (2017). Los estudios previos muestran que, el desempeño de los sistemas de secado depende de las eficiencias para poder disminuir el tiempo de secado y llegar al mínimo contenido de humedad del producto Khanlari *et al.*, (2020), Zoukit *et al.*, (2019) y Lauterbach *et al.*, (2014).

En la evaluación térmica de calentadores solares, TRNSYS es una de las herramientas de simulación más empleadas para realizar análisis de sistemas solares térmicos por componentes Yin *et al.*, (2017) y Lauterbach *et al.*, (2014). Los controladores inteligentes como Fuzzy y PI, entre otros, han permitido controlar la temperatura en un calentador solar, en un intervalo adecuado, logrando aumento en el rendimiento del sistema del 70% Zoukit *et al.*, (2019). La temperatura y velocidad de secado dependen de la humedad a evaporar, siendo el intervalo de 30-90 °C el más común como lo demuestra Ogawa *et al.*, (2012). La eficiencia de los sistemas de secado pueden mejorar mediante el uso de colectores de placa plana proporcionando una eficiencia de secado mayor como menciona Mohana *et al.*, (2020) y Lingayat *et al.*, (2017). Así mismo, la eficiencia térmica de los colectores se encontró entre 0.31-0.68 como lo reportan García-Valladares *et al.*, (2020), Lakshmi *et al.*, (2019) y Lingayat *et al.*, (2017). El tiempo más común para la toma del peso de la muestra se reporta cada minuto Ogawa *et al.*, (2012). El suministro de aire más utilizado es de flujos máscicos entre 0.04-1.12 kg/s como lo reporta García-Valladares *et al.*, (2020), Mohana *et al.*, (2020) y Lakshmi *et al.*, (2019). Khouya (2020) integró una unidad de almacenamiento térmico en un horno solar y redujo el tiempo de secado hasta en un 60%, la combinación de almacenamiento térmico y calor redujo el consumo de energía hasta en un 50-54%. Bououd *et al.*, (2017) desarrollaron un calentador solar de concentración con intercambiador de calor agua-aire; compararon modelos de transferencia de calor y caída de presión en el intercambiador. Los parámetros evaluados fueron la temperatura de salida del aire, el flux de calor del aire, la caída de presión, y potencia transmitida. Los coeficientes de transferencia de calor obtenidos se compararon con los modelos Grimison, Zhukauskas, y Khan, obteniendo las temperaturas para la simulación propia de 32.7, 38.8, 33.5 °C y para los modelos fue de 33.5, 38.5, y 43.3 °C respectivamente. El coeficiente de la caída de presión se comparó con los modelos Holman & Jacob, Zhukauskas y Kays & London obteniendo para la simulación propia 359.2, 248.3, y 48.9 N/m², y para los modelos de 352.8, 246.2 48.6 N/m² respectivamente, con una fiabilidad del 94 y 98% respectivamente.

En el secado de productos artesanales, la energía específica de los de productos artesanales se ha reportado de 51-58 MJ/kg, con eficiencias de 31-70%, suministrando aire caliente a razón de 0.02-1.12 kg/s. Flores-Prieto *et al.*, (2014), Aguilar-Castro *et al.*, (2012) y Baltazar *et al.*, (2006) reportaron la remoción de agua con energía solar de moldes de yeso, resaltaron que los tiempos usuales de los artesanos son considerables y contemplaron posible reducir el tiempo en un 77%. Los parámetros críticos en los secadores son la distribución uniforme del aire, la temperatura y el consumo de energía. La tecnología solar térmica se contempla como alternativa en el proceso de secado convencional para la reducción de los tiempos de secado. En los estudios evaluaron el consumo medio de energía específica requerida para el secado de productos artesanales de 2.5-3.6 MJ/kg, con suministro de energía de 39.4-42.0 MJ/d. Los tiempos de secado de la cerámica fueron de 132-217 h. La tasa de evaporación promedio fue de 0.5-0.7 kg/h. Las velocidades del aire en la cámara de secado fueron de 0.0046-0.0098 m/s. También, los calentadores solares mostraron eficiencias en el secado de 21-29% Flores-Prieto *et al.*, (2014), Aguilar-Castro *et al.*, (2012) y Baltazar *et al.*, (2006). La implementación de secadores solares puede reducir hasta un 77% los tiempos de secado tradicionales, aunque estos secadores solo se han implementado para moldes de yeso cerámico. Así, el estudio de la factibilidad del secado implica realizar estudios de los parámetros de piezas artesanales, como es el caso del barro en Ixtaltepec-México, en el Istmo de Tehuantepec.

En el secado de barro, los estudios existentes muestran que la presencia de grandes cantidades de materia orgánica provoca una reducción de los canales internos evitando la eliminación de agua provocando la rotura en las piezas Hassan *et al.*, (2020), Oliveira *et al.*, (2018), Bououd *et al.*, (2018) y Connelly (2018). El barro se considera como un material anisotrópico y funciona también como un material de almacenamiento de energía térmica que puede ser utilizado para aplicaciones de secado solar Hassan *et al.*, (2020). La fabricación de piezas de barro, demanda un mejor proceso de secado para generar productos de mayor calidad, y evitar pérdidas económicas Vasconcellos *et al.*, (2019) y Macias-Melo *et al.*, (2015). Los autores reportan análisis en el secado de barro, los más empleados son por termogravimetría y análisis térmico diferencial Macias-Melo *et al.*, (2015) y Santos *et al.*, (2009). También, la caracterización del secado de arcilla con espectroscopia infrarroja es la más empleada debido a su simplicidad reportada por Oliveira *et al.*, (2018).

En lo que respecta a la normativa aplicable, los organismos que resaltan sobre las propiedades de las arcillas y procesos que se requieren para el secado son la sociedad americana de pruebas y métodos (ASTM por sus siglas en inglés). ASTM-D2974-00 métodos de prueba estándar para humedad, cenizas y materia orgánica de turba y otros suelos orgánicos como arcilla, barro, limos orgánicos, fango, humus y estiércol. ASTM-C20-10 métodos de prueba estándar para porosidad aparente, absorción de agua, gravedad aparente específica y densidad aparente del ladrillo refractario quemado y formas por agua hirviendo. ASTM-D2216-19 método de determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) por masa de suelo, roca y materiales similares donde la masa de secado se debe a la pérdida de agua. ASTM-D4959-00 método de prueba estándar para la determinación de contenido de agua (humedad) en sólidos por calentamiento directo. La Normativa en plataformas de simulación TRNSYS es una herramienta de referencia para las calificaciones de SRCC en los EE.UU. y aparece en las regulaciones de UE (ENV 12977-2) para sistemas solares.

Con lo anterior se observa que, en los estudios teóricos de secado con energía solar los productos alimenticios y agrícolas emplean aire caliente a 30-70 °C y en algunos casos se utiliza almacenamiento térmico para periodos no soleados con eficiencias de 0.5-0.7. El secado solar se emplea para diferentes productos y materiales, donde resaltan las frutas, vegetales, granos, cárnicos y materiales cerámicos, piezas de barro, materiales refractarios, materiales para construcción como ladrillos, tejas Luz *et al.*, (2021), Khanlari *et al.*, (2020), Zoukit *et al.*, (2019), Yin *et al.*, (2017) y Lauterbach *et al.*, (2014). La cinética de secado es la manera más utilizada para caracterizar el secado, permite identificar el contenido de humedad en el tiempo Bououd *et al.*, (2018) y Yin *et al.*, (2017). Los estudios previos muestran que el desempeño de los sistemas de secado depende de las características de los calentadores solares para disminuir el tiempo de secado y llegar al mínimo contenido de humedad del producto Khanlari *et al.*, (2020) y Zoukit *et al.*, (2019). Por otro lado, las técnicas híbridas aceleran las tasas de secado y reducen los tiempos de secado. Los autores consideran importante evaluar la factibilidad económica del sistema considerando el costo del calentamiento del flujo de aire a lo largo de todo el proceso para reducir tiempos y consumo de energía en el secado reportado por Álvarez-Sánchez *et al.*, (2021), Lakshmi *et al.*, (2019), Bououd *et al.*, (2017) y Flores-Prieto *et al.*, (2014). El estudio del secado de barro se resalta en hornos convencionales Khanlari *et al.*, (2020) y Zoukit *et al.*, (2019). Los análisis más empleados en el secado de barro son por termogravimetría, análisis térmico diferencial y espectroscopia infrarroja Oliveira *et al.*, (2018), Macias-Melo *et al.*, (2015) y Darío *et al.*, (2009). Así, con lo reportado el estudio de la factibilidad del secado de barro implica realizar estudios de los parámetros de secado solar de piezas artesanales, como es en el caso del barro en el Istmo de Tehuantepec. Los análisis en TRNSYS permiten evaluaciones dinámicas por componentes para optimizar el sistema de calentamiento solar del aire para el secado de productos Bououd *et al.*, (2018) y Flores-Prieto *et al.*, (2014). Existen diversas normas como las publicadas por ASTM que definen estándares, características y procesos para examinar el barro en distintas características de los materiales utilizados como en la construcción, como los bloques cerámicos, ladrillos, tabiques y tabicones, normas estándares para el proceso de cocción, sin embargo, las normas existentes no establecen metodologías que regulen el proceso de secado de las piezas de barro de alfarería. Con lo anterior se observa que, en el secado de barro, los tiempos de secado y los consumos energéticos no se han reportado para las piezas de barro en el Istmo de Tehuantepec, donde los artesanos demandan un secado con mayor confiabilidad. Así, en este estudio se determina la viabilidad de uso de la energía solar-térmica en el secado de artesanías de barro para Ixtaltepec-México.

1.3 Objetivos

Objetivo General

Estudiar la viabilidad de la energía solar térmica para el secado por lotes barro de alfarería, a usanza de los alfareros de Ixtaltepec-México.

Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este proyecto son:

- Identificar los tiempos de secado y los requerimientos energéticos del secado de barro, realizando experimentación y recolección de datos en un taller de alfarería en Ixtaltepec-México.
- Desarrollar y verificar una plataforma de simulación térmica del calentador solar utilizando simulación por componentes (TRNSYS).
- Desarrollar y verificar una plataforma de simulación económica del calentador solar en hoja de cálculo.
- Dimensionar el calentador solar con las plataformas de simulación térmica y económica, considerando los tiempos y requerimientos energéticos del secado de barro en Ixtaltepec-México.

1.4 Escritura de tesis

El estudio se presenta en Cinco Capítulos, en el **Capítulo 1** se presentó la motivación del problema, la revisión literaria, y los objetivos del proyecto. En el **Capítulo 2** se presenta los fundamentos teóricos, el caso de estudio, la metodología general del proyecto; describiendo el lugar y muestras de barro, como los métodos de estudios térmico y económico. En el **Capítulo 3** se presenta el calentador solar de referencia, la construcción del simulador y validación en TRNSYS. El **Capítulo 4** muestra los resultados obtenidos de los estudios en campo, los requerimientos energéticos de las piezas, el desempeño térmico del calentador propuesto. La evaluación económica se realiza con indicadores económicos. En el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones del trabajo y las recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Materiales y método

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos, el caso de estudio, las condiciones climáticas, las ecuaciones empleadas en la identificación del recurso energético de las piezas de alfarería y la configuración del calentador solar térmico como las características de los componentes del sistema.

2.1 Fundamentos teóricos

Arcillas

“Arcilla común” o “common clay” se entiende a toda materia prima arcillosa de amplia distribución de afloramiento, que, por sus propiedades físicas y especificaciones químico-mineralógicas básicas, se emplean, principalmente, en el sector cerámico de la construcción y en la alfarería. Su constitución mineralógica es muy variada y posee minerales arcillosos. Los principales usos a los que se destinan estas arcillas son; para la industria de la construcción, como ladrillos huecos o blocks, tejas, y azulejos para pavimentos y revestimientos. También se emplean en el sector de la alfarería. El color del producto acabado lleva una componente rojo característica, originado por los altos contenidos en óxidos de hierro por encima del 2-2.5% como mencionan Díaz *et al.*, (2002).

Calor

El termino se emplea para referirse al suministro de energía a un proceso. La metodología consiste en calentar un fluido mediante energía solar a través de un instrumento de aprovechamiento solar como son los captadores solares. El fluido de trabajo aumenta su temperatura después de pasar por el captador, por medio de un sistema de tuberías se integra a un sistema de almacenamiento y transformando el calor del fluido al aire a través de un intercambiador de calor de flujo cruzado. El estudio de los sistemas de calentamiento solar para calor de procesos requiere el conocimiento de los fundamentos básicos, entre los que destacan; la constante solar, el fenómeno de radiación solar, el uso y aplicación de tecnologías de captación solar, como reporta Cenge (2005).

Radiación solar

La radiación en la superficie terrestre consta de dos componentes, una parte de la radiación entrante se mantiene como radiación directa, mientras que un porcentaje se dispersa como radiación difusa en la atmósfera y otro se refleja al espacio. A diferencia de la radiación directa, que tiene la dirección bien definida, la radiación difusa se origina en toda la bóveda celeste. Aunque la radiación difusa es más intensa cerca del sol, una buena aproximación es suponer que es isotrópica, es decir, que se distribuye uniformemente en todas las direcciones de acuerdo con Widén *et al.*, (2019).

Coletores solares de aire

Están formados por una placa metálica cubierta de vidrio que se calienta con su exposición al sol. Los colectores para calentamiento de aire son considerados como tecnología de mediana temperatura, sus intervalos van entre 30-70 °C. La radiación solar G incide sobre la cubierta vidriada. Una parte de esta radiación es reflejada al ambiente, otra parte es absorbida en la cubierta vidriada y el resto se transfiere hacia la placa de radiación de onda corta. La energía absorbida se cede al fluido a calentar. La energía absorbida sale del colector en forma de calor útil Q_u , las pérdidas por conducción, convección y radiación se cuantifican en términos de Q_l .

Plataforma de simulación

TRNSYS permite diseñar y optimizar sistemas energéticos, en particular, sistemas basados con energías renovables. Es un software basado en gráficos con pasos de tiempo para simular el comportamiento en estado estacional o transitorio, permite evaluar el rendimiento de los sistemas de energía térmica, como la modelación de otros sistemas dinámicos, el flujo de tráfico y el confort térmico entre otros. TRNSYS se integra de dos componentes, el primero es el núcleo y el segundo una biblioteca de componentes. El núcleo, lee y procesa el archivo de entrada, resuelve iterativamente el sistema, determina la convergencia y traza las variables del sistema. También determina las propiedades termo físicas, invierte matrices, realiza regresiones lineales e interpola archivos de datos externos. La segunda parte de TRNSYS es una extensa biblioteca de componentes, cada uno de los cuales modela el rendimiento de una parte del sistema. TRNSYS ha demostrado ser una solución prometedora para el modelado de sistemas térmicos como reporta Diersch *et al.*, (2011).

Adquisición de datos

Los adquirentes de datos son empleados por las estaciones meteorológicas que recopilan los datos de distintas variables atmosféricas. La estación meteorológica de METEONORM V.8. (2022) ofrece datos meteorológicos típicos precisos de un promedio de 10 años para cualquier parte del mundo, como la radiación, temperatura, humedad, entre otros parámetros climatológicos.

2.2 Caso de estudio

En esta sección se presenta la metodología general que involucra el estudio térmico económico de tres calentadores solares, empleando simulación por componentes en TRNSYS con una base de datos climática de METEONORM V.8. (2022); el recurso solar disponible de la comunidad, las condiciones climáticas y el consumo energético que demandan los procesos de secado de alfarería. La demanda energética se identifica con un estudio en campo en la comunidad de Asunción Ixtaltepec-México. Posteriormente un estudio económico identificando la viabilidad de los calentadores.

2.3 Metodología general

En la **Figura 2.1** se muestra un diagrama de la plataforma térmico económica para identificar la viabilidad de la energía solar térmica para el secado de artesanías de barro. **La primera etapa** considera la evaluación del recurso solar disponible en la comunidad, la demanda a satisfacer y las características del calentador propuesto. **La segunda etapa** considera con un estudio en campo la identificación de las características físicas, térmicas y energéticas del barro para el desarrollo de una plataforma de simulación por componentes en TRNSYS del calentador solar térmico. La validación consideró las temperaturas de salida de los colectores planos de aire. La plataforma térmica considera como figuras de mérito la energía útil del sistema y la eficiencia del calentador

durante un año. **La tercera etapa** considera la optimización del calentador solar de acuerdo a los requerimientos del secado actuales de la industria, y los resultados de la simulación solar-térmica de acuerdo con los recursos de comunidad de alfareros. La evaluación económica se realiza con el costo unitario del secado tradicional, los costos nivelados de la energía térmica y el costo por kilogramo eléctrico; el análisis económico de inversión involucra al Valor Actual Neto (*VAN*), la Tasa Interna de Retorno (*TIR*) y el tiempo de recuperación de la inversión (*TR*).

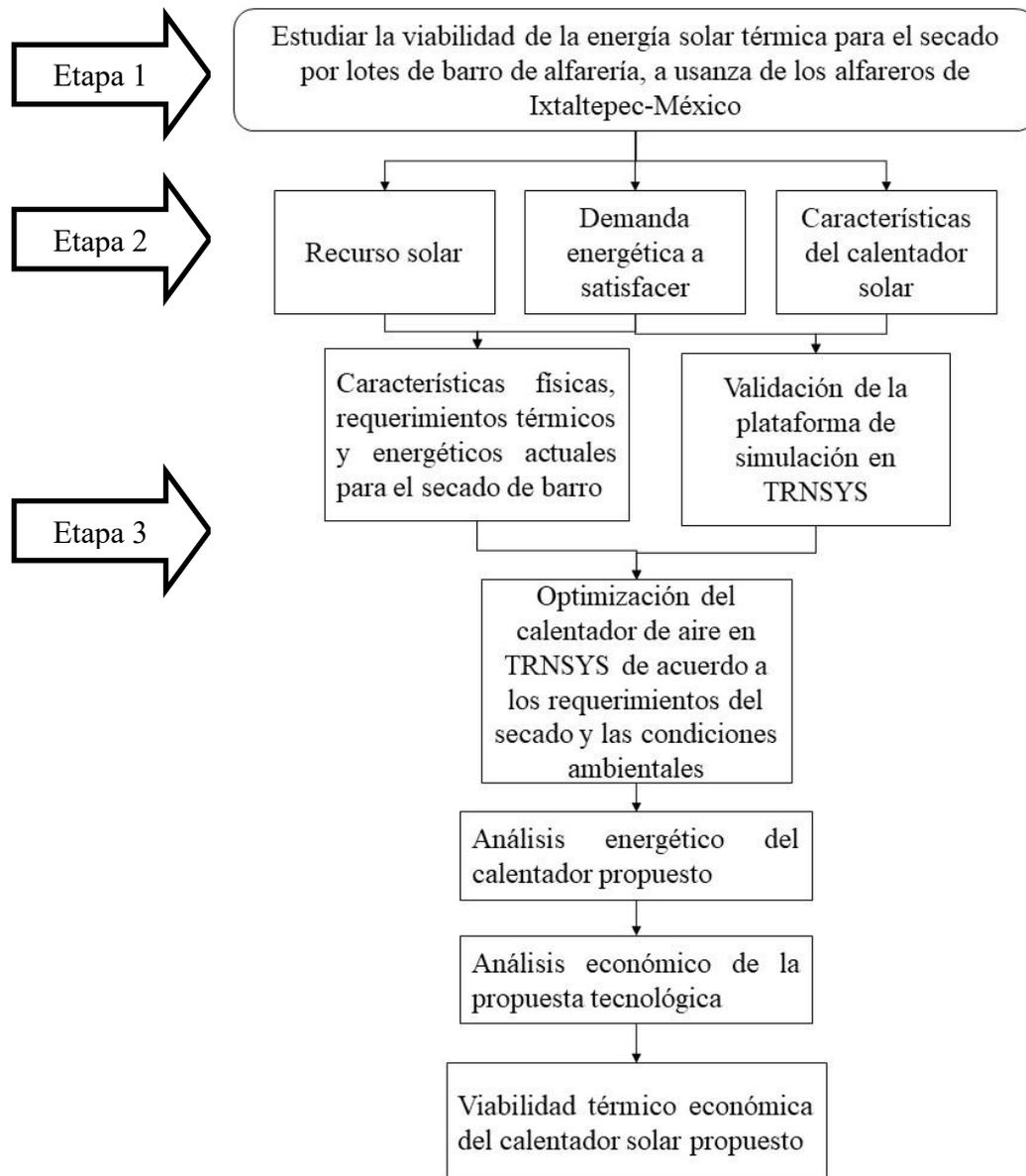


Figura 2.1. Metodología general para identificar la viabilidad de la energía solar térmica para el secado de artesanías de barro.

2.3.1 Recurso solar y condiciones climáticas del lugar de estudio

El lugar de estudio es Ixtaltepec, Oaxaca, ubicado en la región del Istmo de Tehuantepec al sureste del estado de Oaxaca. El clima predominante es el tropical húmedo (*A.w.*). Geográficamente se encuentra en las coordenadas 16.34° N y 95.01° O, a una altura de 41 *m.s.n.m* como se muestra en la **Figura 2.2**. En la **Figura 2.3** se muestran las temperaturas anuales máximas, mínimas y promedio anual 37.6 y 18.6 y 28.0 °C y en la **Figura 2.4** la humedad relativa promedio anual de 68.94%. Siguiendo un año meteorológico típico METEONORM V.8. (2022). La energía anual promedio es de 6571.2 *MJ/m²-a* (18 *MJ/m²-d*). En la **Figura 2.5** se muestra la energía promedio mensual. Los meses con mayor energía son mayo y abril con 670.4 y 661.8 *MJ/m²-a*, respectivamente.



Figura 2.2. Lugar de estudio Ixtaltepec-México.

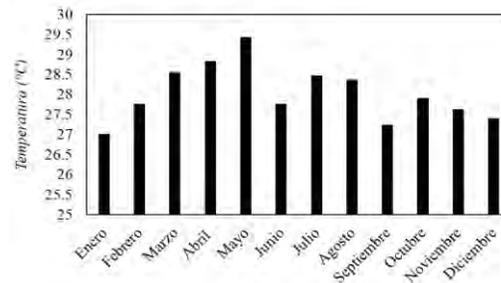


Figura 2.3. Temperatura promedio mensual.

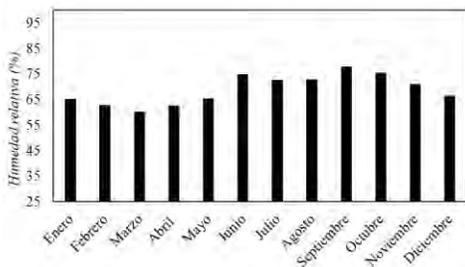


Figura 2.4. Humedad relativa promedio mensual.

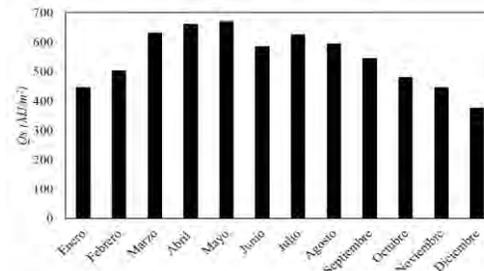


Figura 2.5. Irradiación del lugar de estudio.

2.3.2 Método de estudio térmico

Descripción de las características físicas, requerimientos térmicos y energéticos del barro

Las muestras de barro son de alfarería local, donde las piezas se elaboran a mano. Las muestras corresponden a la usanza de los alfareros, donde el barro se obtiene de Chihuitan, Oaxaca, un municipio cercano. El barro se dispone en polvo cribado, y se mezcla con agua hasta tener una consistencia elástica moldeable que pueda mantener su forma.

Energía requerida

La irradiancia G a medida que aumenta la temperatura permite una evaporación más rápida Q_{req} del contenido de agua para cada peso de las muestras de barro. La Q_{req} está dada por la **Ecuación 1**.

$$Q_{req} = h_{fg} \int_{t_i}^{t_f} M_w dt \quad (1)$$

h_{fg} es el calor latente de vaporización del agua (2260 kJ/kg, a 30.3 °C, una atmosfera) y M_w es la masa del agua a evaporar por producto seco. El tiempo, el peso de las muestras, y otras condiciones meteorológicas se monitorean en pasos específicos de tiempo durante la campaña experimental.

Energía específica

La irradiación solar durante el tiempo de secado de cada lote de piezas de barro Q_G , a una tasa de irradiancia G , la temperatura al aumentar permite una evaporación más rápida Q_{req} , del contenido de masa de agua del barro. El agua evaporada va al ambiente, así como la pérdida de calor ($Q_G - Q_{esp}$).

Consideramos que el piso de la galera es de cemento, almacena y transfiere calor con un efecto poco considerable. La evaluación de la capacidad de secado en galera implica la energía específica determinada experimentalmente Q_{esp} , para cada peso de lote, la irradiación disponible Q_G . Se evalúa con la **Ecuación 2**.

$$Q_{esp} = \frac{Q_G}{\delta} \quad (2)$$

Donde δ es el peso del lote de piezas de barro (kg/lit). La irradiación Q_G y Q_{req} están dadas por la **Ecuación 3** y **4**.

$$Q_G = \int_{t_i}^{t_f} G dt \quad (3)$$

$$Q_{req} = h_{fg} \int_{t_i}^{t_f} M_w dt \quad (4)$$

Cinética de secado del barro

El tamaño del lote de las piezas de barro se determina según usos y costumbres de un taller de alfarería de Ixtaltepec-México. A través de gravimetría, la cinética de secado se calcula identificando la cantidad de agua removida de las muestras a lo largo del proceso.

La relación de humedad $MR(t)$ se determina con la **Ecuación 5**, empleando los parámetros ambientales de la zona. Donde la humedad de equilibrio para cada muestra representa la humedad final cuando ya no cambiaba en el tiempo. por lo que $MR(t)$ es M/M_o , Santos *et al.*, (2020), Erbay *et al.*, (2010).

$$MR(t) = \frac{M(t) - M_e}{M_o - M_e} \quad (5)$$

donde $M(t)$ es el contenido de humedad a lo largo del tiempo de cada muestra en base húmeda (*w.b.*) y se evalúa con la **Ecuación 6**. M_o es el contenido de humedad inicial (*w.b.*) y M_e es el contenido de humedad en equilibrio (*w.b.*). Como se comentó anteriormente, M_e es poco considerable debido a las fluctuaciones en la temperatura del aire y la humedad relativa Vasconcellos *et al.*, (2019). Así, se obtiene la ecuación de relación de humedad es $M(t)/M_o$. La evaluación de $M(t)$ sigue la **Ecuación 6**. de acuerdo a Mauer *et al.*, (2017), donde W_i es el peso inicial de la muestra (g) y W_d es el peso de la masa seca. El peso de la masa seca se determina experimentalmente con una balanza analítica. La evaluación del tiempo de secado se realiza gráficamente, cuando el contenido de humedad alcanza los valores mínimos sin mayores cambios.

$$M(t) = 100 * \frac{W(t) - W_d}{W_i} \quad (6)$$

Configuración del calentador solar

La configuración del sistema, así como sus características se tomaron de un caso de referencia de Álvarez-Sánchez *et al.*, (2021). El cual proporciona calor a un proceso de secado, donde los requerimientos son la temperatura del aire y la demanda energética diaria para diferentes lotes de 152.8, 360.0 y 945.0 kg/lt. En la **Figura 2.6** se muestra la configuración del Sistema de Calentamiento Solar Directo de Aire (SCSDA). Los sistemas se componen de 7, 9 y 20 colectores solares de aire con un área neta de 16.4, 21.0 y 47.6 m² en un arreglo serie-paralelo. Además, un ventilador centrífugo de 3.0 hp (2.23 kW) con variador de frecuencia se utiliza para la circulación de aire en el SCSDA. El SCSDA recibe la irradiancia solar a una tasa de $Q_{s,ar}$. En el SCSDA, el aire ambiente entra a los colectores planos y el aire previamente calentado se transfiere con un ventilador con una energía Q_{DAH} .

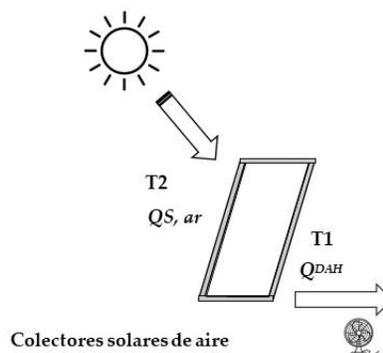


Figura 2.6. Modelo físico del sistema de secado.

Plataforma de simulación

La plataforma se realiza comparando la temperatura de salida simulada de los colectores de aire con sus respectivos datos experimentales. La plataforma de simulación para el Sistema de Calentamiento Solar de Aire se construye en TRNSYS, con simulación por componentes, basado en un entorno gráfico. La configuración de la plataforma es un Sistema de Calentamiento Solar Directo de Aire (SCSDA) el simulador emplea un flujo de prueba y la caracterización de los calentadores con la curva de eficiencia de los colectores.

Para la simulación térmica, los parámetros de entrada requeridos son los coeficientes de la curva de eficiencia de los colectores de aire a_0 , a_1 , a_2 y el área de captación A_c . La temperatura de salida simulada del campo de calentamiento solar de aire T_{o_coll} se calcula con la **Ecuación 7**.

$$T_{o_coll} = T_{i_coll} + \left\{ \left[a_0 - a_1 \left(\frac{T_{i_coll} - T_a}{G} \right) - a_2 \left(\frac{(T_{i_coll} - T_a)^2}{G} \right) \right] A_c G \right\} \quad (7)$$

La energía útil de los colectores solares de aire Q_u se determina con la **Ecuación 8**.

$$Q_u = \int_{t_i}^{t_f} \left(a_0 - a_1 \frac{(T_{p,ar} - T_a)}{G} - a_2 \left(\frac{(T_{p,ar} - T_a)^2}{G} \right) \right) Q_{s,ar} dt \quad (8)$$

Donde $T_{p,ar} = (T_{o_coll} + T_{i_coll}) / 2$

$Q_{s,ar}$ es la radiación solar incidente en los colectores de aire y se determina con la **Ecuación 9**.

$$Q_{s,ar} = A_{ar} \int_{t_i}^{t_f} G dt \quad (9)$$

El caudal del aire en el calentador \dot{m} , y la eficiencia del calentador η_s se determinan con las **Ecuaciones 10-11**, donde Q_u considera la capacidad energética del calentador.

$$Q_u = \dot{m} C_p \Delta T \quad (10)$$

$$\eta_c = \frac{Q_u}{I_d} \quad (11)$$

Donde Q_{ud} es la capacidad energética del calentador por día e I_d es la irradiancia diaria (recurso solar en la horizontal).

La precisión de la comparativa de las temperaturas se identifica con el error absoluto siguiendo la **Ecuación 12**.

$$\varepsilon_{abs} = |V_{exp} - V_{sim}| \quad (12)$$

2.3.3 Método de estudio económico

En la **Figura 2.7** se presenta la metodología del análisis económico de la propuesta tecnológica con energía solar térmica para el secado de artesanías de barro de la comunidad de Ixtaltepec-México. Para determinar el costo del secado tradicional se determinaron tres muestras características, proponiendo un sistema para cada una. Identificando el costo por kilogramo de barro del secado tradicional y con la tecnología solar térmica. Se determina el costo de renta de la galera de secado y el costo de la mano de obra para un periodo de veinte años. Los lotes se determinaron de 152.8, 360.0 y 945.0 kg/lt con grupos de 91, 53, 59 lotes anuales en paralelo. La propuesta tecnológica se basa en el costo nivelado de la energía solar térmica y con el costo por kilogramo eléctrico. La viabilidad económica del proyecto se determina con el ahorro neto o flujo de caja considerando el costo de la energía eléctrica que se emplea para la distribución del aire de secado. Se emplean indicadores económicos como el Valor Anual Neto (*VAN*), La tasa interna de retorno (*TIR*) y el periodo de recuperación de la inversión (*TR*) considerando los costos futuros trayéndolos a valor presente. El ahorro de la inversión se determina sumando los costos anuales en el secado tradicional restándole el costo anual del calentador solar térmico.

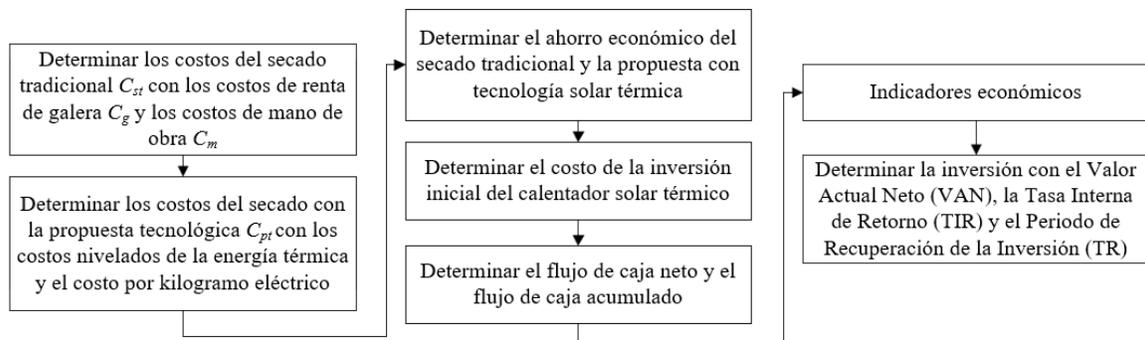


Figura 2.7. Metodología para desarrollar el análisis económico.

Valor actual neto

El Valor Actual Neto (*VAN*) es un indicador económico que se emplea para evaluar proyectos de inversión. El *VAN* indica si es viable la inversión. El *VAN* consiste en actualizar mediante una tasa de descuento todos los flujos de caja futuros. La tasa de interés se considera del 11% de acuerdo a la secretaria de energía 2023. El *VAN* se determina con la **Ecuación 14**.

$$VAN = \frac{f_t}{(1+d)^N} \quad (14)$$

Donde f_t es el flujo de caja en cada periodo, N es el periodo de la inversión en años y d es la tasa de interés. Los criterios de decisión se consideran si:

VAN>0: El proyecto es rentable.

VAN=0: El proyecto no generará beneficios ni pérdidas.

VAN<0: El proyecto generará pérdidas.

Tasa interna de retorno

La Tasa Interna de Retorno (*TIR*) es un indicador económico que permite determinar la rentabilidad que ofrece una inversión, es decir, indica en porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión de proyecto. La *TIR* está relacionada con el *VAN* y también se define como la tasa de descuento que hace que el *VAN* sea igual a cero para un proyecto de inversión. La *TIR* se calcula con la **Ecuación 15** a partir de los flujos de efectivo anuales y de la inversión inicial de proyecto.

$$VAN = 0 = -I_{nv} + \sum_{t=1}^N 1 \frac{f_t}{(1+TIR)^N} \quad (15)$$

Donde f_t es el flujo de caja en cada periodo, I_{nv} es la inversión inicial, N es el periodo de la inversión en años.

Tiempo de recuperación de la inversión

El tiempo de recuperación de la inversión (*TR*) es el tiempo necesario para que el flujo de caja anual sea positivo. El tiempo de recuperación descontado es un método de valoración de inversiones que determina el tiempo que una inversión tarda en recuperar el desembolso inicial, con los flujos de caja acumulados. El tiempo de recuperación de la inversión se calcula con **Ecuación 16**.

$$TR = N_{(N-1)} \frac{f_{(f-1)}}{f_t} \quad (16)$$

donde $N_{(N-1)}$ es el periodo inmediato anterior en el que se recupera la inversión, $f_{(f-1)}$ es el flujo de caja acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión y f_t es el flujo de caja del año en el que se recupera la inversión.

En la determinación de los costos del secado tradicional C_{st} , se obtiene el costo por kilogramo de renta de galera C_g y el costo por kilogramo de mano de obra C_m . Para esto se considera la cantidad a secar entre la renta de la galera en un periodo de un año, se calcula con la **Ecuación 17**.

$$C_{st} = C_g + C_m \quad (17)$$

Capítulo 3

Estrategias de solución

En este capítulo se presenta la metodología numérica experimental para el diseño de una plataforma térmico económica que implica el estudio de la viabilidad de la energía solar térmica para el secado de artesanías de barro. El desarrollo del simulador toma en consideración las características de un sistema de calentamiento de aire y su validación. El análisis económico del calentador solar considera indicadores económicos de inversión.

3.1 Calentador solar (referencia)

Las características del sistema se tomaron de un caso de referencia de Álvarez-Sánchez *et al.*, (2021). Emplea un sistema de calentamiento directo de aire a un proceso de secado, los parámetros que se emplean son el calor específico del aire, flujo de prueba y la curva de eficiencia.

El campo de colectores solares de aire se compone de 16 calentadores de placa plana dispuestos en un arreglo serie-paralelo, dos en serie y ocho en paralelo. El área de apertura es de 2.33 m^2 por colector, con un área total de 37.12 m^2 . La curva de eficiencia se evalúa en relación con ASHRAE 93:2010, y la proporciona el fabricante. Las especificaciones para cada colector se muestran en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Especificaciones del calentador solar de aire.

Sistema de aire		
Área de captación A_c	2.326	m^2
Fluido de trabajo	Aire	(-)
Calor específico C_p	1.012	kJ/kg K
Flujo de prueba \dot{m}	236	kg/h
Curva de eficiencia – ASHRAE 93-2010		
a_0	0.5421	(-)
a_1	5.1838	$\text{W/m}^2 \text{K}$
a_2	0.0011	$\text{W/m}^2 \text{K}^2$

3.2 Construcción del simulador en TRNSYS

En el software TRNSYS, la simulación gráfica se realiza con subrutinas denominadas *Types*, los cuales contienen los modelos matemáticos y las características termo físicas de cada componente. La plataforma de simulación se divide en componentes auxiliares, del calentamiento de aire y del circuito del proceso.

En la **Figura 3.1** se muestran las subrutinas para el ingreso de los datos experimentales como son los datos meteorológicos, el perfil de carga y la visualización de las figuras de mérito. Los datos meteorológicos anuales se ingresan al programa con el **Type109-TMY2**, el perfil de carga se define con el **Type14h**. la visualización y el almacenamiento de las figuras de mérito se realiza con el **Type56c**.



Figura 3.1. Subrutinas auxiliares.

En la **Figura 3.2** se muestran las subrutinas para el sistema de calentamiento directo de aire. El campo de calentadores solares de aire se simula con el **Type1c** y el ventilador mecánico con el **Type112a**.



Figura 3.2. Componentes de calentamiento directo de aire.

La **Figura 3.3** muestra la plataforma de simulación completa donde se identifican los circuitos del sistema. Los datos de entrada y el control de los modos de operación se establecen con una computadora. El **Type24** integra toda la energía que es aportada al sistema. El **Type65** se emplea para visualizar y almacenar los resultados de la simulación. En las simulaciones los pasos de tiempo fueron de una hora durante un año.

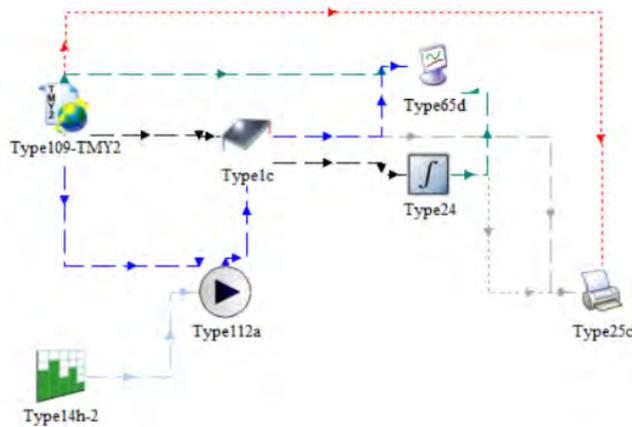


Figura 3.3. Plataforma de simulación.

3.3 Validación del simulador en TRNSYS

El sistema de calentamiento solar de donde se obtuvieron los datos experimentales para la validación, está ubicado en Xochitepec, Morelos. Cuenta con un sistema directo de 16 calentadores solares planos de aire de 37.2 m^2 . En la **Figura 3.4** se muestra la validación de la simulación, donde se compararon las temperaturas numéricas y experimentales de las salidas de los colectores de aire. La desviación entre los resultados numéricos y experimentales se determinó con el error medio cuadrático *RMSE*. El comparativo se realizó para el día 13 de julio del 2020 de 13:00-16:00 p.m. Se encontró una diferencia de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ en la simulación respecto a los datos experimentales. Con lo reportado por Álvarez-Sánchez *et al.*, (2021).

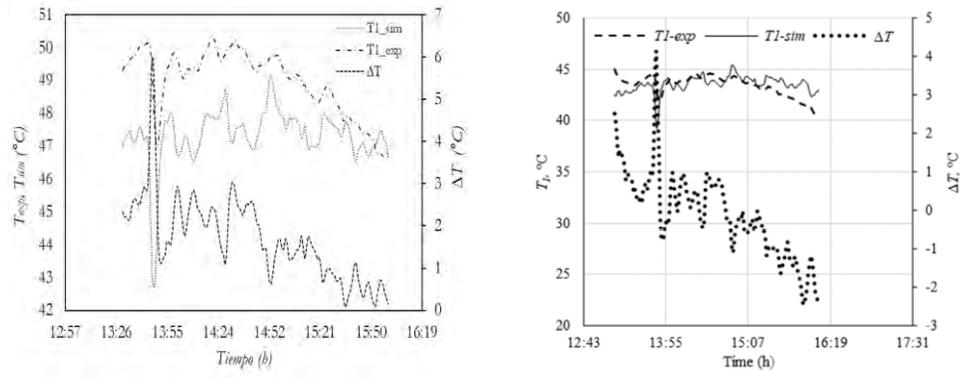


Figura 3.4. Comparativo numérico-experimental de la temperatura de salida T_{o_coll} de los colectores de aire para el 13 de julio del 2020 de 11:00 a.m. a 16:00 p.m.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados del estudio de secado en campo. La validación del funcionamiento del simulador térmico se evalúa en términos de la temperatura de salida de los colectores de aire. La evaluación del calentador solar se presenta en términos de la capacidad de secado anual en lotes de barro. Además, la propuesta del sistema se realiza con un estudio paramétrico de acuerdo a las condiciones ambientales del lugar de estudio y de la industria respectiva. La evaluación económica se realiza con el costo unitario específico del secado tradicional y el correspondiente con la propuesta con tecnología solar-térmica.

4.1 Muestras de barro

La campaña experimental del secado de piezas de alfarería se realizó en el mes de abril del año 2023 en talleres de la comunidad de Ixtaltepec-México, como se describe en la **Sección 2.2.2**. La **Figura 4.1 a, b, c, d, e, f** presenta tres muestras representativas de los alfareros. Los experimentos de secado se llevaron a cabo sin condiciones controladas. Las variables monitoreadas fueron la temperatura ambiente, la humedad relativa ambiente, el peso de las muestras de barro y el tiempo de secado.

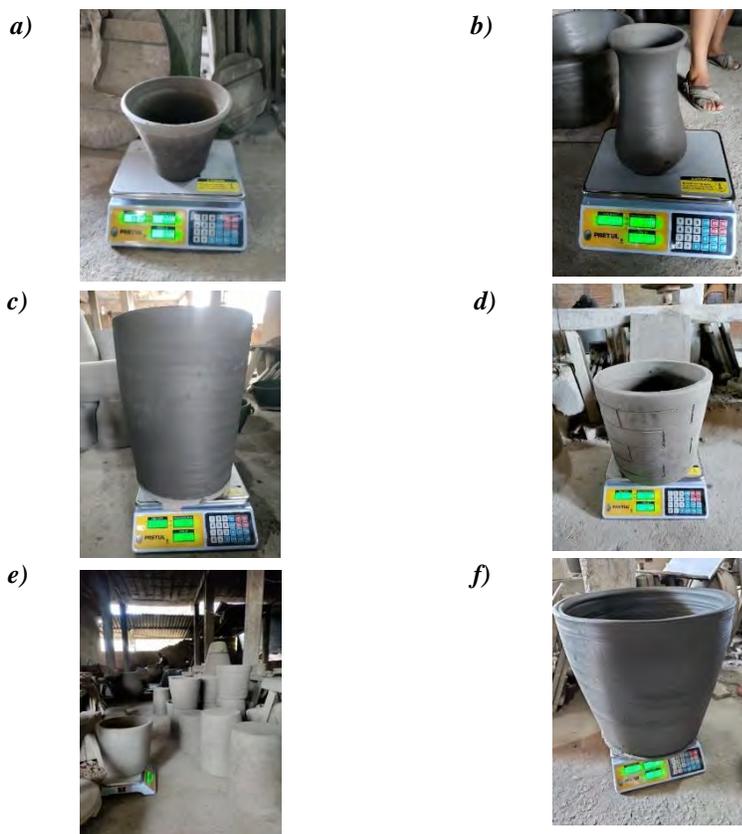


Figura 4.1. Muestras representativas.

En las **Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5** mediante gravimetría se identificó la cantidad de agua inicial y final de tres tamaños representativos durante el proceso de secado. Se evaluaron treinta y tres piezas con las siguientes dimensiones; Para la Muestra 1 de 24 cm-diámetro y un peso promedio de 2.4 kg, para la Muestra 2, de 43 cm-diámetro con un peso de 30 kg y para la Muestra 3, de 33 cm-diámetro con un peso de 15.0 kg. El peso por cada lote de piezas de barro fue de 152.8, 360.0 y 945.0 kg/lt. El tiempo efectivo de secado para cada muestra fue de 37.5, 65.8 y 59.0 horas efectivas. El promedio del porcentaje de humedad inicial y final para la Muestra 1 fue de 37.8-44.6% a 5.16-9.5% (*w.b.*), para la Muestra 2 de 14.0-25.6 a 2.0-2.3 (*w.b.*) y para la Muestra 3 de 19.8-24.7 a 3.6-8.6 (*w.b.*). Con un contenido de agua retirar promedio para cada muestra de 34.1, 18.6 y 16.0% (*w.b.*) respectivamente. En la **Figura 4.6** se muestra la temperatura y humedad relativa ambiente para las tres muestras

δ (kg/lt), en el intervalo de 32.6-34 °C y 46-62% con diferencias de 1.4 °C y 5.4%, respectivamente. Es de observar que, las muestras no tienen el mismo peso y tamaño exacto ya que el proceso de elaboración es completamente artesanal.

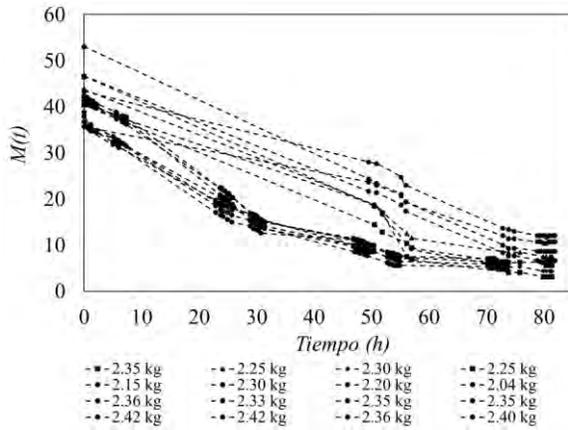


Figura 4.2. Cinética de secado de la Muestra 1 (152.8 kg/lt).

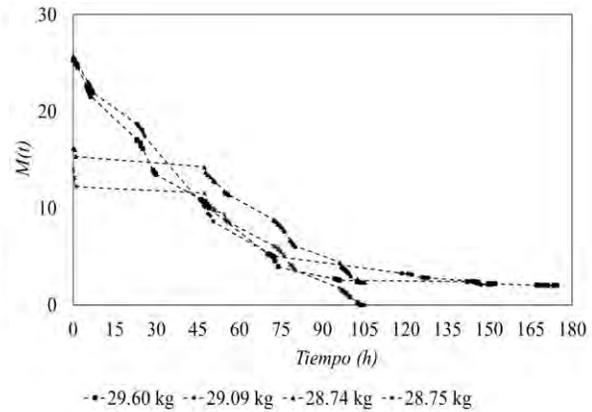


Figura 4.3. Cinética de secado de la Muestra 2 (360.0 kg/lt).

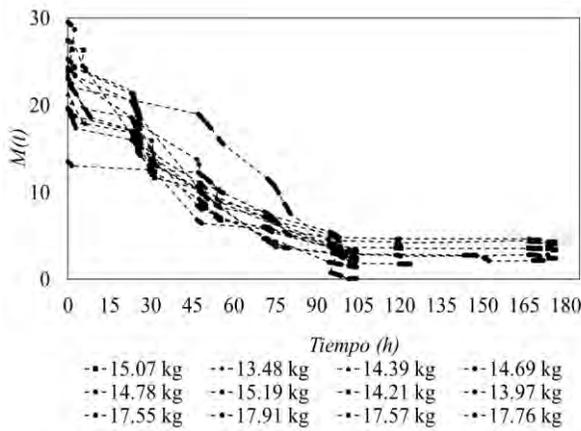


Figura 4.4. Cinética de secado de la Muestra 3 (945.0 kg/lt).

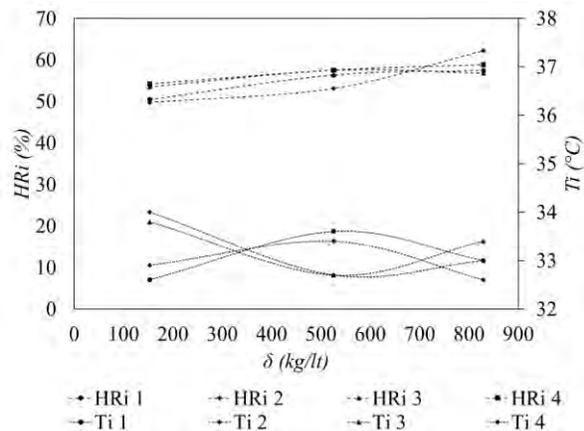


Figura 4.5. Humedad relativa y temperatura en el secado para los tres tipos de lotes.

Cinética de secado de las muestras por día

Como se muestra en la **Figura 4.6** el porcentaje de humedad para la Muestra 1 de 152.8 kg/lt comprendió de 4 días, estuvo en el intervalo de 27.8-39.4, 15.5-29.9, 7.7-18.5 y 5.3-10.3, respectivamente. Para la Muestra 2 de 360.0 kg/lt el periodo de secado comprendió de 8 días. El promedio de humedad para cada día fue en rango de 12.9-22.0, 11.4-14.3, 7.5-11.3, 4.1-6.6, 1.3-3.65, 0.8-2.8, 0.7-2.5 y 0.6-2.3 como se muestra en la **Figura 4.7**. Para la Muestra 3 de 945.0 kg/lt el tiempo de secado fue de 5 días, el promedio de humedad diario estuvo en el rango 16.8-21.6, 14.3-15.0, 8.1-11.2, 5.4-5.7 y 2.8-3.7 como se visualiza en la **Figura 4.8**.

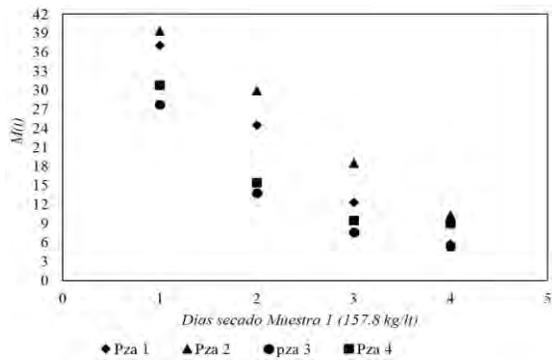


Figura 4.6. Porcentaje de humedad diario para la Muestra 1.

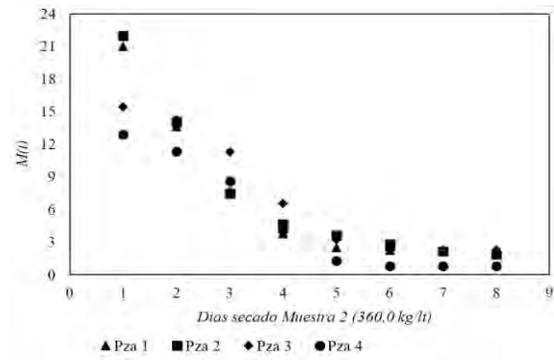


Figura 4.7. Porcentaje de humedad diario para la Muestra 2.

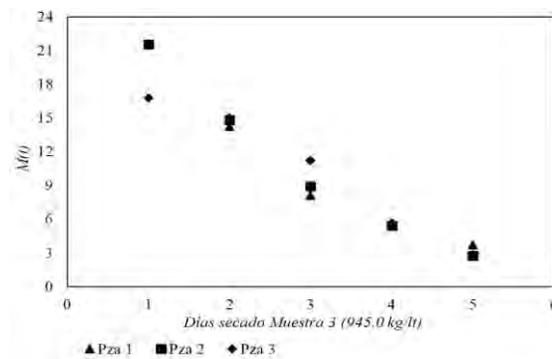


Figura 4.8. Porcentaje de humedad diario para la Muestra 3.

4.2 Requerimientos energéticos (Ixtaltepec)

La **Figura 4.9, 4.10 y 4.11** muestra los requerimientos energéticos para las tres muestras, la energía específica, la energía solar que se suministra y la energía requerida y para lotes de 152.8, 360.0, y 945.0 kg/lt . La **Figura 4.9** muestra la energía suministrada promedio Q_s para cada muestra fue de 81.3, 151.5 y 343.0 MJ , con tiempos efectivos de 38, 60 y 65 h , donde se observa que para el lote de 945.0 kg/lt requirió más energía y mayor tiempo de secado. Para las tres las muestras, la R^2 fue de 0.45. En la **Figura 4.10** la energía específica para cada peso de lote fue de 0.53, 0.37 y 0.16 MJ , con lo que se identificó que para el lote de secado de 152.8 kg/lt la energía específica fue mayor, esto porque el peso de la muestra fue menor por m^2 en relación a los otros pesos por lote. En la **Figura 4.11** se muestra la energía requerida para cada lote de artesanías de barro, identificándose de 117.9, 151.5 y 343.0 MJ , para una cantidad de 65, 12 y 63 piezas de barro por lote. La energía requerida es el resultado de los kilogramos de agua a retirar y el calor latente de evaporación del agua de 2257 kJ/kg .

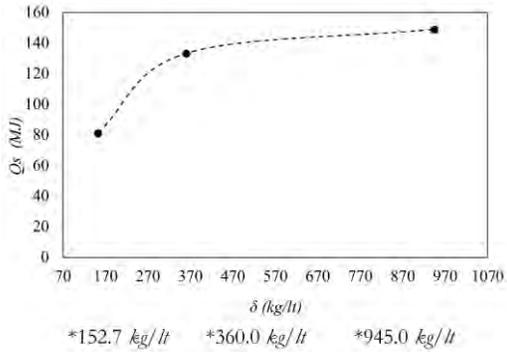


Figura 4.9. Energía solar suministrada promedio por lote de secado.

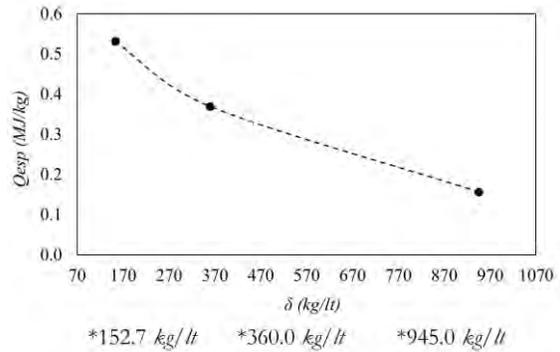


Figura 4.10. Energía específica promedio por lote de secado.

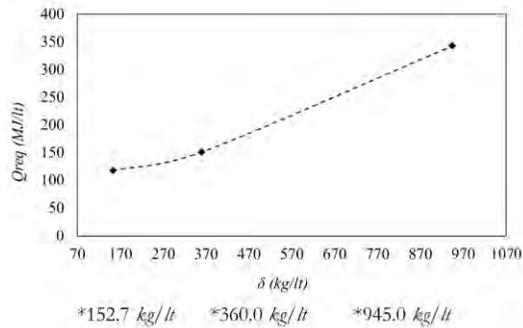


Figura 4.11. Energía requerida promedio por lote de secado.

Energía requerida de las muestras por día

Como se muestra en la **Figura 4.12** la energía requerida para la Muestra 1 de 152.8 kg/lt comprendió de 4 días, para cada día el intervalo fue de 95.9-135.9, 47.6-103.1, 26.6-63.8, 18.3-35.5 respectivamente. Para la Muestra 2 de 360.0 kg/lt el periodo de secado comprendió de 8 días. La Energía requerida promedio para cada día fue en rango de 104.8-178.8, 92.6-116.2, 60.9-91.8, 33.3-53.6, 10.6-26.8, 6.5-18.9, 6.4-18.8 y 6.3-18.7 respectivamente, como se muestra en la **Figura 4.13**. Para la Muestra 3 de 945.0 kg/lt el tiempo de secado fue de 5 días, la Energía requerida promedio estuvo en el rango 358.3-460.7, 315.7-319.9, 189.8-238.9, 121.6-123.5 y 59.7-78.9, respectivamente, como se visualiza en la **Figura 4.14**.

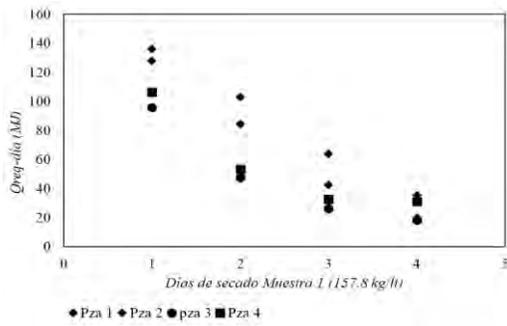


Figura 4.12. Energía requerida promedio diario para la Muestra 1.

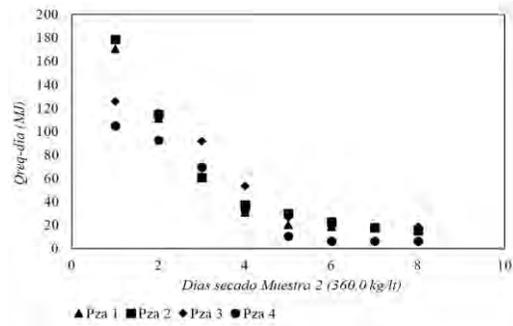


Figura 4.13. Energía requerida promedio diario para la Muestra 2.

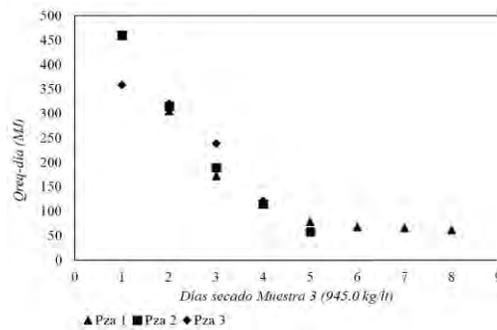


Figura 4.14. Energía requerida promedio diario para la Muestra 3.

4.3 Desempeño térmico del calentador (propuesta tecnológica)

La **Figura 4.15** visualiza la temperatura de secado mínima, máxima y promedio para la Muestra 1. La temperatura de salida de los colectores de aire estuvo en el rango de 29.5-33.7 °C y una temperatura promedio de 31.5 °C. La temperatura ambiente fue de 27.0-29.4 y promedio de 28.0 °C. La irradiancia anual y promedio estuvo en el rango de 3.9-7.2 y 5.8 MJ/m^2-a respectivamente.

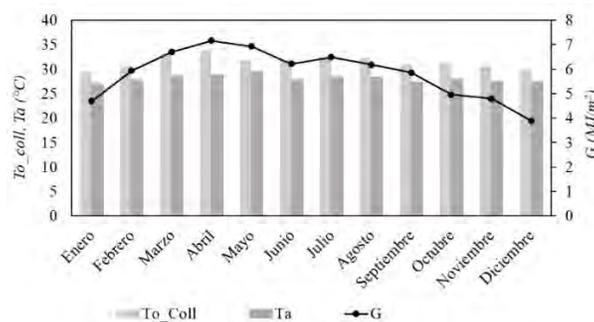


Figura 4.15. Temperatura e irradiancia del calentador mínima, máxima, y promedio de la Muestra 1.

La **Figura 4.16** visualiza la temperatura del calentador solar mínima, máxima y promedio para la Muestra 2. La temperatura de salida de los colectores de aire fue de 29.9-34.4 °C con una temperatura promedio de 32.1 °C.

La temperatura ambiente fue de 27.0-29.4 y promedio de 28.0 °C. La irradiancia anual estuvo en el rango de 4.9-9.0 y promedio de 7.3 MJ/m²-a, respectivamente.

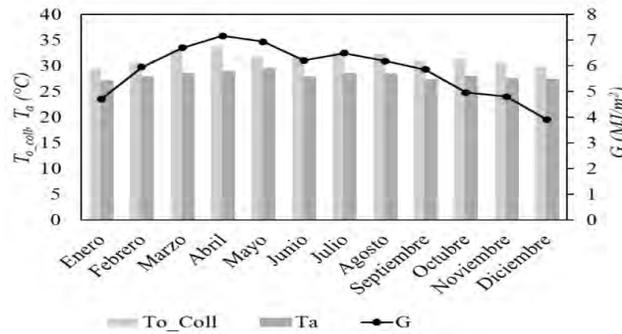


Figura 4.16. Temperatura e irradiancia del calentador máxima, mínima y promedio de la Muestra 2.

La **Figura 4.17** presenta la temperatura de secado mínima, máxima y promedio para la Muestra 3. La temperatura de salida de los colectores de aire fue de 29.9-34.4 °C con una temperatura promedio de 32.1 °C. La temperatura ambiente fue de 27.0-29.4 y promedio de 28.0 °C. La irradiancia anual y promedio estuvo en el rango de 4.9-9.0 y 7.3 MJ/m²-a respectivamente.

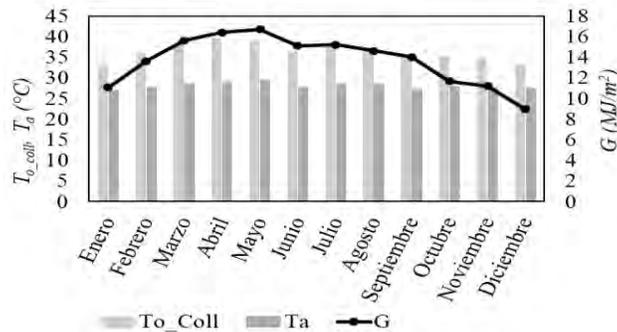


Figura 4.17. Temperatura e irradiancia del calentador máxima, mínima y promedio de la Muestra 3.

La **Tabla 4.1** muestra el desempeño del calentador para el secado de las tres muestras representativas de los alfareros (152.8, 360.0 y 945.0 kg/lt) en la comunidad de Ixtaltepec-México considerando el recurso energético disponible. La carga de calentamiento requerida por día de cada muestra fue de 29.5, 21.9 y 55.2 MJ, logrando secar 91, 53 y 59 lotes anuales de cada muestra. El tiempo de secado para cada muestra fue de 38, 65.8 y 59.0 horas efectivas para 4, 7 y 6 días con un perfil de trabajo de 9:00 a.m. a 18:30 p.m. (9.5 horas diarias). La propuesta tecnológica considera tres calentadores de placa plana con 7, 9 y 20 colectores, uno para cada una de las muestras (16.4, 21.0 y 47.6 m² de área de captación).

Tabla 4.1. Consumo y desempeño energético para tres calentadores solares.

Requerimientos anuales para el secado de tres muestras representativas		152.8	360.0	945.0	
		kg/lt	kg/lt	kg/lt	
Características físicas	Peso de agua a remover por lote M_w	52.2	67.2	152.0	kg H_2O
	Grupo de lotes anuales	91	53	59	lt
Recurso energético	Irradiación promedio diaria Q_d	18	18	18	MJ/m ²
	Energía requerida Q_{req}	117.9	151.5	343.0	MJ/lt
Propuesta de calentador					
Dimensionamiento	Carga de calentamiento requerida Q_c	29.5	22.0	55.2	MJ
	Tiempo de secado total	38	65.8	59	h
	Días de secado	4.0	7.0	6.0	días
	Tiempo de secado diario	9.5	9.5	9.5	h
	Área de colectores A_c	16.4	21.0	47.6	m ²
	Número de colectores N_c	7	9	20	

En la **Tabla 4.2** se muestra el análisis paramétrico de los tres calentadores, considera las condiciones ambientales del lugar para la operación. El calentamiento del aire ambiente para cada calentador fue de 3.5, 4.4 y 8.3 °C respectivamente. La temperatura de salida promedio de cada calentador fue 31.5, 32.5 y 36.3 °C, el flujo de aire para cada sistema fue de 1.16, 1.15 y 1.14 kg/s, con velocidad promedio del aire de 0.22, 0.22 y 0.23 m/s. La energía útil que aporta cada calentador es de 50.9, 64.3 y 119.9 GJ/a (558.3, 1220.3 y 2040.4 MJ/lt); y la eficiencia de cada calentador de 0.47, 0.46 y 0.38 respectivamente.

Tabla 4.2. Análisis paramétrico del calentador para tres muestras características.

Simulación en TRNSYS del calentador solar		152.8	360.0	945.0	
		kg/lt	kg/lt	kg/lt	
Análisis paramétrico	Temperatura promedio de salida del calentador T_{o_coll}	31.5	32.5	36.3	°C
	Temperatura promedio ambiente T_a	28.0	28	28	°C
	Diferencia promedio de temperaturas ΔT	3.5	4.4	8.3	°C
	Caudal de aire en el calentador \dot{m}	1.16	1.15	1.14	kg/s
	Velocidad del aire del calentador	0.22	0.22	0.22	m/s
	Capacidad del calentador anual Q_{ua}	50.9	64.3	119.9	GJ
	Capacidad energética del calentador por lote Q_{u_lt}	558.3	1220.3	2040.4	MJ/lt
	Eficiencia del calentador η_c	0.47	0.46	0.38	

4.4 Evaluación económica

En esta sección se presentan los costos nivelados específicos de secado como se viene haciendo hoy en día en Ixtaltepec, los costos nivelados específicos del secado con la propuesta tecnológica y los tiempos de retorno de la inversión.

4.4.1 Costos nivelados específicos secado tradicional

La **Tabla 4.3** muestra los costos nivelados del secado tradicional de artesanías de barro de Ixtaltepec-México para las tres muestras (152.8, 360.0 y 945.0 *kg/lt*) durante un periodo anual y de 20 años. **Para Muestra 1**, el costo nivelado anual y el costo a 20 años resulta de \$1,004,415.00 y \$20,088,295.00. El costo de secado unitario fue de 6.16 *\$/kg*, con un costo por kilogramo de la renta de galera de secado 0.63 *\$/kg* y el costo por kilogramo de mano de obra de 5.53 *\$/kg*. Consideramos los kilogramos a secar en base húmeda (*w.b.*) durante veinte años (secar 3,261,075 *kg*), el costo de renta fue de \$2,040,000.00 y el costo de la mano de obra de \$18,040,295.00. **Para la Muestra 2**, el costo nivelado anual y el costo a 20 años fue de \$540,755.00 y \$10,815.103.00. El costo de secado fue de 3.29 *\$/kg*, con un costo de la renta de la galera de secado de 0.62 *\$/kg* y el costo de mano de obra de 2.67 *\$/kg*. En este caso, los kilogramos a secar fueron 3,290,664 *kg*. El costo de renta fue de \$2,040,000.00, y el costo de la mano de obra total de \$8,775,103.00. **Para la Muestra 3**, el costo nivelado anual y el costo de secado a 20 años del secado fue de \$630,431.00 y \$12,608,626.00. El costo de secado fue de 1.59 *\$/kg*, con un costo de la renta de la galera de secado fue de 0.26 *\$/kg* y mano de obra fue de 1.33 *\$/kg*. Los kilogramos de barro a secar durante 20 años fueron 7,926,469 *kg*. El costo de renta fue de \$2,040,000.00 y el costo de la mano de obra de \$10,568,626.

Figura 4.3. Evaluación económica con los costos nivelados del secado tradicional para tres muestras características.

	152.8 <i>kg/lt</i>	360.0 <i>kg/lt</i>	945.0 <i>kg/lt</i>	
Costos renta de galera C_g				
Kilogramos a secar a 20 años	3263644	3290664	7926469	<i>kg</i>
Renta de galera a 20 años	\$2,040,000	\$2,040,000	\$2,040,000	\$
Costo galera	\$0.63	\$0.62	\$0.26	<i>\$/kg</i>
Costos mano de obra C_m				
Pago operadores a 20 años	\$18,048,295	\$8,775,103	\$10,568,626	\$
Costo por kilogramo de mano de obra	\$5.53	\$2.67	\$1.33	<i>\$/kg</i>
Costo de secado unitario	\$6.16	\$3.29	\$1.59	<i>\$/kg</i>
Costo del secado tradicional C_{st}				
Costo anual	\$1,004,415	\$540,755.15	\$630,431.28	\$
Costo a 20 años	\$20,088,295	\$10,815,102.97	\$12,608,625.53	\$

4.4.2 Costos nivelados específicos de propuesta tecnológica

Los costos del secado de artesanías de barro de Ixtaltepec-México con la propuesta tecnológica se detallan en las **Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9.**

La **Tabla 4.4** presenta los costos nivelados a valor presente del calentador solar térmico para la Muestra 1. La inversión inicial I_{mv} de la propuesta con tecnología solar térmica tiene un costo de \$205,790.00, el costo de mantenimiento durante el tiempo de vida del proyecto a valor presente de \$126,340.00, y el costo de mano de obra para secar de \$6,720,000.00. El costo nivelado de la energía térmica del calentador solar fue de 2.14 \$/kg.

Tabla 4.4. *Plataforma de evaluación económica del calentador solar para la Muestra 1.*

Secador solar térmico			
Unidades	Rubros	C.U.	C.T.
7	Calentadores solares placa plana MS 2.5 (2.32 m ²)	\$9,150	\$64,050
7	Estructura de aluminio soporte de colector MS 2.5 (2.32 m ²)	\$1,720	\$12,040
1	Ventilador de aire (2.23 kW)	\$48,200	\$48,200
20	Costo de material hidráulico del sistema de calentamiento de aire	\$100	\$2,000
1	Costo de material eléctrico del sistema de calentamiento de aire	\$500	\$500
1	Variador de frecuencia	\$4,000	\$4,000
3	Mano de obra de instalación	\$25,000	\$75,000
	Subtotal		\$205,790
Costo actual de la Inversión I_{mv}		Total	\$205,790
Unidades	Mantenimiento durante 20 años (Costos a valor presente)		
20	Ventilador mantenimiento anual	\$600	\$12,000
2	Reemplazo de variador de frecuencia cada 10 años	\$4,000	\$8,000
20	Mantenimiento anual del sistema	\$600	\$12,000
5	Reemplazo tubería cada 5 años	\$10,000	\$50,000
	Costo de electricidad ventilador centrífugo		\$44,340
	Costo de mantenimiento (en valor presente)		\$126,340
Costo de mano de obra para secar			\$6,720,000
	Costo de energía PDBT con CFE C_{kwh}	1.15	\$/kWh
	Consumo eléctrico anual C_{ea}	1928	kW
	Consumo eléctrico durante los 20 años de vida	38557	kW
	Costo nivelado de la energía térmica del secador solar	2.14	\$/kg

La **Tabla 4.5** presenta el costo anual del secado con la propuesta tecnológica y durante el periodo de vida del proyecto de \$536,150.26 y \$10,723,005.12 respectivamente. El costo específico unitario de la propuesta tecnológica fue de 3.29 \$/kg. Para esto, el costo por kilogramo eléctrico fue de 1.15 \$/kg con el costo de la tarifa eléctrica de 1.15 \$/kWh y el consumo eléctrico del soplador de 38557 kW. El costo nivelado de la energía térmica durante el periodo de vida del proyecto fue de 2.14 \$/kg. El costo de la energía eléctrica del soplador fue de \$44,340.20, obteniendo un ahorro de \$468,264.47.

Tabla 4.5. Costos nivelados de la propuesta térmica para la Muestra 1.

Costo eléctrico		
Horas de secado diaria	9.5	<i>h/d</i>
Horas anuales por lote	864.5	<i>h/a</i>
Consumo ventilador	2.23	<i>kWh</i>
Consumo eléctrico anual	1928	<i>kWh-e</i>
Costo de la energía eléctrica anual del ventilador	\$2,217	\$
Costo de la energía eléctrica a 20 años	\$44,340	\$
Consumo eléctrico durante los 20 años de vida	38557	<i>kW</i>
Costo por kilogramo eléctrico	1.15	\$/kW
Costo nivelado de la energía térmica	2.14	\$/kg
Costo el secado con propuesta tecnológica C_{pt}	\$3.29	\$/kg

Costo del secado con tecnología solar		
Costo anual	\$536,150.26	\$
Costo a 20 años	\$10,723,005.12	\$

Costo secado anual tradicional	\$1,004,414.73
Costo secado anual con tecnología solar	\$536,150.26
Ahorro	\$468,264.47

La **Tabla 4.6** presenta los costos nivelados a valor presente del calentador solar térmico para la Muestra 2 de \$565,442.28 y \$11,308,845.67. La inversión inicial I_m de la propuesta con tecnología solar térmica tiene un costo de \$227,930.00. El costo de mantenimiento durante el tiempo de vida a valor presente es de \$107,825.00, y el costo de mano de obra para secar de \$7,280,000.00. El costo nivelado de la energía térmica del calentador solar fue de 2.29 \$/kg.

Tabla 4.6. *Plataforma de evaluación económica del calentador solar para la Muestra 2.*

Secador solar térmico			
Unidades	Rubros	C.U.	C.T.
9	Calentadores solares placa plana MS 2.5 (2.32 m ²)	\$9,150	\$82,350
9	Estructura de aluminio soporte de colector MS 2.5 (2.32 m ²)	\$1,720	\$15,480
1	Ventilador de aire (2.23 kW)	\$48,200	\$48,200
24	Costos de material hidráulico del sistema de calentamiento de aire	\$100	\$2,400
1	Costos de material eléctrico del sistema de calentamiento de aire	\$500	\$500
1	Variador de frecuencia	\$4,000	\$4,000
3	Mano de obra de instalación	\$25,000	\$75,000
	Subtotal		\$227,930
Costo actual de la Inversión I_m		Total	\$227,930
Mantenimiento durante 20 años (Costos a valor presente)			
20	Ventilador mantenimiento anual	\$600	\$12,000
2	Reemplazo de variador de frecuencia cada 10 años	\$4,000	\$8,000
20	Mantenimiento anual del sistema	\$600	\$12,000
5	Reemplazo tubería cada 5 años	\$10,000	\$50,000
	Costo de electricidad ventilador centrífugo		\$25,825
Costo de mantenimiento (en valor presente)			\$107,825
Costo de mano de obra para secar			\$7,280,000
Costo de energía PDBT con CFE C_{kwh}			1.15 \$/kWh
Consumo eléctrico anual C_{ea}			1123 kW
Generación de electricidad durante los 20 años de vida			22456 kW
Costo nivelado de la energía térmica del secador solar			\$2.29 \$/kg

La **Tabla 4.7** presenta el costo anual del secado con tecnología solar y durante el periodo de vida de \$565,442.28 y \$11,308,845.67 respectivamente. Se determina el costo unitario de la propuesta tecnológica de 3.44 \$/kg. Para esto se determinó el costo por kilogramo eléctrico de 1.15 \$/kg con el costo de la tarifa eléctrica de 1.15 \$/kWh y el consumo eléctrico del soplador de 22456 kWh. El costo nivelado de la energía térmica durante el periodo de vida del proyecto fue de 2.29 \$/kg. El costo de la energía eléctrica del soplador fue de \$25,825.00. El secado con la tecnología solar tiene una diferencia de \$24,687.13, haciéndolo 4.57% veces más caro.

Tabla 4.7. Costos nivelados de la propuesta térmica para la Muestra 2.

Costo eléctrico		
Horas de secado diaria	9.5	<i>h/d</i>
Horas anuales por lote	503.5	<i>h/a</i>
Consumo ventilador	2.23	<i>kWh</i>
Consumo eléctrico anual	1123	<i>kWh-e</i>
Costo de la energía eléctrica anual del ventilador	\$1,291	\$
Costo de la energía eléctrica a 20 años	\$25,825	\$
Consumo eléctrico durante los 20 años de vida	22456	<i>kWh</i>
Costo por kilogramo eléctrico	\$1.15	<i>\$/kWh</i>
Costo nivelado de la energía térmica	\$2.29	<i>\$/kg</i>
Costo el secado con propuesta tecnológica C_{pt}	\$3.44	<i>\$/kg</i>

Costo del secado con tecnología solar	
Costo anual	\$565,442.28
Costo a 20 años	\$11,308,845.67

Costo secado anual tradicional	\$540,755.15
Costo secado anual con tecnología solar	\$565,442.28
Mas caro	\$24,687.13
	4.57%

La **Tabla 4.8** presenta la inversión inicial I_{nv} de la Muestra 3 con tecnología solar térmica de \$374,100.00, el costo de mantenimiento durante el tiempo de vida del proyecto a valor presente de \$110,748.00, y el costo de mano de obra para secar de \$8,400,000.00. El costo nivelado de la energía térmica del calentador solar fue de 1.1 \$/kg.

Tabla 4.8. Plataforma de evaluación económica del calentador solar para la Muestra 3.

Secador solar térmico			
Unidades	Rubros	C.U.	C.T.
20	Calentadores solares placa plana MS 2.5 (2.32 m ²)	\$9,150	\$183,000
20	Estructura de aluminio soporte de colector MS 2.5 (2.32 m ²)	\$1,720	\$34,400
1	Ventilador de aire (2.23 kW)	\$48,200	\$48,200
40	Costos de material hidráulico del sistema de calentamiento de aire	\$100	\$4,000
1	Costos de material eléctrico del sistema de calentamiento de aire	\$500	\$500
1	Variador de frecuencia	\$4,000	\$4,000
4	Mano de obra de instalación	\$25,000	\$100,000
		Subtotal	\$374,100
		Costo actual de la Inversión I_{nv}	Total \$374,100
Mantenimiento durante 20 años (Costos a valor presente)			
20	Ventilador mantenimiento anual	\$600	\$12,000
2	Reemplazo de variador de frecuencia cada 10 años	\$4,000	\$8,000
20	mantenimiento anual del sistema	\$600	\$12,000
5	reemplazo tubería cada 5 años	\$10,000	\$50,000
		Costo de electricidad ventilador centrífugo	\$28,748
		Costo de mantenimiento (en valor presente)	\$110,748
		Costo mano de obra para secar	\$8,400,000
		Costo de energía PDBT con CFE C_{kwh}	1.15 \$/kWh
		Consumo eléctrico anual C_{ea}	1250 kW-a
		Generación de electricidad durante los 20 años de vida	24998 kW
		Costo nivelado de la energía térmica del secador solar C_{nt}	\$1.1 \$/kg

La **Tabla 4.9** presenta el costo anual del secado de la Muestra 3 con tecnología solar, el costo del proyecto es de \$892,532.00 y \$17,850,648.00, respectivamente. El costo unitario de la propuesta tecnológica de la Muestra 3 fue de 2.25 \$/kg. Para esto el costo por kilogramo eléctrico fue de 1.15 \$/kg con el costo de la tarifa eléctrica de 1.15 \$/kWh y el consumo eléctrico del soplador de 24998 kWh. El costo nivelado de la energía térmica durante el periodo de vida del proyecto fue de 2.25 \$/kg. El costo de la energía eléctrica del soplador fue de \$28,748.00. El secado con la tecnología solar tiene una diferencia de \$24,687.13, haciéndolo 45.7% veces más caro.

Tabla 4.9. Costos nivelados de la propuesta térmica para la Muestra 3.

Costo eléctrico	
Horas de secado diaria	9.5 h/d
Horas anuales por lote	560.5 h/a
Consumo ventilador	2.23 kWh
Consumo eléctrico anual	1250 kWh-e
Costo de la energía eléctrica anual del ventilador	\$1,437 \$
Costo de la energía eléctrica a 20 años	\$28,748 \$
Consumo eléctrico durante los 20 años de vida	24998 kW
Costo por kilogramo eléctrico	1.15 \$/kW
Costo nivelado de la energía térmica C_{nt}	\$1.10 \$/kg
Costo el secado con propuesta tecnológica C_{pt}	\$2.25 \$/kg
Costo del secado con tecnología solar	
Costo anual	\$892,532.38
Costo a 20 años	\$17,850,647.56
Costo secado anual tradicional	\$630,431.28
Costo secado anual con tecnología solar	\$892,532.38
Mas caro	\$262,101.10
	41.57%

4.4.3 Tiempo de retorno de la Muestra 1

La **Tabla 4.10** presenta un análisis económico del calentador propuesto para la Muestra 1 (152.8 kg/lt), para un escenario de inversión de 20 años. El ahorro total del proyecto fue de \$9,365,290.00, el VAN de \$421,869.00, y la *TIR* de 121%. El calentador de la Muestra 1 fue el único que presentó ahorros de la de la inversión, las Muestras 2 y 3 no generaron tiempo de retorno de la inversión. Los costos del proyecto para la Muestra 2 y 3 fueron de \$493,742.60 y \$5,242,022.00 por arriba de la Muestra 1.

Tabla 4.10. Progresión anual de los costos nivelados del calentador solar y su valor actual para 91 lotes en paralelo anuales.

Periodos	Beneficio	TIR	TR
		VAN de flujo de caja	Flujo de caja acumulado
0	Inversión inicial	-\$332,130	-\$332,130
1	\$468,387	\$421,971	\$89,840
2	\$489,465	\$397,261	\$487,101
3	\$511,491	\$373,998	\$861,098
4	\$534,508	\$352,097	\$1,213,195
5	\$558,561	\$331,479	\$1,544,674
6	\$583,696	\$312,068	\$1,856,741
7	\$609,962	\$293,793	\$2,150,535
8	\$637,410	\$276,589	\$2,427,124
9	\$666,094	\$260,393	\$2,687,516
10	\$696,068	\$245,144	\$2,932,661
11	\$727,391	\$230,789	\$3,163,450
12	\$760,124	\$217,274	\$3,380,724
13	\$794,329	\$204,551	\$3,585,275
14	\$830,074	\$192,573	\$3,777,848
15	\$867,427	\$181,296	\$3,959,144
16	\$906,462	\$170,680	\$4,129,824
17	\$947,252	\$160,685	\$4,290,509
18	\$989,879	\$151,275	\$4,441,784
19	\$1,034,423	\$142,417	\$4,584,201
20	\$1,080,972	\$134,077	\$4,718,279
VAN TOTAL		\$4,718,279	
		Periodo de recuperación	0.8

Considerando en el estudio los tres calentadores solares, el periodo de recuperación de la inversión de la Muestra 1 fue de 0.8 años, y se resalta que fue el único que mostró ahorros. Actualmente en México, los proyectos solares se consideran redituables cuando el tiempo de retorno es menor a tres años. Así, el calentador solar para la Muestra 1 puede considerarse viable.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

En este capítulo se presentan las conclusiones generales de acuerdo con los objetivos planteados del trabajo de investigación. También, algunas recomendaciones para continuar con trabajos previos.

Conclusiones

- La viabilidad de la energía solar térmica para el secado por lotes barro de alfarería se estudió a usanza de los alfareros de Ixtaltepec-México. El dimensionamiento de un calentador solar de aire para secado de barro se desarrolló, considerando la demanda requerida del secado, y las condiciones ambientales del lugar de estudio.
- Los resultados de las muestras de barro se identificaron para tres tipos (152.8, 360.0 y 945.0 *kg/lt*). Se determinaron los tiempos efectivos en el secado de 37.5, 65.8 y 59.0 y el contenido de humedad de las piezas de barro a usanza de los alfareros. Para la Muestra 1 el porcentaje de humedad inicial y final fue de 37.8-44.6% a 5.16-9.5% (*w.b.*), para la Muestra 2, de 14.0-25.6 a 2.0-2.3 (*w.b.*) y para la Muestra 3 de 19.8-24.7 a 3.6-8.6 (*w.b.*) respectivamente. Con una masa de agua a retirar por cada lote de 52.2, 67.1 y 151.9 *kg*. Cabe resaltar que todas las muestras son elaboradas a mano y ninguna mantuvo un peso exacto.
- Los requerimientos energéticos se obtuvieron del estudio en campo para tres tipos de lotes de acuerdo a las muestras de barro. La irradiancia suministrada promedio para cada muestra durante el tiempo de secado resultó de 81.3, 151.5 y 343.0 *MJ* respectivamente. La energía específica por *kg* fue de 0.53, 0.37 y 0.16 *MJ/kg*. La energía requerida para cada lote de artesanías de barro resultó de 117.9, 151.5 y 343.0 *MJ* para una cantidad de 65, 12 y 63 piezas de barro a secar por lote.
- Los resultados del desempeño térmico mostraron el desempeño de tres calentadores solares para muestras representativas de los alfareros (152.8, 360.0 y 945.0 *kg/lt*) en la comunidad de Ixtaltepec-México considerando el recurso energético disponible. La carga de calentamiento requerida por día de cada muestra fue de 29.5, 21.9 y 55.2 *MJ*, logrando secar 91, 53 y 59 lotes anuales de cada muestra. El tiempo de secado para cada muestra fue de 38, 65.8 y 59.0 horas efectivas durante 4, 7 y 6 días con un perfil de trabajo de 9:00 a.m. a 18:30 p.m. (9.5 horas diarias). La propuesta tecnológica consideró tres calentadores de placa plana con 7, 9 y 20 colectores, uno para cada una de las muestras (16.4, 21.0 y 47.6 *m*² de área de captación).
- Los resultados del análisis paramétrico para tres calentadores, consideró los recursos ambientales del lugar de estudio como datos de operación. El calentamiento del aire ambiente para cada calentador fue de 3.5, 4.4 y 8.3 °C respectivamente. La temperatura de salida promedio de cada calentador fue 31.5, 32.5 y 36.3 °C, el flujo de aire para cada sistema fue de 1.16, 1.15 y 1.14 *kg/s*, con velocidad promedio del aire de 0.22, 0.22 y 0.23 *m/s*. La energía útil que aportó cada calentador fue de 50.9, 64.3 y 119.9 *GJ/a* (558.3, 1220.3 y 2040.4 *MJ/lt*); y una eficiencia de cada calentador de 0.47, 0.46 y 0.38 respectivamente.
- Los resultados del análisis económico se realizaron para tres muestras que se consideraron representativas de acuerdo a un estudio en campo (152.8, 360.0 y 945.0 *kg/lt*), de acuerdo a los costos nivelados del secado tradicional y de la propuesta tecnológica durante un periodo anual. Para cada muestra, el costo del secado tradicional fue de \$1,004,414.73, \$540,755.15 y \$630,431.28, con un costo de secado de 6.16, 3.29 y 1.59 *\$/kg*. El costo anual para cada calentador fue de \$536,027.44, \$565,442.28 y \$892,532.38 y un costo de secado de 3.29, 3.44 y 2.25 *\$/kg*. Así, el costo de la propuesta tecnológica para las Muestra 1 fue menor que el del secado tradicional, observándose viabilidad en este caso con un ahorro anual de \$468,264.47;

sin embargo, para la Muestra 2 y 3 los costos del secado con la propuesta tecnológica resultaron 4.57 y 41.56% más elevados.

- Los resultados del análisis económico para tres calentadores, con un escenario a 20 años, el calentador solar para la Muestra 1 fue el único que presentó ahorros y tiempo de recuperación de la inversión adecuados. El tiempo de retorno de la inversión fue de 0.8 años, el ahorro total por el proyecto fue de \$9,365,290.00, el VAN de \$421,869.00, y la *TIR* de 121%. Para las Muestras 2 y 3, no se generó un tiempo de retorno de la inversión debido a que no surgieron ahorros por el uso de la energía solar. Los costos del proyecto para la Muestra 2 y 3 fueron de \$493,742.60 y \$5,242,022.00 por arriba de la Muestra 1.
- La metodología empleada permitió un estudio térmico-económico para suministrar calor al proceso de secado de piezas de barro de alfarería de la comunidad de Ixtaltepec-México. Los análisis empleados del calentador solar de aire permitieron determinar su desempeño energético. También, el análisis económico permitió tener un panorama más amplio de los costos del proceso de secado de barro y de la implementación de sistemas con energía solar térmica.

Recomendaciones para trabajos futuros

- Implementar en campo la propuesta tecnológica para el secado de artesanías de barro con el fin de hacer ajustes a los modelos utilizados en este trabajo, con el fin de afinar incertidumbres para cálculos futuros.
- Desarrollar un secador solar para piezas de barro que se acople al calentador solar propuesto, para estudiar los coeficientes de transporte de masa y energía, así como su viabilidad en conjunto.
- Estudiar la calidad de las artesanías con análisis químicos, mineralógicos, granulométricos identificando las propiedades del material, que permita distinguir propiedades físico-químicas del barro.

Referencias

1. ASTM C20-00 Método de prueba estándar para porosidad aparente, absorción de agua, gravedad específica aparente y densidad aparente de ladrillo refractario quemado y formas de agua hirviendo.
2. ASTM D2216-19 Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo y roca.
3. ASTM D2974-00 Método de prueba estándar para humedad, cenizas y materia orgánica de turba y otros suelos orgánicos.
4. ASTM D4959-00 Método de prueba estándar para determinación del contenido de agua (humedad) del suelo por vía directa (calefacción).
5. Aguilar-Castro, K. M., Flores-Prieto, J. J., Baltazar-Lopez, M. E., & Macias-Melo, E. V. (2012). Design and experimental evaluation of a mixed-mode continuous solar dryer for plaster molds. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(9), 2969–2976. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0707-x>
6. Álvarez-sánchez, F., Flores-prieto, J., & García-valladares, O. (2021). Annual thermal performance of an industrial hybrid direct–indirect solar air heating system for drying applications in morelos-méxico. *Energies*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/en14175417>
7. Baltazar-lopez, M. E., Bahena-bustos, J. C., Castillo-rincon, R., Flores-prieto, J. J., & Perez-salmeron, D. (2006). *Modelling , Design and construction of a Solar Space Conditioning System*. 2(November), 1–10.
8. Boles, Y. A. C. & M. A. (2005). Termodinámica, 7ma Edición. *NASPA Journal*, 42(4), 1.
9. Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., & Bechki, D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar - Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy*, 83(12), 2223–2232. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.09.006>
10. Bououd, M., Hachchadi, O., Janusevicius, K., Mechaqrane, A., & Martinaitis, V. (2018). Energy performance of a clay tiles solar drying system. *AIP Conference Proceedings*, 2056(December). <https://doi.org/10.1063/1.5084987>
11. Bououd, M., Hachchadi, O., & Mechaqrane, A. (2018). Plate flat finned tubes heat exchanger: Heat transfer and pressure drop modeling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 161(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/161/1/012001>
12. Bououd, M., & Mechaqrane, A. (2017). Concentration solar dryer water-to-air heat exchanger: Modeling and parametric studies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(13), 8631–8643. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.031>
13. Connelly, M. C. (2003). *The Drying of Clay Based Ceramics*. 9.
14. Darío, J., Amado, S., Yesid, P., & Villafrades, M. (2009). Caracterización De Arcillas Y Preparación De Pastas Cerámicas Para La Fabricación De Tejas Y Ladrillos En Characterization of Clays and Preparation of Ceramic Pastes for the Manufacture of Roofing Tiles and Bricks in the Region of Barichara, Santander *Elc*. 78, 50–58.

15. Díaz Rodríguez, L. A., & Torrecillas, R. (2002). Cerámica y Vidrio de sus distintos tipos , significados y aplicaciones. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 41(5), 459–470. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/4676/1/arcillas.pdf>
16. Diersch, H. J. G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühak, W., & Schätzl, P. (2011). Finite element modeling of borehole heat exchanger systems. Part 2. Numerical simulation. *Computers and Geosciences*, 37(8), 1136–1147. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.002>
17. Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>
18. Flores-Prieto, J. J., Aguilar-Castro, K. M., Baltazar-López, M. E., Alvarez, G., Castillo-Rincón, R., & Bahena-Bustos, J. C. (2014). Indoor indirect solar dryer for ceramic craft industry. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(1), 349–356. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0974-1>
19. García-Valladares, O., Ortiz, N. M., Pilatowsky, I., & Menchaca, A. C. (2020). Solar thermal drying plant for agricultural products. Part 1: Direct air heating system. *Renewable Energy*, 148, 1302–1320. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.069>
20. Hassan, U; Adeleke, W.A; Mohammed, M; Adamu, M.A; Sanusi, A. (2020). Evaluation of thermal storage capacities of some selected materials for solar drying applications. *FUDMA Journal of Sciences (FJS)*, 4(3), 192–196.
21. Khanlari, A., Güler, H. Ö., Tuncer, A. D., Şirin, C., Bilge, Y. C., Yılmaz, Y., & Güngör, A. (2020). Experimental and numerical study of the effect of integrating plus-shaped perforated baffles to solar air collector in drying application. *Renewable Energy*, 145, 1677–1692. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.076>
22. Khouya, A. (2020). Effect of regeneration heat and energy storage on thermal drying performance in a hardwood solar kiln. *Renewable Energy*, 155, 783–799. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.178>
23. Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A., & Nayak, P. K. (2019). Performance analyses of mixed mode forced convection solar dryer for drying of stevia leaves. *Solar Energy*, 188(September 2018), 507–518. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.009>
24. Lakshmikantha, M. R. (2009). Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. *Ph.D. Thesis, Polytechnic University of Catalonia-BarcelonaTech, Barcelona, Spain., PhD*, 1 disc òptic (CD-ROM).
25. Lauterbach, C., Schmitt, B., & Vajen, K. (2014a). System analysis of a low-temperature solar process heat system. *Solar Energy*, 101, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.014>
26. Lauterbach, C., Schmitt, B., & Vajen, K. (2014b). System analysis of a low-temperature solar process heat system. *Solar Energy*, 101, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.014>
27. Lingayat, A., Chandramohan, V. P., & Raju, V. R. K. (2017). Design, Development and Performance of Indirect Type Solar Dryer for Banana Drying. *Energy Procedia*, 109(November 2016), 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.041>

28. Luz, A. P., Moreira, M. H., Braulio, M. A. L., Parr, C., & Pandolfelli, V. C. (2021). Drying behavior of dense refractory ceramic castables. Part 1 – General aspects and experimental techniques used to assess water removal. *Ceramics International*, 47(16), 22246–22268. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.022>
29. Macias-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K. M., Alvarez-Lemus, M. A., & Flores-Prieto, J. J. (2015). A method based on infrared detection for determining the moisture content of ceramic plaster materials. *ISA Transactions*, 58, 667–673. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.03.014>
30. Martinez-lopez, E., & Lira-cortes, L. (2013). Moisture transfer analysis during drying of brick by temperature and relative humidity profiles. *European Scientific Journal*, 9(33), 109–122.
31. Mauer, L. J., & Bradley, R. L. (2017). Moisture and Total Solids Analysis. 257–286. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45776-5_15
32. Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, 208(February), 321–344. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.098>
33. Ogawa, T., Kobayashi, T., & Adachi, S. (2012). Prediction of pasta drying process based on a thermogravimetric analysis. *Journal of Food Engineering*, 111(1), 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.011>
34. Oliveira, H. A., Silva, D. C., Oliveira, R. M. P. B., Santos, C. P., de Jesus, E., & Macedo, Z. S. (2018). Estimating isotherm parameters of drying clay for the ceramic industry of Sergipe, Brazil. *Applied Clay Science*, 161(June 2017), 211–214. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.013>
35. Santos, R. S., de Farias Neto, S. R., Barbosa de Lima, A. G., Silva Júnior, J. B., & da Silva, A. M. V. (2020). Drying of Ceramic Bricks: Thermal and Mass Analysis via CFD. *Diffusion Foundations*, 25, 133–153. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/df.25.133>
36. Slevin, R. (2002). Characterising ceramics during the drying process. *September*, 17–19.
37. Vasconcellos Araújo, M., Sousa Santos, R., Moura da Silva, R., Silva do Nascimento, J. B., Gomes dos Santos, W. R., & Barbosa de Lima, A. G. (2019). Drying of industrial hollow ceramic brick: A numerical analysis using CFD. *Defect and Diffusion Forum*, 391(July), 48–53. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.391.48>
38. Widén, J., & Munkhammar, J. (2019). Solar Radiation Theory. In *Solar Radiation Theory* (Issue April). <https://doi.org/10.33063/diva-381852>
39. Yin, Z., Enshen, L., Xinhui, Z., Zhenghao, J., Qinjian, L., Fei, L., & Yang, M. (2017). Combined solar heating and air-source heat pump system with energy storage: Thermal performance analysis and optimization. *Procedia Engineering*, 205, 4090–4097. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.903>
40. Zaccaron, A., de Souza Nandi, V., & Bernardin, A. M. (2021). Fast drying for the manufacturing of clay ceramics using natural clays. *Journal of Building Engineering*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101877>
41. Zoukit, A., El Ferouali, H., Salhi, I., Doubabi, S., & Abdenouri, N. (2019). Design of mamdani type fuzzy controller for a hybrid solar-electric dryer: Case study of clay drying. *2019 6th International*

Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019, 1332–1337.
<https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820581>