



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

IMPLEMENTACIÓN DE UNA ALTERNATIVA PILOTO PARA DEJAR DE USAR  
COMBUSTIBLES FÓSILES UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR PARA SECAR LADRILLOS DE  
AGREGADOS RECICLADOS

TESIS  
QUE OPTA POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ALBERTO RODAS JOO

TUTOR PRINCIPAL:  
DRA. MARÍA NEFTALÍ ROJAS VALENCIA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR:  
DR. HÉCTOR MIGUEL AVIÑA JIMÉNEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM  
DR. JOSÉ ANTONIO BARRIOS PÉREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Jurado Asignado:

Presidente: Dr. José Manuel Vicente Gómez Soberón

Secretario: Dr. José Antonio Barrios Pérez

1er Vocal: M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo

2do Vocal: Dr. Héctor Miguel Jiménez Aviña

3er Vocal: Dra. María Neftalí Rojas Valencia

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Edificio 5, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Taller de ladrillos del laboratorio de Ingeniería Ambiental LIA.

Laboratorio de calidad de materiales, LIEC.

Área de maniobras, bodega de materiales, DIAAGA.

Laboratorio de estructuras y materiales, Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTORA DE TESIS:

Dra. María Neftalí Rojas Valencia

-----

Firma



## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Justificación.....	5
1.2 Objetivos.....	7
1.2.1 Objetivo general.....	7
1.2.2 Objetivos particulares.....	7
1.3 Alcances.....	9
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>11</b>
2.1 El ladrillo.....	11
2.1.1 Ladrillos ecológicos.....	11
2.1.2 Forma del ladrillo.....	12
2.2 Especificaciones para ladrillos.....	12
2.3 Procesos en la fabricación del ladrillo rojo.....	19
2.3.1 Extracción de la materia prima.....	21
2.3.2 Preparación de pasta (barro).....	22
2.3.3 Moldeo de piezas.....	24
2.3.4 Secado.....	24
2.3.5 Horneado tradicional.....	25
2.3.6 Enfriamiento.....	26
2.4 Clasificación de hornos según su flujo de producción.....	26
2.4.1 Hornos intermitentes.....	26
2.4.2 Hornos semicontinuos.....	27
2.4.3 Hornos continuos.....	28
2.5 Hornos con energías alternativas.....	29
2.5.1 Horno eléctrico tipo mufla.....	29
2.5.2 Horno solar.....	29
2.6 El sol.....	31
2.6.1 Irradiancia.....	31
2.6.2 Radiación.....	33
2.6.3 Posicionamiento solar.....	33
2.6.4 Secadores solares según su funcionamiento.....	35
2.6.5 Ejemplos de colectores solares según su intensidad.....	35
2.6.6 Colectores solares según su rango de temperatura.....	36
2.6.7 Calor y radiación.....	37
2.7 Normatividad.....	38
2.7.1 Normas para ladrillos.....	38
2.7.2 Normas para desecadores solares.....	38
2.8 Implementación de mejoras en el proceso de cocido de ladrillo.....	39
2.8.1 Calderas.....	39
2.8.2 Inyección de aire con ayuda de ventiladores.....	40
2.8.3 Hornos MK y MK3.....	40
2.8.4 Diferentes combustibles para el proceso de horneado.....	42
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	<b>43</b>
3.1 Concentrador solar parabólico fuera de eje.....	43

3.2 Secador solar con tetrapack .....	44
3.3 Secador solar con aluminio .....	45
3.4 Horno solar para secado de ladrillos con aislante de poliestireno expandido y cuatro caras reflejantes....	45
3.5 DeseCADador solar con aluminio y láminas de acero .....	46
3.6 Horno solar con espejos.....	46
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>49</b>
4.1 Etapa 1 “Estado del arte” .....	50
4.1.1 Recopilación y Análisis de Información .....	50
4.2 Etapa 2 “Trabajo en campo” .....	51
4.3 Etapa 3 “Fabricación y comparativa de ladrillos rojos” .....	52
4.3.1 Pruebas a los ladrillos.....	60
4.4 Etapa 4: “Mediciones de campo” .....	67
4.4.1 Instrumentos y equipos a utilizar en las pruebas de campo.....	67
4.4.2 Características físicas del desecador solar .....	68
4.4.3 Principio de funcionamiento del desecador solar .....	71
4.5 Etapa 5: “Implementación de mejoras” .....	72
4.6 Etapa 6: “Análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental” .....	72
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>
5.1 Procesados con el desecador solar .....	82
5.2 Procesados con mufla de laboratorio.....	88
5.3 Procesados con horno tradicional de combustión .....	91
5.4 Ensayos a piezas comerciales .....	94
5.5 Comparativo de resultados .....	95
5.6 Análisis cualitativo para la factibilidad .....	99
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>103</b>
6.1 Conclusiones personales .....	104
6.2 Perspectivas a futuro.....	104
<b>7. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>105</b>
<b>8. REFERENCIAS .....</b>	<b>107</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Condiciones de trabajo en ladrilleras artesanales .....	3
Figura 2: Horno ladrillero convencional en operación .....	6
Figura 3: Ladrillo rojo macizo .....	12
Figura 4: Despostillado en una esquina .....	15
Figura 5: Despostillado en una arista .....	15
Figura 6: Ladrillo fuera de tolerancia a las despostilladuras .....	16
Figura 7: Ladrillo dentro de tolerancia a las despostilladuras .....	16
Figura 8: Descripción gráfica de la industria ladrillera en un esquema industrializado .....	20
Figura 9: Horno tradicional en fase de carga y acomodo de ladrillos en ladrillera artesanal.....	21
Figura 10: Extracción de arcilla .....	21
Figura 11: Preparación de la pasta.....	22
Figura 12: Moldeo de piezas .....	24
Figura 13: Secado de piezas a la sombra en fábrica ladrillera .....	25
Figura 14: Horno ladrillero tradicional.....	26
Figura 15: Horno de tiro superior, producción intermitente .....	27
Figura 16: Horno prototipo de MK .....	28
Figura 17: Horno de túnel, producción continua .....	28
Figura 18: Horno tipo mufla de laboratorio.....	29
Figura 19: Horno solar pensado para proceso de alimentos hecho en el Centro de Investigación en Energía (CIE).....	30
Figura 20: Ilustración de vista lateral de horno solar.....	30
Figura 21: Irradiación Global Horizontal en México .....	32
Figura 22: Irradiación directa normal en México .....	32
Figura 23: Coordenadas horarias .....	33
Figura 24: Coordenadas horizontales .....	34
Figura 25: Concentrador solar cilíndrico para producir carbón vegetal .....	36
Figura 26: Mapa conceptual calor y comportamiento de los materiales ante la radiación .....	37
Figura 27: Caldera .....	39
Figura 28: Ventilador en horno ladrillero.....	40
Figura 29: Esquema de flujo de gases calientes en el horno MK .....	41
Figura 30: Hornos MK3 en Bolivia.....	41
Figura 31: Quemador de Gas Natural .....	42
Figura 32: Dosificador de biomasa (aserrín) .....	42
Figura 33: Diagrama de la trayectoria de la radiación solar captada por el concentrador parabólico fuera de eje .....	43
Figura 34: Secador solar para ladrillos de primera etapa .....	44
Figura 35: Secador solar (mejorado) segunda etapa .....	45
Figura 36: Secador solar para ladrillos.....	45
Figura 37: Secador solar de bloques.....	46
Figura 38: Horno solar para secado de ladrillos .....	46
Figura 39: Desecador solar .....	47
Figura 40: Etapas de desarrollo del proyecto.....	50
Figura 41: Proceso de secado a la sombra dentro de ladrillera .....	51
Figura 42: Quemador en operación en cámara de combustión de horno ladrillero .....	51
Figura 43: Cribadora frente a montículo de recolección de residuos en planta .....	53
Figura 44: Estiércoles de vaca, caballo y oveja triturados .....	54
Figura 45: Arcilla tamizada .....	54
Figura 46: Humedecimiento de cartón .....	55
Figura 47: Cartón triturado.....	55
Figura 48: Reciclado de residuos de construcción todo en uno granulometría 1/4" .....	56
Figura 49: Homogenizado en seco.....	57
Figura 50: Hidratado de materiales .....	57
Figura 51: Ladrillera artesanal fabricada en el Instituto de Ingeniería por el grupo de valorización de RSU .....	58
Figura 52: Preparación de la ladrillera artesanal previa al moldeo .....	58

Figura 53: Exclusión de aire en la mezcla durante el moldeo .....	59
Figura 54: Obtención de ladrillos .....	59
Figura 55: Acomodo de ladrillos que permite circulación de aire entre ellos .....	60
Figura 56: Prueba de calidad de adobes .....	61
Figura 57: Determinación de dimensiones .....	62
Figura 58: Ensayo de compresión mecánica simple, utilizando una máquina universal .....	64
Figura 59: Esquema de la prueba de absorción inicial .....	66
Figura 60: Esquema del ensayo de la prueba de erosión acelerada .....	67
Figura 61: Thermocouple-thermometer data logger model EA 15 .....	68
Figura 62: Pyranometer LabQuest-2 .....	68
Figura 63: Dispositivo solar armado, fabricado por el Grupo de Valorización de RSU del Instituto de Ingeniería de la UNAM .....	70
Figura 64: Cocina solar de la ASAE .....	71
Figura 65: Cocina solar del Indian Standard .....	71
Figura 66: Principio de funcionamiento del desecador solar .....	72
Figura 67: Arcilla para ladrillos .....	74
Figura 68: Horno artesanal de ladrillera .....	74
Figura 69: Combustible para horno ladrillero .....	75
Figura 70: Quemadores de aceite .....	75
Figura 71: Horno ladrillero artesanal de tiro superior en operación .....	76
Figura 72: Recipientes de aceite .....	76
Figura 73: Prueba de calidad para adobes .....	77
Figura 74: Ladrillo fabricado con mezcla 4 .....	79
Figura 75: Determinación de dimensiones .....	80
Figura 76: Gráfico de temperaturas al interior y exterior del desecador .....	83
Figura 77: Gráfico de radiación solar .....	84
Figura 78: Proceso con el desecador solar .....	85
Figura 79: Ladrillos cabeceados con azufre .....	86
Figura 80: Ensayo de compresión, inicio de la prueba .....	86
Figura 81: Ensayo de compresión, final de la prueba .....	87
Figura 82: Muestras antes de iniciar el proceso en la mufla .....	88
Figura 83: Muestras después de finalizar el proceso en la mufla .....	89
Figura 84: Ensayo de absorción inicial .....	89
Figura 85: Muestras de mezcla 4 procesadas en mufla de laboratorio .....	91
Figura 86: Horno que combustiona aceite de motor usado .....	91
Figura 87: Emisiones durante el proceso de cocido .....	92
Figura 88: Prueba de erosión acelerada conforme a la NMX-C-508-ONNCCE-2015 y la UNE 41410:2008 .....	93
Figura 89: Comparativo de resultados en ensayos de compresión .....	95
Figura 90: Resistencia de diferentes tipos de ecoladrillos .....	96
Figura 91: Comparativo de resultados de ensayos de absorción inicial .....	97
Figura 92: Comparativo de resultados de ensayos de absorción a 24 horas .....	98
Figura 93: Comparativo de resultados de ensayos de erosión acelerada .....	99

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dimensiones sugeridas para algunos elementos de la construcción conforme a la NMX-C-441-ONNCCE-2013 .....	13
Tabla 2: Dimensiones de ladrillos y bloques cerámicos conforme a la N-CMT-2-01-001/02.....	13
Tabla 3: Dimensiones de ladrillos conforme a la NMX-C-404-2012.....	14
Tabla 4: Tolerancias de dimensiones de los despostillados en las esquinas conforme a la NMX-C-508-ONNCCE-2015 .....	14
Tabla 5: Extensión máxima permisible de despostilladuras en ladrillos y bloques cerámicos fabricados a mano con forme a la norma N-CMT-2-01-001/02.....	14
Tabla 6: Tolerancia a dimensiones de los despostillados en las esquinas y en las aristas para BTC, con información de la UNE 41410:2008.....	15
Tabla 7: Resistencia a la compresión según la NMX-C-404-ONNCCE-2012 .....	17
Tabla 8: Resistencia a la compresión de algunos elementos para la construcción conforme a la NMX-C-441-ONNCCE-2013 .....	17
Tabla 9: Clases de resistencia normalizada a la compresión conforme la NMX-C-508-ONNCCE-2015 .....	17
Tabla 10: Características físicas para ladrillos y bloques cerámicos fabricados a mano (grado de calidad E) conforme a la N-CMT-2-01-001/02.....	18
Tabla 11: Clases de resistencia normalizada a la compresión conforme la UNE 41410:2008 .....	18
Tabla 12: Valores máximos de absorción inicial y absorción total de agua en 24 h conforme a la NMX-C-404-ONNCCE-2012 .....	18
Tabla 13: Absorción de agua de acuerdo a la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013.....	18
Tabla 14: Resistencia a la erosión acelerada, criterios de aceptación o rechazo conforme a la NMX-C-508-ONNCCE-2015 y a la norma española UNE 41410:2008.....	19
Tabla 15: Composición de lodos de PTAR y arcilla .....	23
Tabla 16: Composición de la arcilla roja común y composición de la corteza terrestre .....	23
Tabla 17: Normatividad para ladrillos .....	38
Tabla 18: Normatividad para secadores solares .....	38
Tabla 19: Listado de mezclas para hacer ladrillos tradicionales y propuestos con materiales reciclados.....	52
Tabla 20: Instrumentos de medición a ocupar durante las pruebas bajo la luz del sol .....	67
Tabla 21: Componentes del desecador solar .....	69
Tabla 22: Avances en el proceso de horneado.....	73
Tabla 23: Resultados para determinar la mezcla base .....	78
Tabla 24: Mediciones de radiación y temperatura durante el proceso que utiliza energía del sol con la mezcla 2 y mezcla 4.....	82
Tabla 25: Promedios por día de los resultados de las mediciones de temperatura y radiación .....	83
Tabla 26: Ladrillos hechos de mezcla 2 procesados con el desecador solar, cumplimiento con normas .....	87
Tabla 27: Ladrillos hechos de mezcla 4 procesados con el desecador solar, cumplimiento con normas .....	88
Tabla 28: Ladrillos hechos de mezcla 2 procesados con la mufla de laboratorio, cumplimiento con normas .....	90
Tabla 29: Ladrillos hechos de mezcla 2 procesados en un horno tradicional, cumplimiento con normas.....	93
Tabla 30: Comparativa de resultados de piezas elaboradas con mezcla comercial procesada en horno convencional.....	94
Tabla 31: Comparativa de resultados de piezas elaboradas con mezcla comercial procesada a la sombra .....	94
Tabla 32: Factibilidad técnica .....	100
Tabla 33: Factibilidad económica .....	101
Tabla 34: Factibilidad ambiental .....	101



## **LISTA DE ACRÓNIMOS**

**STPS:** Secretaría del Trabajo y Previsión Social

**INECC:** Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

**EELA:** Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales

**RCD:** Residuos de Construcción y Demolición

**NMX:** Norma Mexicana

**CIE:** Centro de Investigación en Energía

**ASAE:** American Society of Agricultural Engineers

**RSU:** Residuos Sólidos Urbanos

**ONNCCE:** Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación

**BTC:** Bloques de Tierra Comprimida

**PTAR:** Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

Horno **MK:** Márquez Kiln, horno con reutilización de gases de dos cámaras

Horno **MK3:** Márquez Kiln, horno con reutilización de gases de tres cámaras



## 1. INTRODUCCIÓN

El hombre a través de su historia ha evolucionado su forma de vida, su alimentación, su vivienda y comunicación. Desde que el hombre se volvió sedentario se produjeron cambios que repercutieron en la forma de vivir como es el caso de su refugio que pasó de ser simples cuevas a construcciones más elaboradas utilizando diferentes materiales (Aguilar, 2017). Es así como se desarrolló el campo de materiales para construcción, desde roca y madera hasta los productos con tecnologías actuales. Uno de los productos que ha estado presente en muchas civilizaciones es el ladrillo, pues es un material con buenas propiedades térmicas y mecánicas, además requiere de poco mantenimiento (Aguilar, 2017).

La actividad de las ladrilleras es un tema de preocupación, porque dada la informalidad de sus procesos de fabricación, se realizan con elementos contaminantes de todo tipo (Cubas, 2014). Las ladrilleras son un problema social y de salud, generan afectaciones en suelo, agua y aire pues en uno de sus procesos de manufactura se emplean como combustibles llantas, aceites gastados, residuos industriales y cualquier material orgánico de desecho (Cubas, 2014). Las ladrilleras artesanales no han logrado mejorar e innovar su producción, debido a que se manufactura producto de bajo valor que se refleja en precios que no permiten mejorar su nivel de producción empresarial. (Cubas, 2014).

En América Latina existen más de 45,000 ladrilleras artesanales, las cuales elaboran del 30% al 50% de la producción total de ladrillos. La mayoría son empresas pequeñas y generan aproximadamente 850,000 toneladas de CO<sub>2</sub> por año (Febres, 2017).

El crecimiento económico orientado a mejorar de la calidad de vida de la población, normalmente ocasiona el uso irracional de los recursos naturales, lo que causa su rápido agotamiento o deterioro (Halanocca y Huaman R., 2015).

La contaminación provocada por la industria ladrillera se presenta en:

a) Aire

En las ladrilleras es normal ver humo denso y oscuro generado por los hornos de cocción de ladrillos. Los impactos en la calidad del aire favorecen al cambio climático global. Los compuestos que se generan provocan irritación a la piel, ojos y membranas mucosas, trastornos en las vías respiratorias, en el sistema nervioso central, depresión y eventualmente cáncer (Febres, 2017).

b) Agua

El impacto al agua se da en el proceso de mezclado; frecuentemente las áreas aledañas a la población carecen de servicios básicos, por lo que los propietarios de las ladrilleras adquieren agua en camiones cisterna, varias ocasiones el agua de proceso es mal almacenada, utilizando piscinas precarias que al quedar estancadas se convierte en un agente infeccioso y derivado de esto provocar enfermedades diarreicas (Febres, 2017).

c) Suelo

La contaminación del suelo se produce inicialmente por la inexistencia de sistemas de alcantarillado en las zonas de producción ladrillera, las aguas son vertidas directamente sobre el suelo produciéndose infiltración que conlleva al arrastre de los vertidos de combustibles y aceites para el encendido del horno en la etapa del horneado. La explotación de las canteras altera la estructura y configuración del paisaje, modificación que puede desestabilizar su orden natural acarreado la disminución o aniquilación de la capacidad de regeneración de vegetación y la pérdida de la capa productiva del suelo, hasta llegar a la erosión (Febres, 2017).

Cada horno que produce en promedio 128,828 ladrillos por año a un precio unitario de \$1.2 m.n.; representa un total de \$154,593.00 m.n. por año de ganancia bruta, eso equivale a \$12 883.00 m.n. mensuales por horno. Si a esto le restamos un aproximado de \$4,000.00 m.n. por el costo de la tierra y \$3,000.00 m.n. pesos de material de quema, obtienen \$5,883.00 m.n. de ganancia neta mensual. Además, hay que restar 11% de pérdidas de ladrillos por manejo y el pago a los empleados (Romo et al, 2004).

Además de las afectaciones ambientales, también se producen afectaciones laborales a los trabajadores de esta industria. Muchas familias que han trabajado durante generaciones en este esquema laboral dependen del ingreso que les genera este tipo de empresas por lo que se tienen que buscar alternativas que reduzcan el impacto negativo al ambiente sin interferir en su actividad laboral. Las medidas de seguridad en muchas de estas empresas son prácticamente inexistentes. En la Figura 1, se pueden apreciar condiciones de trabajo en algunas fábricas ladrilleras. Muchas ladrilleras no implementan condiciones operativas que cumplan normas, a pesar de que existe normatividad vigente por parte de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), los procesos se ejecutan sin control en lo referente a condiciones laborales de los trabajadores.



*Figura 1: Condiciones de trabajo en ladrilleras artesanales  
Fuente: Sántis, 2013*

La norma que aborda las condiciones de seguridad y salud es la NOM-031-STPS-2011. Las energías renovables tienen un gran campo de aplicaciones con los que se puede ayudar a mitigar el impacto ambiental derivado de la quema indiscriminada de materiales. La implementación del aprovechamiento de energías limpias contribuye a que la gente pueda seguir laborando en su mismo centro de trabajo mejorando sus condiciones de salud.



## 1.1 Justificación

La fabricación de ladrillos, bloques y adobes es un proceso rudimentario, el cual inicia con preparación de una mezcla, la cual se modela y se pone al sol para su secado, por último, se introduce a un horno tradicional de combustión para ser cocida; en este último paso en el proceso está el problema, lo cual trae consecuencias ambientales principalmente en la calidad del aire y la erosión del suelo (Gómez et al, 2011).

En México existen más de 17,000 unidades artesanales que operan en la informalidad, con tecnología rudimentaria dentro o cerca de las zonas urbanas, generan problemas de contaminación de aire y emiten Gases de Efecto Invernadero, incluyendo los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC) que afectan a los productores y a quienes viven en las cercanías (INECC, 2016). Esta situación se ha convertido en un problema que concierne a toda la sociedad establecida en entidades del centro de la República, tales como el Estado de México, Puebla, Chihuahua, Zacatecas, Querétaro, Aguascalientes, Hidalgo, Baja California, Coahuila, Michoacán, Sonora, Nuevo León, Veracruz, Tamaulipas, Campeche, entre otras (INECC, 2016).

En algunos estudios se puede apreciar que en localidades específicas donde la producción de ladrillos es elevada, como “El Refugio”, Guanajuato, las cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> fueron de 57,336 y de 180,744 de CH<sub>4</sub> toneladas en el año del 2009 (EELA, 2011). Por otra parte, Sánchez (2009) reportó que, en el municipio de Chalco, Estado de México, se calculó que la generación de emisiones totales variaba entre  $17,199.3 \pm 9,211.7$  kg de contaminantes por año de un horno (entiéndase por totales la suma de las emisiones contaminantes criterio y el CO<sub>2</sub> global) este dato fue con base en el promedio de la región. Dentro de los estudios del mismo autor, se demuestra que se han hallado importantes cantidades de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, HC, CH<sub>4</sub>, compuestos orgánicos volátiles, N<sub>2</sub>O, dioxinas, entre otros; los cuales son el resultado de un control deficiente en el proceso de las combustiones, trayendo como consecuencia la contaminación del aire y una mala calidad de vida de las personas asentadas en la periferia de esta industria.

Por las áreas de oportunidad anteriores, se llega a la conclusión que es necesaria la implementación de tecnologías menos contaminantes para la creación de ladrillos; una de estas tecnologías podría ser el aprovechamiento de la radiación solar sustituyendo el proceso de cocido con hornos tradicionales.

Aprovechar la radiación solar para acelerar la disminución del contenido de agua presente en ladrillos representa una ventaja ambiental ya que reduciría a cero la gran cantidad de emisiones a la atmósfera que arroja un horno típico que se emplea en el sector ladrillero, lo que mejoraría la calidad de vida de los ladrilleros y de las comunidades adyacentes a las plantas de producción, especialmente en zonas con alta concentración de ladrilleras (Rojas, 2019). El sol provee de abundante energía la cual se puede aprovechar en la manufactura de ladrillo.

En la Figura 2 se aprecian a simple vista las emisiones de un horno ladrillero.



*Figura 2: Horno ladrillero convencional en operación  
Fuente: Romero, 2016*

## 1.2 *Objetivos*

### 1.2.1 *Objetivo general*

Implementar y perfeccionar una alternativa piloto fundada en el aprovechamiento de energía solar para secar ladrillos rojos, dejando de lado la utilización de combustibles fósiles. Así mismo se realizarán los estudios para verificar la factibilidad técnica, socio-económica y ambiental.

### 1.2.2 *Objetivos particulares*

1. Visitar ladrilleras artesanales para constatar condiciones reales de operación.
2. Fabricar ladrillos rojos que incorporen RCD para reincorporar los residuos a una cadena productiva.
3. Determinar las mejores condiciones de operación del desecador solar basados en mediciones de radiación y temperatura del sitio.
4. Implementar mejoras encontradas al diseño original del prototipo para mejorar el secado de ladrillos con el desecador solar.
5. Comparar con datos de norma la calidad de los ladrillos rojos fabricados con mezclas que incorporan RCD tomando como variante el secado (horno de combustión típico, mufla de laboratorio, secador solar).
6. Realizar un análisis comparativo de los beneficios técnicos, económicos y ambientales del uso de hornos convencionales y uno que aprovecha energía solar.



### 1.3 Alcances

1. Se fabricarán ladrillos rojos que cumplan normativa nacional a partir de RCD y otros componentes.
2. Para poder sustituir el cocido con hornos de combustión se evaluará la factibilidad de tres diferentes procesos de secado:
  - Aprovechando la energía solar
  - Transformando energía eléctrica
  - Combustión tradicional
3. Las pruebas para esta investigación sólo se realizarán a escala laboratorio.



## 2. MARCO TEÓRICO

El ladrillo se utiliza en la construcción de casas, bardas, registros, chimeneas y decoraciones internas, ya que tiene una gran resistencia mecánica, durabilidad, da buena vista en los acabados, es un material térmico y necesita poco mantenimiento. (Aguilar, 2017).

### 2.1 El ladrillo

Los ladrillos son piezas de construcción, normalmente cerámicos, tienen forma de prisma rectangular. Sus dimensiones permiten que se puedan maniobrar con una sola mano, facilitando el proceso de colocación. (Aguilar, 2017).

Los ladrillos tienen algunas características que lo hacen estar dentro de los materiales preferidos en construcción:

- Excelente resistencia a compresión
  - Perfecta adherencia a morteros
  - Baja conductividad térmica
  - Vistoso en fachadas
  - Bajo costo
  - Durable
- (Arzate, 2014).

#### 2.1.1 Ladrillos ecológicos

El eco-ladrillo, también llamado ladrillo ecológico, es un material alternativo que permite una construcción menos contaminante y más económica que otros sistemas constructivos tradicionales (Pérez, 2015). Tienen cualidades similares a los convencionalmente utilizados en la construcción de casas; por tanto, su uso no deriva en deterioro de calidad, puesto que, como la mayoría de productos ecológicos experimentan más pruebas de viabilidad que los tradicionales. (Rojas, María y Esperanza Aquino, 2015).

Existen diferentes agregados que participan en la fabricación de ecoladrillos como tereftalato de polietileno PET, fibra de celulosa, llanta pulverizada, tetrapak, lana y algas, cob, mucílago de nopal *Opuntia ficus-índica* (Maldonado, 2014), también es posible agregar lodos provenientes de PTAR (García et al. 2013) o polietileno (Varela et al. 2017).

### 2.1.2 Forma del ladrillo

Existe una variedad en el diseño y forma de los ladrillos, esta tesis se enfocará en el ladrillo macizo artesanal como el que se muestra en la Figura 3.

Macizos: son planos y se obtienen por extrusionado de arcilla o por prensado en un molde. (Aguilar, 2017).



Figura 3: Ladrillo rojo macizo  
Fuente: Imagen propia

### 2.2 Especificaciones para ladrillos

En las normas NMX y de otros países se encuentran tablas con especificaciones con los que se deben comparar los resultados de ensayos de laboratorio.

En la Tabla 1 se muestran dimensiones dentro de las cuales los ladrillos pueden ser adecuados para el cumplimiento de norma. Las tolerancias máximas son de  $\pm 3$  mm. en la altura y  $\pm 2$  mm. en el largo y en el ancho.

*Tabla 1: Dimensiones sugeridas para algunos elementos de la construcción conforme a la NMX-C-441-ONNCCE-2013*

Pieza	Ancho (cm.)	Altura (cm.)	Largo (cm.)
Bloques de concreto	10 a 30	10 a 30	Más de 30
Ladrillos, tabiques y tabicones	10 a 30	Hasta 15	Hasta 30

En la Tabla 2 se observa información referente a dimensiones, en esta norma la tolerancia para los ladrillos fabricados en máquina es de  $\pm 5\%$  para largo, ancho, altura o peralte.

*Tabla 2: Dimensiones de ladrillos y bloques cerámicos conforme a la N-CMT-2-01-001/02*

Medidas nominales en cm.		Medidas de fabricación en cm.	
		Fabricado con máquina	Fabricado a mano
Largo	30	29	28
	20	19	18
Ancho	10	9	---
	15	14	13.5
	20	19	18.5
	30	29	---
Altura o peralte	5	4.5	---
	7.5	6.5	6
	10	9	8.5
	15	14	---
	20	19	---
	30	29	---

La **NMX-C-404-ONNCCE-2012** menciona que las dimensiones de fabricación de las piezas deben cumplir con las dimensiones que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3: Dimensiones de ladrillos conforme a la NMX-C-404-2012**

Dimensiones mínimas para ladrillo		
Dimensión	Dimensión	Tolerancia
alto	50 mm.	(±3 mm.)
ancho	100 mm.	(±2 mm.)
largo	190 mm.	(±2 mm.)

Los ladrillos serán comparados con los parámetros disponibles para despostilladuras y desconchados. Para ver los parámetros consultar las Tablas 4, 5 y 6. (Despostillado se refiere a las roturas en aristas y vértices).

Las dimensiones T, T1, T2 son compatibles con las indicadas en la tabla 4 y 6. Las dimensiones de T, T1 y T2 pueden ubicarse en las Figura 4 y Figura 5. No se toleran los despostillados en las esquinas, excepto cuando pueden inscribirse en un triedro trirrectángulo cerrado por un triángulo equilátero de lado  $\leq T(\text{mm.})$ .

Los despostillados en las aristas y las oquedades sólo son tolerables cuando su longitud sea inferior a T1(mm.), medida sobre las aristas y la profundidad sea inferior a T2(mm.), medida a partir de aristas.

**Tabla 4: Tolerancias de dimensiones de los despostillados en las esquinas conforme a la NMX-C-508-ONNCCE-2015**

Bloques	T(mm.)	T1(mm.)	T2(mm.)
BTC cara vista	15	25	10
BTC ordinarios	N.A.	N.A.	N.A.

**Tabla 5: Extensión máxima permisible de despostilladuras en ladrillos y bloques cerámicos fabricados a mano con forme a la norma N-CMT-2-01-001/02**

Extensión máxima permisible	Extensión máxima permisible (unidades en mm.)	
	Subtipo macizo, grado de calidad E (hecho a mano)	
Las esquinas	12	
En aristas	8	

Tabla 6: Tolerancia a dimensiones de los despostillados en las esquinas y en las aristas para BTC, con información de la UNE 41410:2008

Bloques	T(mm.)	T1(mm.)	T2(mm.)
BTC cara vista	10	20	5
BTC ordinarios	20	30	10

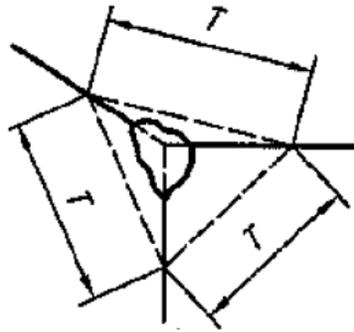


Figura 4: Despostillado en una esquina  
Fuente: NMX-C-508-ONNCCE-2015

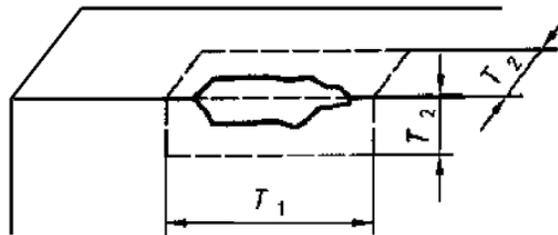


Figura 5: Despostillado en una arista  
Fuente: NMX-C-508-ONNCCE-2015

Las roturas superficiales en la NMX-C-508-ONNCCE-2015 se refieren como despostillados y en la UNE41410:2008 se refieren como desconchados. Estas roturas se pueden observar en la Figura 6 y 7.



*Figura 6: Ladrillo fuera de tolerancia a las despostilladuras  
Fuente: Imagen propia*



*Figura 7: Ladrillo dentro de tolerancia a las despostilladuras  
Fuente: Imagen propia*

En las tablas de la 7 a la 11, se pueden consultar los valores mínimos de resistencia a la compresión simple contemplados en distintas normas. Los valores de la Tabla 7 es para piezas de uso estructural.

**Tabla 7: Resistencia a la compresión según la NMX-C-404-ONNCCE-2012**

Tipo de pieza	Configuración	Resistencia media MPa (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia mínima individual MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
Bloque	Macizo	15 (150)	12 (120)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)
Tabique (largo > 300 mm.)	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	9 (90)	7 (70)
Tabique (largo ≤ 300 mm.)	Macizo	11 (110)	7 (70)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)

Los valores de la Tabla 8 son para piezas de uso no estructural.

**Tabla 8: Resistencia a la compresión de algunos elementos para la construcción conforme a la NMX-C-441-ONNCCE-2013**

Tipo de pieza	Configuración	Resistencia mínima promedio	Resistencia mínima individual
		N/mm <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	N/mm <sup>2</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )
Bloque	Macizo o hueco	3.5 (35)	2.8 (28)
Tabique extruido	Macizo o hueco	4.0 (40)	3.2 (32)
Tabique artesanal	Macizo	3.0 (30)	2.4 (24)
Pieza para celosía	Cara rectangular	2.5 (25)	2.0 (20)
	Cara no rectangular		

Los datos de la Tabla 9 aplican a piezas que incorporan cal en su elaboración. Los valores están expresados en kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 9: Clases de resistencia normalizada a la compresión conforme la NMX-C-508-ONNCCE-2015**

Bloques	BTC 3	BTC 6	BTC 9
Resistencia normalizada, <b>f'c</b> , (fractil 5%), en kg/cm <sup>2</sup>	30	60	90

La Tabla 10 basada en la N-CMT-2-01-001/02 menciona que los ladrillos fabricados a mano pueden ser aptos para albañilería simple o reforzada, no soportante y con cargas bajas (las unidades deben convertirse de Mpa a kgf/cm<sup>2</sup>).

**Tabla 10: Características físicas para ladrillos y bloques cerámicos fabricados a mano (grado de calidad E) conforme a la N-CMT-2-01-001/02**

Característica	Valor
	Subtipo Macizo, Grado de calidad E
Resistencia a la compresión simple; MPa, mínima	2
Adherencia; MPa, mínima	0.15
Desviación máxima de la línea recta sobre la dimensión máxima nominal	24

En la Tabla 11 las unidades para la resistencia normalizada a la compresión están expresadas en N/mm<sup>2</sup> como lo muestra la norma UNE 41410:2008, para hacer la comparativa de resultados de este proyecto con la Tabla 11, las unidades pueden convertirse a kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 11: Clases de resistencia normalizada a la compresión conforme la UNE 41410:2008**

Bloques	BTC 1	BTC 3	BTC 5
Resistencia normalizada, <b>f'c</b> , (fractil 5%), en N/mm <sup>2</sup>	1, 3	3	5

Los ladrillos también son sometidos a pruebas de absorción de agua y los parámetros pueden consultarse en las Tablas 12 y 13.

**Tabla 12: Valores máximos de absorción inicial y absorción total de agua en 24 h conforme a la NMX-C-404-ONNCCE-2012**

Tipo de material	Absorción inicial para muros expuestos al exterior (g/min.)	Absorción inicial para muros interiores o con un recubrimiento (g/min.)	Absorción total en 24 h en porcentaje
Concreto	5	7.5	12
Arcilla artesanal	-	-	23
Arcilla extruida o prensada	5	7.5	19

**Tabla 13: Absorción de agua de acuerdo a la norma NMX-C-441-ONNCCE-2013**

Tipo de material	Absorción máxima de agua en % durante 24 h		
	Absorción inicial para muros expuestos al exterior g/min.	Absorción inicial para muros interiores o con un recubrimiento g/min.	Absorción total en 24 h en porcentaje
Concreto	5	7,5	25
Arcilla artesanal	-	-	25
Arcilla extruida o prensada	5	7,5	20

En la parte que respecta a la erosión en ladrillos se consideran los criterios que se muestran en la Tabla 14.

*Tabla 14: Resistencia a la erosión acelerada, criterios de aceptación o rechazo conforme a la NMX-C-508-ONNCCE-2015 y a la norma española UNE 41410:2008*

Propiedad	Criterio (mm.)	Resultados
D, profundidad de la oquedad (mm.)	$0 \leq D \leq 10$	Aceptado/Bloque apto
	$D > 10$	Rechazado/Bloque no apto

### *2.3 Procesos en la fabricación del ladrillo rojo*

La fabricación de ladrillos se hace tanto de forma artesanal como de forma industrializada, pero independientemente de la forma, los ladrillos son sometidos a los mismos procesos.

En la Figura 8 se aprecia un esquema del proceso de fabricación de ladrillos de forma industrializada y en la Figura 9 se muestra un horno de una ladrillera artesanal.

Esta tesis se enfoca en el proceso artesanal, pensado en zonas de bajos recursos.

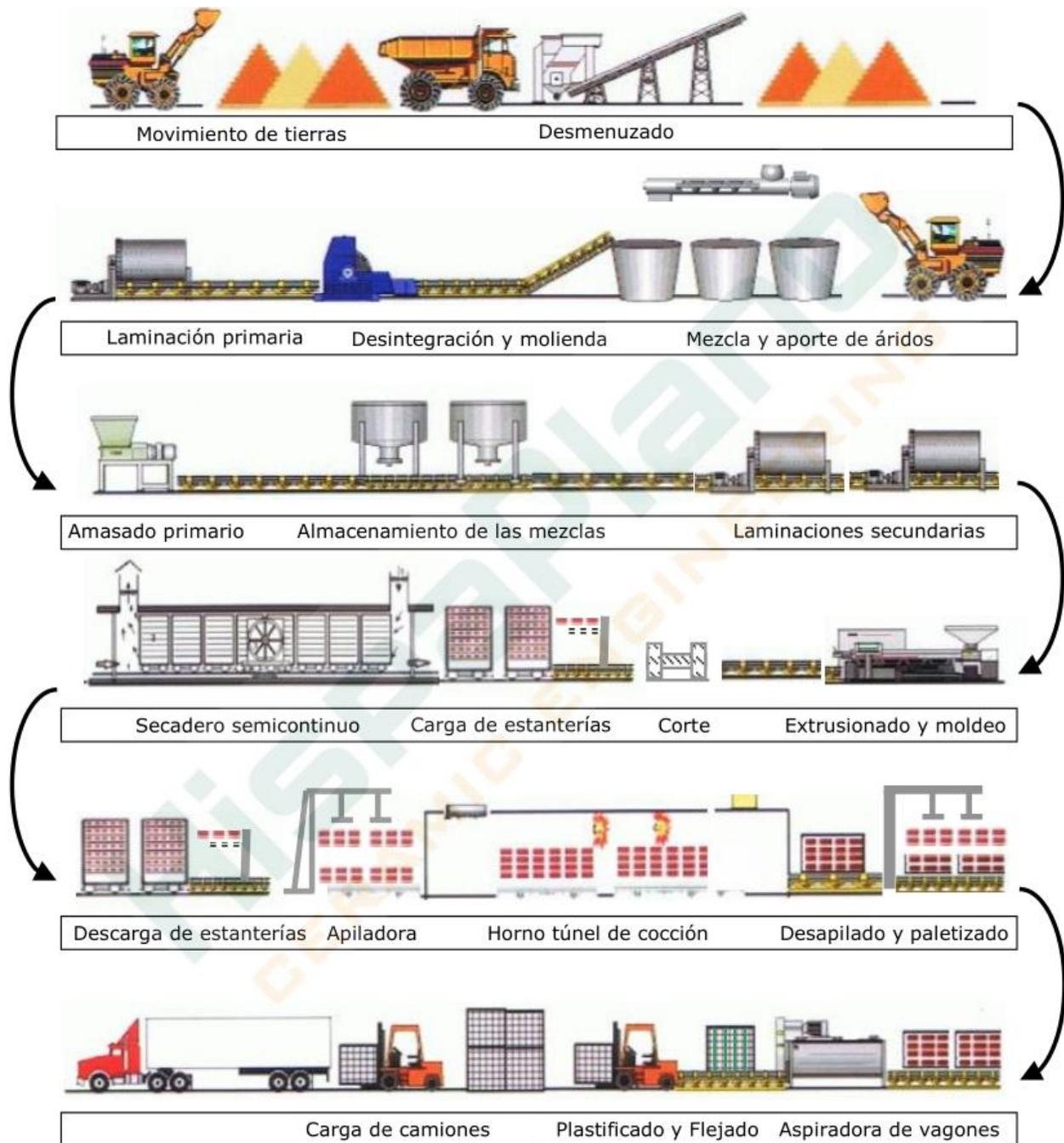


Figura 8: Descripción gráfica de la industria ladrillera en un esquema industrializado  
Fuente: FHCE, 2012



*Figura 9: Horno tradicional en fase de carga y acomodo de ladrillos en ladrillera artesanal*  
*Fuente: Vivianco, 2011*

### *2.3.1 Extracción de la materia prima*

Tierra arcillosa y arena de grano fino que son extraídas de regiones cercanas a las ladrilleras tal como se observa en la Figura 10.



*Figura 10: Extracción de arcilla*  
*Fuente: Sántis, 2013*

### 2.3.2 Preparación de pasta (barro)

Se prepara el barro, el cual es una mezcla homogénea de tierra arcillosa con agua, la pasta también contiene arena de grano fino. En la Figura 11 se muestra la preparación de la pasta. En las ladrilleras artesanales las mezclas se preparan de manera manual con ayuda de palas, aunque hay varias técnicas de mezclado; por ejemplo, batido con los pies, batido con ayuda de caballo, etc.



Figura 11: Preparación de la pasta  
Fuente: Ibarra, 2004

Existe más de una combinación de materiales con la cual se prepara la pasta para elaborar ladrillos, a continuación, se muestran algunas de ellas.

#### **Pasta 1:**

- Barro
  - Lama
  - Arenilla
  - Abono de caballo
  - Agua
- (Gutiérrez, et al, 2016)

#### **Pasta 2:**

- Material arcilloso
  - Aserrín
  - Material limoso
  - Agua
- (Arrollo, 2002)

#### **Pasta 3:**

- Polvo arcilloso (gránulos graduados a tamaño menor a 0.01m aproximadamente)
  - Aserrín de madera (puede usarse paja)
  - Estiércol de vaca
  - Agua
- (Villeda, 2010)

La Tabla 15 muestra porcentajes de compuestos encontrados en lodos de PTAR y arcilla para ladrillos rojos, conforme a información de García, et al. 2013.

*Tabla 15: Composición de lodos de PTAR y arcilla*

Composición de lodos y arcilla para ladrillos			
LODOS PTAR		ARCILLA	
Sustancia	%	Sustancia	%
SiO <sub>2</sub>	41,0	SiO <sub>2</sub>	58,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,7
CaO	12,5	CaO	0,5
MgO	2,5	MgO	0,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,6	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	8,4	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,5
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,5	TiO <sub>2</sub>	0,9
CaCO <sub>3</sub>	2,5	K <sub>2</sub> O	1,5
K <sub>2</sub> O	0,8	MnO	0,8
MnO	0,7	Humedad	7,5
TiO <sub>2</sub>	1,1		
Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	0,4		
Humedad	2,0		

(García, et al, 2013)

La Tabla 16 basada en información encontrada en la tesis “Propuesta de automatización y modernización de horno para cocido de ladrillo rojo.” muestra el porcentaje de componentes de la arcilla roja, y el porcentaje en que estos compuestos se encuentran en la corteza terrestre. La arcilla es un componente básico en la composición de ladrillos.

*Tabla 16: Composición de la arcilla roja común y composición de la corteza terrestre*

Componentes de la arcilla para fabricación de ladrillos		
Componente	Corteza terrestre (%)	Arcilla roja común (%)
Óxido de silicio SiO <sub>2</sub>	59.14	57.02
Alúmina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.34	19.15
Óxido de hierro Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.88	6.70
Óxido de magnesio MgO	3.49	3.08
Óxido de calcio CaO	5.08	4.26
Óxido de sodio Na <sub>2</sub> O	3.84	2.38
Óxido de potasio	3.13	2.03
Agua H <sub>2</sub> O	1.15	3.45
Óxido de titanio TiO <sub>2</sub>	1.05	0.91

(Gutiérrez, et al, 2016)

### 2.3.3 Moldeo de piezas

Ya preparada la mezcla se transporta con ayuda de una carretilla hacia un espacio para moldeo previamente habilitado, la forma se le da ya sea con ayuda de un molde que da forma de un ladrillo a la vez o con una rejilla para varias piezas al mismo tiempo, el molde individual y la rejilla no tienen fondo y antes de colocarles la mezcla ponen una capa ligera de arena para que no se adhiera a las paredes del molde ni al piso o mesa de trabajo donde se esté llevando a cabo el proceso, ya colocada la mezcla se compacta un poco ya sea con las manos o con un pequeño pisón para luego ser enrasado con ayuda de alguna vara recta. En la Figura 12 se muestra el proceso de moldeo que se realiza a cielo abierto. En las ladrilleras se hacen piezas de varios tamaños o también se fabrican tejas, estos moldeos se elaboran de forma rústica.



*Figura 12: Moldeo de piezas  
Fuente: Sántis, 2013*

### 2.3.4 Secado

Este proceso consiste en dejar al aire libre los ladrillos acomodados en hileras de forma que el aire pueda circular en casi todas sus caras, en tiempo de lluvias los trabajadores cubren los ladrillos con plásticos, esto prolonga el proceso y la producción no se detiene. El proceso de secado a la sombra puede verse en la Figura 13.



*Figura 13: Secado de piezas a la sombra en fábrica ladrillera  
Fuente: Imagen propia*

### *2.3.5 Horneado tradicional*

Los ladrillos ya secados son introducidos en hornos que están hechos de ladrillo ya cocido, se acomodan dejando espacios de tal forma que el calor pueda circular en la mayor área posible. El calor de estos hornos habitualmente se consigue con la quema de cualquier tipo de biomasa o hidrocarburo, obteniendo temperaturas cercanas a los 1000°C. El tiempo que tarda este proceso es variable según la zona, geometría del horno o tecnología añadida. Al terminar este proceso los ladrillos adquieren su color anaranjado característico.

En la Figura 14 se aprecia un horno ladrillero en operación, en este proceso se da la emisión de compuestos a la atmósfera debido a la combustión de derivados de petróleo o biomasa. Los hornos tradicionales no cumplen estándares de control de emisiones.



*Figura 14: Horno ladrillero tradicional  
Fuente: Vivanco, 2011.*

Este proceso utiliza la quema de aceites viejos, basura, llantas, leña o aserrín según la disponibilidad, así como costo, no considerando daños al ambiente ni condiciones de trabajo.

### *2.3.6 Enfriamiento*

Al terminar el proceso de horneado se espera a que los ladrillos bajen de temperatura para que sea más fácil manipularlos y almacenarlos, dejándolos ya listos para su comercialización (Ibarra, 2004). El enfriamiento puede durar de 5 a 7 días.

## *2.4 Clasificación de hornos según su flujo de producción*

Los hornos pueden clasificarse conforme a la continuidad de ejecución del proceso de cocido de ladrillos.

### *2.4.1 Hornos intermitentes*

Son hornos de cámaras individuales o en batería, en los que los productos, la instalación de la cocción y la de enfriamiento quedan en posición fija durante la totalidad del ciclo (EELA, 2011).

En la Figura 15 se puede ver la parte superficial de un horno de tiro superior, los quemadores se encuentran bajo el nivel de piso.



*Figura 15: Horno de tiro superior, producción intermitente  
Fuente: Imagen propia*

#### *2.4.2 Hornos semicontinuos*

Son hornos que producen una mayor carga que los intermitentes, y en algunos casos cargas muy cercanas a las que producen los hornos continuos, esto se logra aprovechando la energía térmica residual de los gases calientes en lugar de expulsarlos a la atmósfera. Los hornos semicontinuos son, en ocasiones, agrupaciones de hornos intermitentes tendientes hacia una operación continua (EELA, 2015). La Figura 16 muestra un horno tipo MK que cuenta con un sistema para aprovechar la energía de los gases calientes previo a expulsarlos a la atmósfera.



*Figura 16: Horno prototipo de MK*

*Fuente: [http://2.bp.blogspot.com/\\_cmMx1zS1q8I/ShXaUbBVWvI/AAAAAAAAAag/SJMAfZvnGas/s1600/IMG\\_3718.JPG](http://2.bp.blogspot.com/_cmMx1zS1q8I/ShXaUbBVWvI/AAAAAAAAAag/SJMAfZvnGas/s1600/IMG_3718.JPG)*

### *2.4.3 Hornos continuos*

Los hornos continuos se caracterizan por ejecutar el proceso de cocción de forma ininterrumpida, asentando los ladrillos en bases desplazables que se mueven a lo largo del horno y permitiendo meter nuevas cargas sin apagar la cámara de combustión (EELA, 2015). En la figura 17 se aprecia un horno de túnel, estos hornos pueden cocer ladrillos de forma ininterrumpida.



*Figura 17: Horno de túnel, producción continua*

*Fuente: EELA, 2015*

## 2.5 Hornos con energías alternativas

Además de la combustión de biomasa o hidrocarburos se pueden utilizar dispositivos que utilizan energías alternativas para funcionar.

### 2.5.1 Horno eléctrico tipo mufla

Es un horno destinado habitualmente para calcinación, secado y fundición de materiales. Está constituido por una cámara cerrada con materiales refractarios y está compuesto por un gabinete interno, contrapuerta, gabinete externo, panel de control y su principio de funcionamiento es con ayuda de resistencias eléctricas (Monteros, 2015). En la Figura 18 se puede ver una mufla.

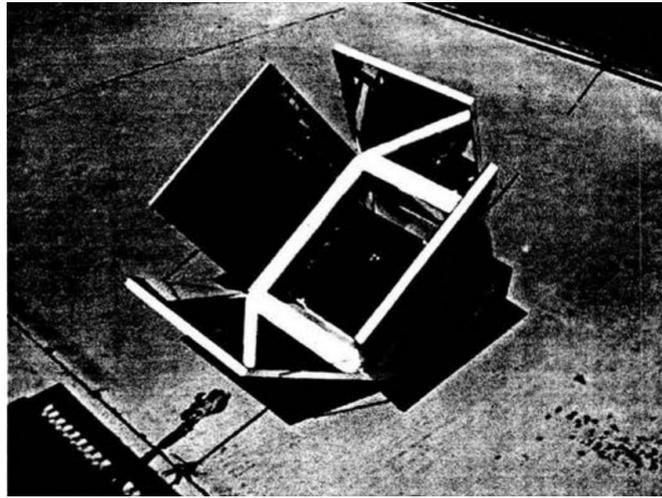


Figura 18: Horno tipo mufla de laboratorio  
Fuente: Imagen propia

### 2.5.2 Horno solar

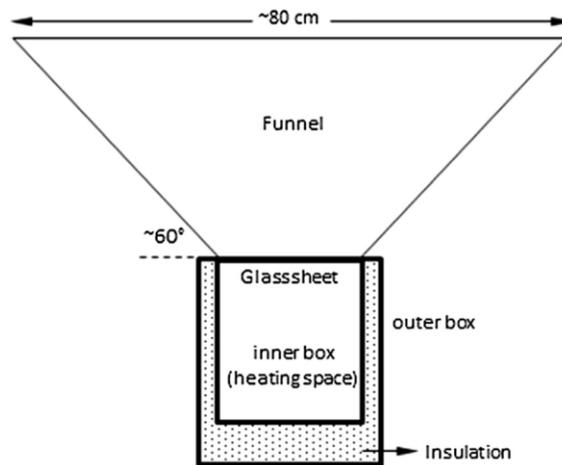
Por horno solar se entiende una cavidad cerrada donde se pueden cocinar alimentos, la cavidad se encuentra aislada con una cubierta transparente por el lado expuesto al sol, también es posible encontrar hornos con reflectores arreglados alrededor de este,

incrementando la radiación solar en el interior (Hernández, 2004). En la Figura 19 se aprecia un horno solar.



*Figura 19: Horno solar pensado para proceso de alimentos hecho en el Centro de Investigación en Energía (CIE)  
Fuente: Hernández, 2004*

Los hornos que utilizan energía solar pueden ser aprovechados en la construcción, en ambientes extremos aprovechando el bajo costo de la energía y con algunos agregados se puede evitar la utilización de agua (Varela, Luana, et al., 2017). En la Figura 20 se muestra una ilustración de un horno solar pensado en construcción lunar.



*Figura 20: Ilustración de vista lateral de horno solar  
Fuente: Varela, Luana et al, 2017*

## *2.6 El sol*

El sol es un enorme reactor de fusión nuclear, que transforma parte de su masa en energía y emite radiación electromagnética la cual puede desplazarse en el vacío. De la enorme cantidad de energía que emite, una parte llega a la atmósfera terrestre en forma de radiación solar (Durán, 2010).

Del total de energía solar que llega al planeta Tierra el 16% es absorbida en la estratósfera y la tropósfera, 22.5% por el suelo, 4% es reflejada directamente al espacio desde el suelo, la atmósfera difunde el 17.5% de la radiación (del cual el 10.5% es absorbido por el suelo y el 7% regresa al espacio exterior), las nubes reflejan al espacio exterior un 24%, absorben 1.5% y enviando al suelo, como radiación difusa, el 14.5%, que es absorbido por el mismo. Por lo tanto, el 47.5% de la radiación llega efectivamente a la superficie de la tierra por tres vías; radiación directa, radiación difusa y radiación reflejada (Durán, 2010).

### *2.6.1 Irradiancia*

Es la potencia de la radiación solar que incide en un instante determinado sobre una superficie de un metro cuadrado (Ramírez, 2009). En las Figuras 21 y 22 se aprecia la radiación que incide en México, gran parte del territorio tiene buena incidencia de energía solar.

**IRRADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL**  
**MÉXICO**

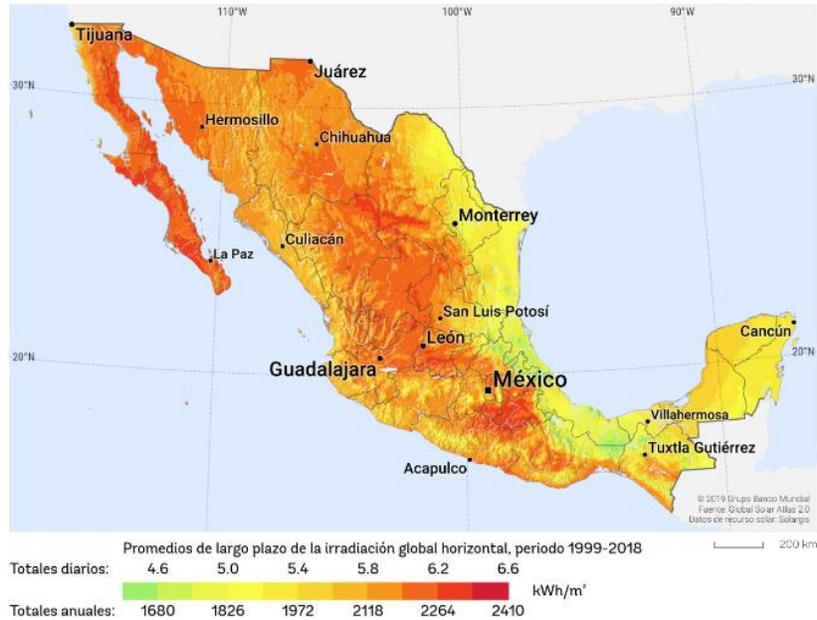


Figura 21: Irradiación Global Horizontal en México  
Fuente: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>

**IRRADIACIÓN DIRECTA NORMAL**  
**MÉXICO**

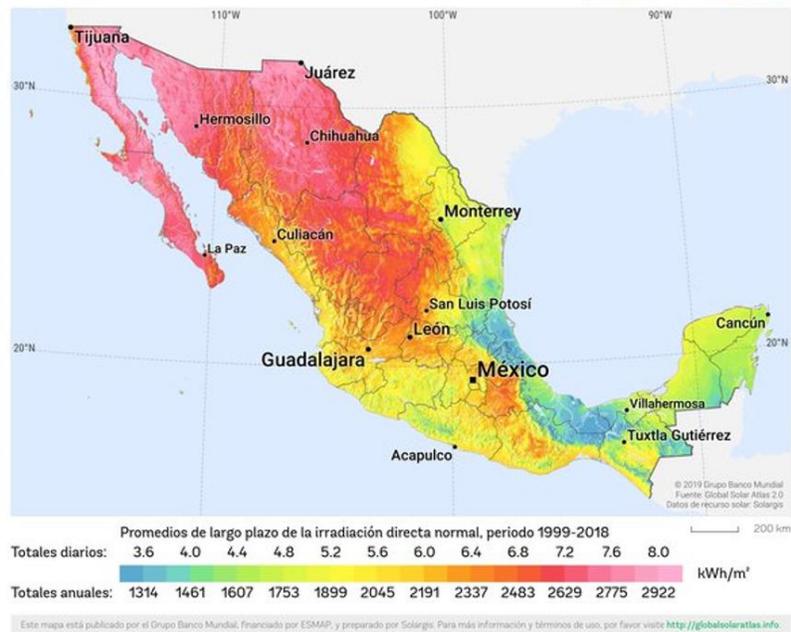


Figura 22: Irradiación directa normal en México  
Fuente: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico>

## 2.6.2 Radiación

Se refiere a la emisión continua en forma de ondas electromagnéticas originadas en el nivel atómico (Tippens, 2011). También se refiere al calor emitido por un cuerpo debido a su temperatura, no necesita haber contacto entre cuerpos ni fluidos que transporten el calor.

## 2.6.3 Posicionamiento solar

La posición del sol se puede ubicar en dos sistemas de coordenadas: horarias (Ver Figura 23) y horizontales (Ver Figura 24).

### a. Coordenadas horarias:

Declinación solar: es la posición angular del sol a medio día con respecto al plano del Ecuador terrestre.

Ángulo horario solar: es el desplazamiento angular del sol sobre el plano de la trayectoria solar.

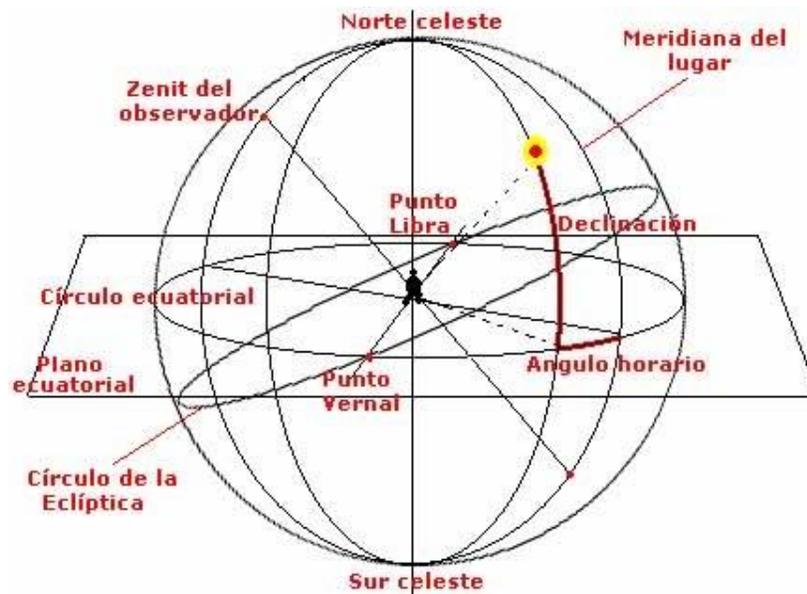


Figura 23: Coordenadas horarias

<https://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum19/vdm02520ar/vdm02520i08.jpg>

b. Coordenadas horizontales:

Altura solar: es el ángulo que forma la radiación solar directa y el plano horizontal.

Azimut solar: ángulo que forma la radiación solar directa y el meridiano del observador.

(Ramírez, 2009).

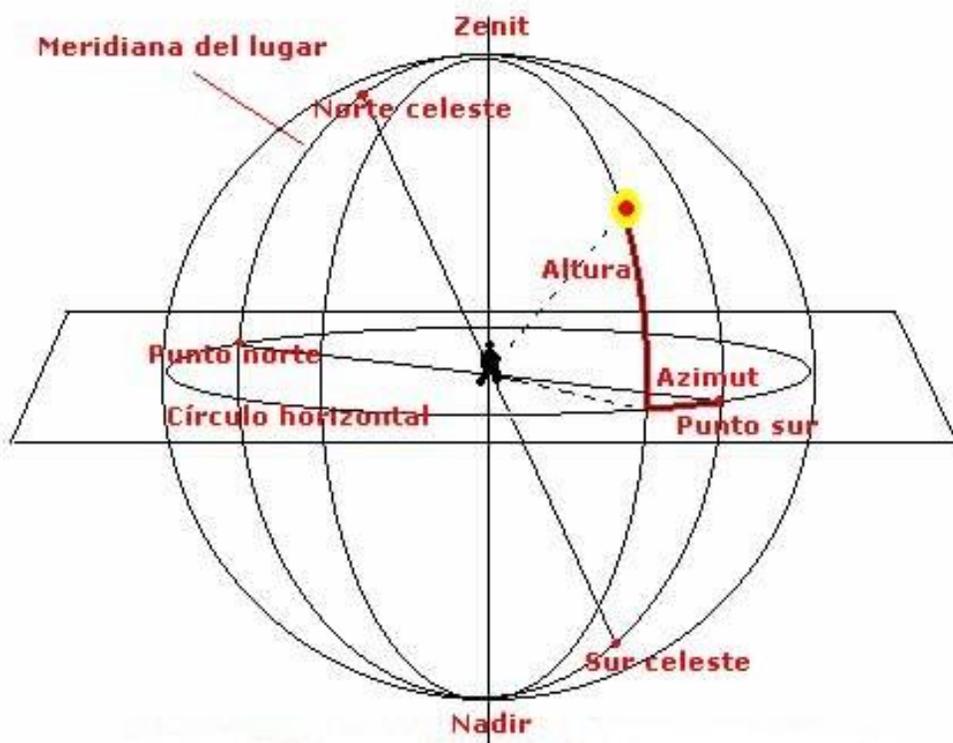


Figura 24: Coordenadas horizontales

<https://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum19/vdm02520ar/vdm02520i06.jpg>

#### *2.6.4 Secadores solares según su funcionamiento*

Existen tres tipos de secadores solares conforme a la manera en que aprovechan el calor:

- a. Directo. Colector y cámara de secado están juntos.
- b. Indirecto. Colector y cámara de secado van separados.
- c. Mixto. La colección de radiación se realiza tanto en el colector solar previo a la cámara de secado, como en la misma cámara de secado (Aquino, 2015).

#### *2.6.5 Ejemplos de colectores solares según su intensidad*

Los colectores solares se dividen en dos grandes grupos:

- a. Colectores solares sin concentración (para temperaturas menores a 70°C)

- Colector solar de placa plana
- Colectores de vacío
- Tubos de calor
- Colectores cónicos o esféricos

- b. Colectores solares con concentración (para temperaturas mayores a 70°C)

- Concentradores cilíndricos
- Concentradores parabólicos

(Durán, 2010).

Los colectores solares se pueden utilizar con distintos fines, por ejemplo, en la producción de alimentos, así como en la producción de energía. La figura 25 muestra un concentrador cilíndrico, que se puede utilizar en la producción de carbón vegetal, como lo menciona Ramos, (2015).



*Figura 25: Concentrador solar cilíndrico para producir carbón vegetal  
Fuente: Ramos, G. y David Pérez, 2014*

### *2.6.6 Colectores solares según su rango de temperatura*

Los colectores solares pueden tener diferentes usos, conforme la temperatura que necesite su proceso.

- a. Colectores de baja temperatura (Proveen calor útil a temperaturas menores de 70°C).
  - b. Colectores de temperatura media (Proveen calor útil entre 100°C y 300°C).
  - c. Colectores de alta temperatura (Operan a temperaturas mayores a 500°C).
- (Ramírez, 2009).

## 2.6.7 Calor y radiación

La radiación solar tiene distintas interacciones con los materiales con los que encuentra a su paso ya que puede ser reflejada, absorbida o transmitida. En la figura 26 puede verse un mapa conceptual que nos muestra la forma en que interaccionan la radiación y los materiales.

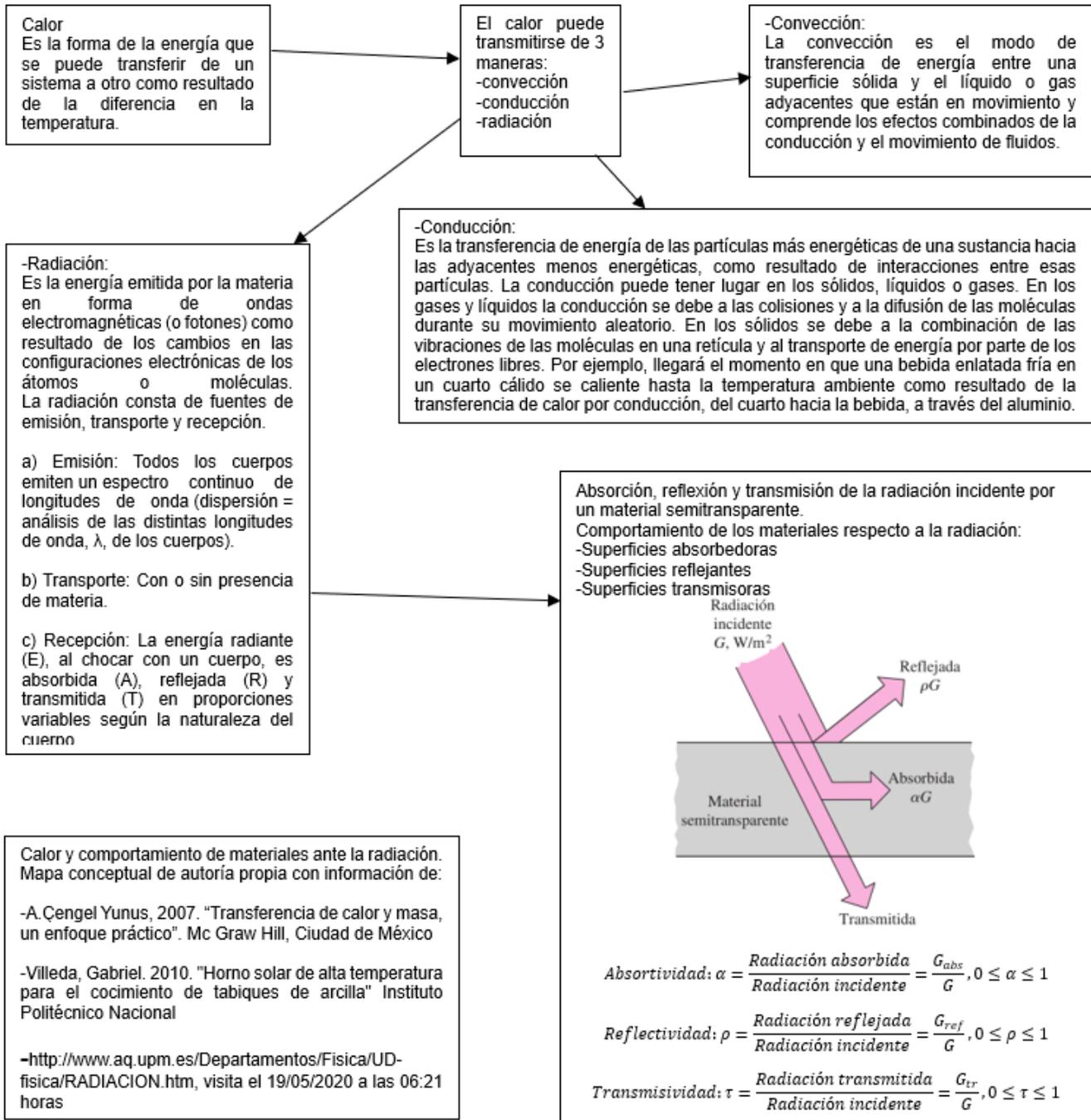


Figura 26: Mapa conceptual calor y comportamiento de los materiales ante la radiación  
Fuente: Elaboración propia

## 2.7 Normatividad

Las normas que se pueden consultar para este trabajo son las que se aplican a ladrillos y a desecadores solares.

### 2.7.1 Normas para ladrillos

La normatividad que determina si las propiedades físicas y mecánicas que debe tener el tabique rojo recocido se encuentran en las siguientes normas, algunos países contemplan pruebas que en otros no. En la Tabla 17 se muestran normas referentes a procedimientos y parámetros de ladrillos, además algunas pruebas de normas de España.

*Tabla 17: Normatividad para ladrillos*

Clave de la norma	Título de la norma
N-CMT-2-01-001-02	Libro CMT. Características de los materiales, Parte 2. Materiales para estructuras - Título: 01. Materiales para Mamposterías - Capítulo: 001. Ladrillos y Bloques Cerámicos.
NMX-C-036-ONNCCE-2013	Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines – Método de Ensayo.
NMX-C-037-ONNCCE-2013	Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo.
NMX-C-038-ONNCCE-2013	Determinación de las dimensiones de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo.
NMX-C-404-ONNCCE-2012	Mampostería - Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo.
NMX-C-441-ONNCCE-2013	Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural.
NMX-C-508-ONNCCE-2015	Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal - especificaciones y métodos de ensayo
UNE41410:2008	Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques - definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

### 2.7.2 Normas para desecadores solares

No existe una normatividad para el uso de dispositivos solares con ladrillos, pero respecto a la forma y operación se pueden consultar los siguientes documentos de Estados Unidos de América e India. Estos equipos están pensados para la cocción de alimentos. Los documentos son mencionados en la Tabla 18.

*Tabla 18: Normatividad para secadores solares*

Clave de la norma o documento	Título de la norma o documento
ASAE S580	Testing and Reporting Solar Cooker Performance
IS 13429:1992	Indian Standard, Solar Cooker

## *2.8 Implementación de mejoras en el proceso de cocido de ladrillo*

Para el proceso de horneado convencional se han implementado mejoras en el proceso que consisten en equipos auxiliares para el horno, cambiar la forma del horno o variar el tipo y cantidad de combustible.

### *2.8.1 Calderas*

Las calderas son equipos en los que se mantiene una combustión para generar vapor como la que se muestra en la Figura 27. La quema se produce en la caldera, que se encuentra cerca del horno, y los gases producidos son inyectados al horno (Ibarra, 2004). Las calderas son recipientes a presión fabricados en acero, su funcionamiento se da por la combustión de materiales para la generación de calor.



*Figura 27: Caldera  
Fuente: Ibarra, 2004*

### 2.8.2 Inyección de aire con ayuda de ventiladores

Es una manera de acelerar el tiempo de cocido y reducir la materia prima utilizada y consiste en un ventilador o turbina con la salida de aire entubada y dirigida a los quemadores de los hornos (Roque, 2014).

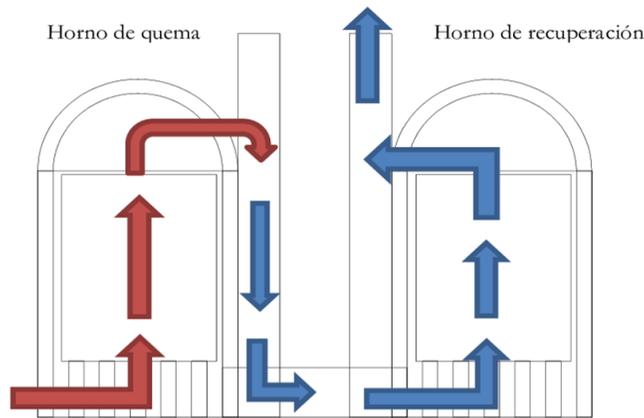
En la Figura 28 se observa un ventilador alimentando a un horno ladrillero convencional. Los ventiladores utilizan energía eléctrica, pudiéndose utilizar en zonas con acceso a este servicio, pero haciéndose más complicada su implementación en zonas con fallas en el suministro eléctrico.



*Figura 28: Ventilador en horno ladrillero  
Fuente: Roque, 2014*

### 2.8.3 Hornos MK y MK3

El horno MK es un sistema que consta de dos hornos de adobe, uno para la quema y otro para la recuperación y filtrado de los gases que se generan en el primer horno, este sistema utiliza gas natural para generar el calor que necesita el proceso (Luján, 2015). El flujo de gases circula como se muestra en la Figura 29 donde se puede apreciar la recuperación de gases y su utilización para el precalentado en otro horno del sistema.



*Figura 29: Esquema de flujo de gases calientes en el horno MK  
Fuente: Luján, Marcos y Daniel Guzmán, 2015*

El horno MK3 que se muestra en la Figura 30, es una variante del horno MK, que consiste en un sistema de tres hornos, en el cual uno funciona como horno de carga/descarga, mientras los otros dos hornos funcionan, uno como horno de quema, y el otro como horno de recuperación/filtración. De esta manera, la operación de los hornos sería semicontinua y permitiría aprovechar de manera más eficiente el calor recuperado en el horno de recuperación/filtración, pues este horno puede funcionar como horno de quema inmediatamente después de haber concluido una quema. En el caso del MK, no existe este tercer horno y esto provoca que se pierda el calor captado en el horno de recuperación. (EELA, 2011).



*Figura 30: Hornos MK3 en Bolivia  
Fuente: Luján, Marcos y Daniel Guzmán, 2015*

#### 2.8.4 Diferentes combustibles para el proceso de horneado

También se han hecho variaciones en el tipo y cantidad de combustible del proceso de horneado como gas natural e inyección de aire (Gutiérrez, et al, 2016). En la Figura 31 se aprecia un quemador de gas natural y en la Figura 32 se muestra un dosificador de biomasa. Estos equipos ayudan a reducir la cantidad de los insumos para la combustión, esto representa una disminución de los compuestos generados por la quema.



Figura 31: Quemador de Gas Natural  
Fuente: Gutiérrez, et al, 2016



Figura 32: Dosificador de biomasa (aserrín)  
Fuente: <https://www.pmtgi.com.mx/files/productos/565-dba.jpg>

### 3. ANTECEDENTES

Además de modificaciones como la geometría del horno, utilización de equipos auxiliares como ventiladores y dosificadores, y diferentes tipos de biomasa como aserrín o gas, este proceso sigue generando emisiones, por lo que la investigación se enfoca en alternativas que utilicen energía solar.

En esta tesis se utilizan los conceptos de horno solar, secador solar, colector solar, desecador para referirse al desecador solar, aunque son distintos dispositivos su principio de funcionamiento es el mismo.

#### 3.1 Concentrador solar parabólico fuera de eje

Este equipo se encuentra en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, unidad Querétaro y consiste en un heliostato que dirige su concentración a otra parábola que focaliza la energía en otra dirección como se ilustra en la Figura 33.

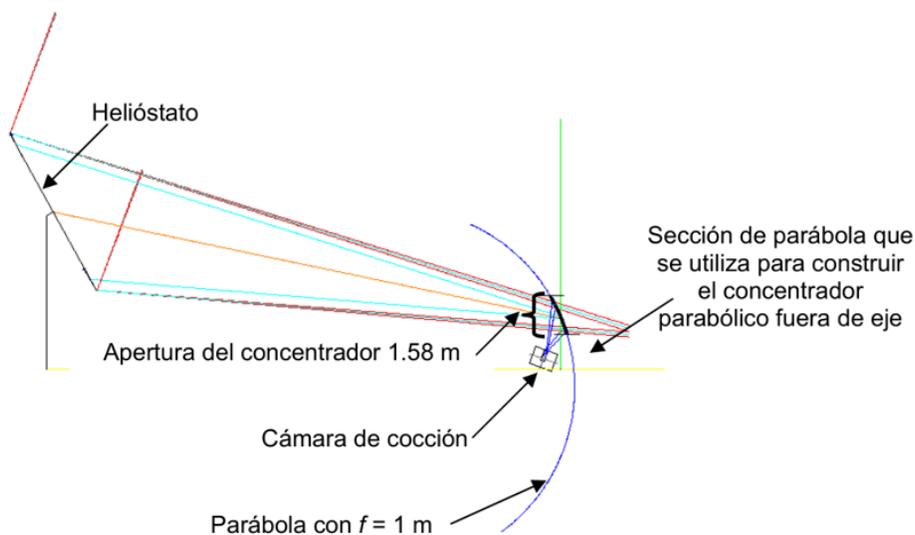


Figura 33: Diagrama de la trayectoria de la radiación solar captada por el concentrador parabólico fuera de eje  
Fuente: Villeda, 2010

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se han desarrollado prototipos de desecadores solares utilizando materiales de construcción reciclados.

### 3.2 Secador solar con tetrapack

En una primera etapa se fabricó un secador solar con una superficie de madera de 90cm. x 60cm. forrada con material tetrapack, cerrado con caras y cubierta de acrílico.

La cubierta tiene 6° de inclinación para aumentar la recepción de rayos solares.

Se encuentra soportado sobre unos tornillos metálicos que lo ayudan a elevar su altura con el fin de que no sea afectado por inundaciones, se puede apreciar en la Figura 34. Este equipo no contaba con tapa superior para provocar un efecto invernadero en la cámara de secado.



*Figura 34: Secador solar para ladrillos de primera etapa  
Fuente: Aquino, 2015*

### 3.3 Secador solar con aluminio

En la segunda etapa, se realizaron mejoras al secador solar empleado, utilizando el principio de funcionamiento de los hornos solares y reemplazando algunas de sus características iniciales, se fabricó de residuos de madera, vidrio, aluminio y cartón. Este dispositivo cuenta con una tapa que ayuda a mantener el calor dentro de la cámara de secado, se aprecia en la Figura 35.



*Figura 35: Secador solar (mejorado) segunda etapa  
Fuente: Aquino, 2015*

### 3.4 Horno solar para secado de ladrillos con aislante de poliestireno expandido y cuatro caras reflejantes

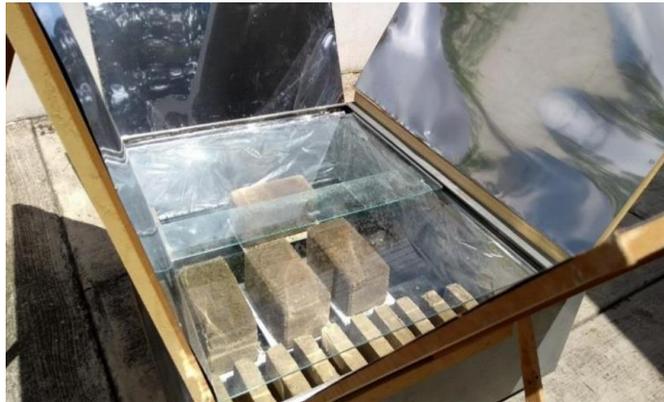
Otra de las propuestas, es un secador fabricado a partir de la reutilización de residuos de madera, aluminio, poliestireno expandido, una placa de vidrio. Este secador se aprecia en la Figura 36. Este equipo cuenta con más superficies reflejantes de aluminio.



*Figura 36: Secador solar para ladrillos  
Fuente: Rojas, et al. 2017*

### *3.5 Desecador solar con aluminio y láminas de acero*

Otro secador solar, se construyó a partir de elementos reciclados como: un estante metálico, vidrio, papel aluminio y se emplearon láminas de acero inoxidable tipo espejo. Este secador se puede ver en la Figura 37. Para este equipo se aprovechó un estante metálico en desuso.



*Figura 37: Secador solar de bloques  
Fuente: López, 2018*

### *3.6 Horno solar con espejos*

Este dispositivo tiene espejos como superficie reflejante, como lo muestran las Figuras 38 y 39 con el cuál se desarrollaron actividades para la tesis de Sathya (2019) y Quintero (2019).



*Figura 38: Horno solar para secado de ladrillos  
Fuente: Karupppasamy, 2019*



*Figura 39: Desecador solar*  
*Fuente: Quintero, 2019*



#### 4. METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrolló en 6 etapas generales:

En la primera se llevó a cabo la búsqueda de información para conocer el estado del arte.

En la etapa dos se realizaron visitas de campo para verificar las condiciones reales de operación de estas fábricas.

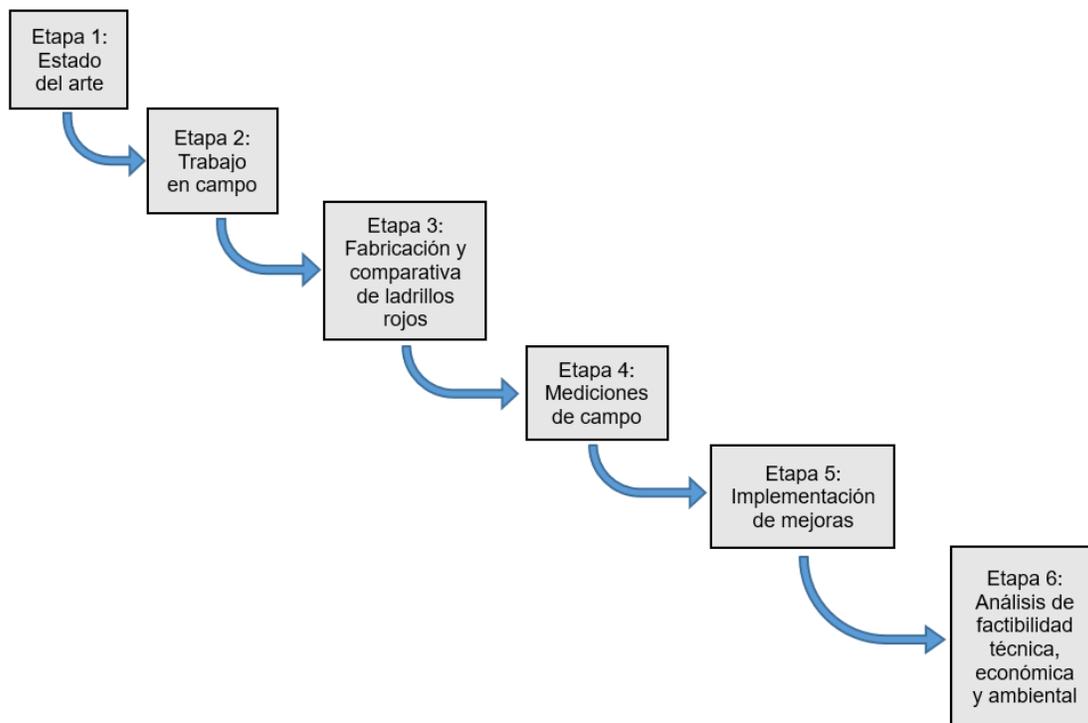
En la etapa tres, en la cual se elaboraron ladrillos con diferentes mezclas que incorporan RCD entre sus agregados, se eligió la que tuvo mejor resistencia y comportamiento en la prueba de absorción.

La intención de la etapa cuatro fue determinar las mejores condiciones de operación a partir de las condiciones meteorológicas del sitio de trabajo.

En la etapa cinco se aplicaron mejoras al desecador solar que se han visto en otras investigaciones al respecto.

Finalmente, en la etapa seis se hizo un análisis para determinar la factibilidades técnica, económica y ambiental acerca de la implementación del desecador solar en el proceso de ladrillos.

En la Figura 40 se muestran las etapas a seguir, posteriormente se describe cada una de ellas.



*Figura 40: Etapas de desarrollo del proyecto  
Fuente: Imagen propia*

#### **4.1 Etapa 1 “Estado del arte”**

Se buscó y recopiló información para fundamentar la elaboración de un dispositivo que aprovecha la luz solar para el proceso de secado de ladrillo rojo macizo a partir de la consulta de normas, tesis, artículos, estudios previos, resultados de investigaciones, manuales de instituciones, así como la consulta de publicaciones periódicas a nivel nacional e internacional.

##### **4.1.1 Recopilación y Análisis de Información**

La normatividad que sustentó la investigación puede verse en las Tablas 17 y 18.

## 4.2 Etapa 2 “Trabajo en campo”

Esta etapa incluyó realizar visitas de campo a ladrilleras para conocer la forma en la que operan normalmente, verificar su proceso de cocción y la contaminación que producen. En las Figuras 41 y 42 puede apreciarse como se ve una fábrica de ladrillo artesanal.



*Figura 41: Proceso de secado a la sombra dentro de ladrillera  
Fuente: Imagen propia*



*Figura 42: Quemador en operación en cámara de combustión de horno ladrillero  
Fuente: Imagen propia*

### 4.3 Etapa 3 “Fabricación y comparativa de ladrillos rojos”

Se fabricaron ladrillos elaborados con mezclas comerciales conforme a la bibliografía consultada y con mezclas que incluyen residuos de construcción reciclados.

Primero se hizo un listado de mezclas con las cuales fabrican ladrillos en diferentes empresas ladrilleras artesanales, recordando que las fórmulas varían ya que no están estandarizadas, en el listado también se incluyen mezclas que incorporan residuos de construcción reciclados, estiércoles, aserrín, cartón, residuos de industria azucarera.

En la Tabla 19 se muestra el listado de diferentes mezclas, tanto tradicionales como propuestas.

*Tabla 19: Listado de mezclas para hacer ladrillos tradicionales y propuestos con materiales reciclados*

MEZCLAS TRADICIONALES	MEZCLAS PROPUESTAS
Mezcla 1 arcilla 30% tierra 70% agua 500mL	Mezcla 2 arcilla 40% residuos de construcción 60% agua 500mL
Mezcla 3 arcilla 30% tierra 60% cal 10% agua 550mL	Mezcla 4 arcilla 40% residuos de construcción 50% cal 10% agua 750mL
Mezcla 5 arcilla 30% tierra 60% estiércol de caballo 10% agua 685mL	Mezcla 6 arcilla 40% residuos de construcción 1/4" 50% abono de caballo 10% agua 750mL
Mezcla 7 arcilla 30% tierra 60% estiércol de oveja 10% agua 650mL	Mezcla 8 arcilla 40% residuos de construcción 1/4" 50% estiércol de oveja 10% agua 685mL
Mezcla 9 arcilla 30% tierra 60% estiércol de vaca 10% agua 650mL	Mezcla 10 arcilla 40% residuos de construcción 1/4" 50% estiércol de vaca 10% agua 685mL
Mezcla 11 arcilla 35% tierra 60% aserrín 5% agua 550mL	Mezcla 12 arcilla 45% residuos de construcción 1/4" 50% aserrín 5% agua 550mL
Mezcla 13 arcilla 30% tierra 60% cartón 10% agua 350mL	Mezcla 14 arcilla 40% residuos de construcción 1/4" 50% cartón 10% agua 300mL
	Mezcla 15 Arcilla 45% Residuos de construcción 1/4" 50% Residuos de industria azucarera 5% Agua 550mL

Para la fabricación de ladrillos se utilizó el listado de mezclas de la Tabla 19 y se consiguieron todos los materiales mencionados:

- Arcilla y tierra obtenida en una ladrillera en la población Santa María Magdalena Ocotitlán, en el municipio de Metepec, Estado de México.
- Cal comercial.
- Estiércol de vaca, caballo y oveja.
- Aserrín, residuo de maderería.
- Cartón obtenido de embalajes varios.
- Residuos de la industria azucarera obtenidos de la Empresa Casa Sola, Cuernavaca, Morelos.
- Residuos de construcción con graduación de 1/4", obtenidos en la planta Concretos Reciclados, en Iztapalapa, Ciudad de México.

En la Figura 43 se puede ver la máquina de cribado.



*Figura 43: Cribadora frente a montículo de recolección de residuos en planta  
Fuente: Imagen propia*

Después los materiales fueron acondicionados previo a hacer el mezclado, para poder tener mayor uniformidad en las mezclas. El estiércol se deshidrató al sol y se limpió de pequeñas

pedras y de fibras grandes que sobresalen en dimensiones de las demás no digeridas por los animales y se trituraron en un molino manual obteniéndose texturas muy finas. En la Figura 44 se puede apreciar que la apariencia es polvosa y no esferas o plastas.



*Figura 44: Estiércoles de vaca, caballo y oveja triturados  
Fuente: Imagen propia*

La tierra, la arcilla y la cal se pasaron por un tamiz para deshacer grumos. La Figura 45 muestra la apariencia después del tamiz. La arcilla en su estado natural tiene formaciones endurecidas como piedras, se tamiza para limpiarla de impurezas y sea más fácil de pesar al dosificar.



*Figura 45: Arcilla tamizada  
Fuente: Imagen propia*

El cartón fue introducido en agua 24h como en la Figura 46, posteriormente triturado y dejado en estado saturado superficialmente seco como en la Figura 47.



*Figura 46: Humedecimiento de cartón  
Fuente: Imagen propia*



*Figura 47: Cartón triturado  
Fuente: Imagen propia*

El aserrín se encontró en forma de virutas y con textura polvosa.

Los residuos de la industria azucarera se utilizaron de forma fibrosa, tal como se encuentra en cualquier ingenio.

Los residuos de construcción no tuvieron algún acondicionamiento previo, se usaron como fueron obtenidos en la planta. La Figura 48 muestra que este agregado está compuesto de distintos materiales como concreto, ladrillo viejo, grava fina, arena, unicel triturado entre otros.



*Figura 48: Reciclado de residuos de construcción todo en uno granulometría 1/4”  
Fuente: Imagen propia*

Para dosificar las sustancias que componen las mezclas se pesó un ladrillo que fue moldeado en otra ocasión en la ladrillera artesanal fabricada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, este ladrillo pesó 2600 gramos.

El peso de los ladrillos es relativo, pues depende de la densidad de los materiales con que se fabrique, pero este peso nos da un acercamiento al peso que se puede requerir para adaptarnos al volumen de ladrillos que puede realizar la moldeadora.

Se dosificaron los materiales en los porcentajes adecuados, dando como peso total 2.6 kg de muestra seca por cada ladrillo.

Los materiales fueron dosificados con proporciones propuestas empíricamente, puesto que en la práctica ladrillera no existen cifras exactas al momento de proporcionar las mezclas, se hace basándose en el conocimiento heredado empíricamente y experiencia de los fabricantes ladrilleros.

Los materiales ya dosificados fueron mezclados uniformemente en seco.

Ya mezclados en seco, se procedió a hidratar las mezclas y seguir mezclando hasta que se obtuvo una pasta uniforme. En las Figuras 49 y 50 se puede ver el proceso de mezclado.



*Figura 49: Homogenizado en seco  
Fuente: Imagen propia*



*Figura 50: Hidratado de materiales  
Fuente: Imagen propia*

La pasta uniforme se colocó en la moldeadora de la ladrillera artesanal, ésta requiere un acondicionamiento previo al vertido de la mezcla, este acondicionamiento consiste en una

limpieza del área de vertido de mezcla y una previa humectación de todas las caras de moldeo además de un espolvoreo sencillo con tierra seca. En las Figuras 51 y 52 se ve la ladrillera artesanal, así como su preparación.



*Figura 51: Ladrillera artesanal fabricada en el Instituto de Ingeniería por el grupo de valorización de RSU  
Fuente: Imagen propia*



*Figura 52: Preparación de la ladrillera artesanal previa al moldeo  
Fuente: Imagen propia*

La colocación de la pasta en la ladrillera artesanal se debe hacer gradualmente realizando apisonados con una superficie lisa para excluir el aire que podría quedar atrapado en la mezcla, como puede verse en la Figura 53.



*Figura 53: Exclusión de aire en la mezcla durante el moldeo  
Fuente: Imagen propia*

Ya apisonado el material, se procede a cerrar la tapa superior de la moldeadora y accionando la manija que la compone.

Para sacar el material, se regresa la manija que fue accionada, se abre la tapa de la cámara de moldeo y se acciona una palanca que empuja el ladrillo hacia arriba expulsándolo como se aprecia en la Figura 54.



*Figura 54: Obtención de ladrillos  
Fuente: Imagen propia*

La moldeadora se debe limpiar con un trapo húmedo después de cada moldeo.

Los ladrillos recién fabricados se deben secar al aire libre, a temperatura ambiente, tal como se hace en las ladrilleras tradicionales; estos al estar fabricados con diferentes mezclas, deben tener indicaciones que los diferencien para tener un buen control a momento del manejo.

Una vez moldeados, éstos se secan a la sombra en un lugar abierto durante 5 días, acomodados de tal forma que permitan circular aire entre ellos con el fin de retirar la humedad de la superficie como puede verse en la Figura 55.

El lugar que se destinó para los ladrillos debe protegerlos de la precipitación pluvial directa.



*Figura 55: Acomodo de ladrillos que permite circulación de aire entre ellos  
Fuente: Imagen propia*

#### *4.3.1 Pruebas a los ladrillos*

Las piezas elaboradas con diferentes mezclas se sometieron a pruebas para determinar una mezcla base con las que se elaboraron y ensayaron más ladrillos; estas pruebas son el control de calidad que viene indicado en la publicación **Manual para la construcción de viviendas de adobe** y en la prueba de absorción a 24 h conforme a la **NMX-C-037-ONNCCE-2013**.

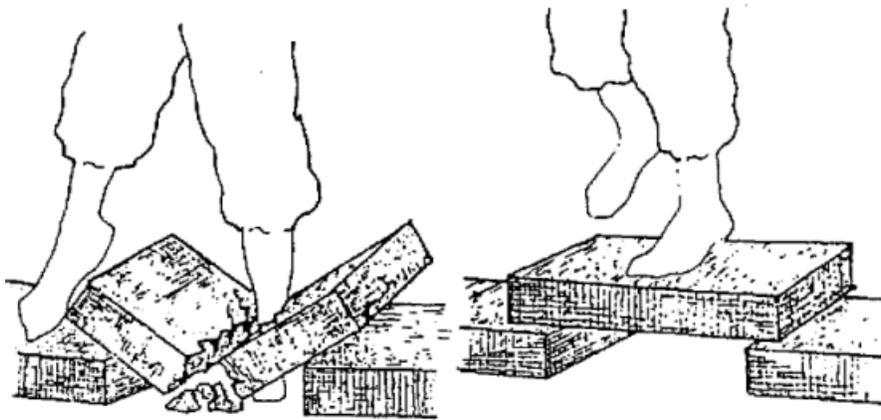
Los ladrillos fabricados con mezcla base se procesaron con diferentes tipos de secado (solar, eléctrico y de combustión), y se sometieron a ensayos de laboratorio. Los ensayos de laboratorio fueron:

- Resistencia mecánica a la compresión.

- Absorción de agua.
- Erosión acelerada.

#### 4.3.1.1 Determinación de mezcla base

La mezcla base se determinó después de realizar la prueba de control de calidad que consiste en aplicar una carga de 85 kg aproximadamente a una pieza que se encuentra soportado sobre otras dos piezas como se muestra en la Figura 56. Este procedimiento se realiza conforme al manual para la construcción de viviendas de adobe.



*Figura 56: Prueba de calidad de adobes*  
*Fuente: Morales, Roberto et al., 1993*

Las piezas fabricadas con mezclas que pasaron la prueba de control de calidad, se sometieron a la prueba de absorción total.

Previo a realizar el proceso con el desecador solar, el equipo debe colocarse en un lugar en donde reciba radiación solar directa sin bloqueos por sombras de edificios o vegetación y proteger el dispositivo en días nublados o lluviosos.

Para colocar los ladrillos se introducen en la cámara de secado sobre la base de cristal que se encuentra en la base del desecador dejando espacios de separación entre ellos para que el cambio de temperatura los cubra uniformemente.

Las superficies reflejantes se deben orientar manualmente conforme cambie la inclinación de la incidencia solar a lo largo del día.

Concluidos los 5 días, se procede a sacar los ladrillos para someterlos a las pruebas de laboratorio mencionadas en normas nacionales e internacionales referentes a ladrillos.

Se consideró el tiempo de 5 días porque ha sido utilizado en otras investigaciones orientadas a ladrillos obteniendo buenos resultados, un proceso de cocido tradicional dura aproximadamente 40 horas.

Para el proceso con mufla eléctrica, las piezas fabricadas con mezcla base son ingresadas en una mufla de laboratorio a temperatura constante a 900°C. Este proceso se hizo en 24 horas debido a que la mufla alcanza la temperatura deseada de forma más rápida y constante.

Los ladrillos que se sometieron a proceso de horneado tradicional, se ingresaron en la cámara de cocido de un horno durante el horneado de una tanda comercial, estas tandas no tienen una duración exacta, dependen del lugar donde se fabriquen, las ladrilleras que fueron visitadas para este proyecto someten los ladrillos a horneado 40 horas aproximadamente.

La determinación de dimensiones como se ve en la Figura 57, se verificó su cumplimiento con la Tabla 1, 2 y 3.

Las dimensiones pueden tener otros nombres según la bibliografía consultada: largo, ancho y altura pueden encontrarse como soga, tizón y grueso.

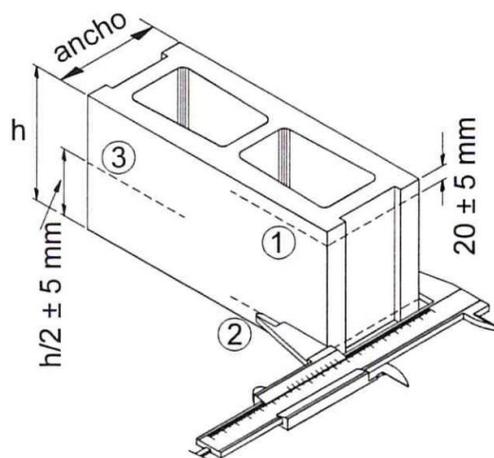


Figura 57: Determinación de dimensiones  
Fuente: NMX-C-038-ONNCCE-2013

Tolerancia a despostilladuras.

Estas tolerancias aplican para aristas y vértices de los ladrillos, se toman después de los procesos de secado/cocido y antes de los ensayos de laboratorio, las despostilladuras se producen con la simple manipulación del ladrillo.

Para la realización de algunos ensayos, las piezas se recortaron.

#### 4.3.1.2 Resistencia a la compresión

El procedimiento para llevar a cabo la prueba de compresión mecánica conforme la norma **NMX-C-036-ONNCCE-2013** puede verse en la Figura 58 y consiste en:

- Anotar las dimensiones de los especímenes sujetos a esta prueba.
- Cabecear los ladrillos con una mezcla de yeso, cemento y agua o con azufre fundido.
- Confinar la cara con una pequeña cimbra de madera verificando que quede entre 2 y 3 mm. por encima del ladrillo.
- Utilizar nivel de mano (se nivela la mezcla en diagonal).
- Humedecer la superficie donde se realiza el cabeceo y posteriormente se procede a aplicar la mezcla.
- El cabeceo se realiza en ambas caras de mayor área, que es donde hace contacto con la máquina de compresión.
- Después de que se seca la mezcla del cabeceo se colocan en la máquina, verificando que quede alineado con la superficie de la placa de contacto insertada en la máquina.

Los resultados de esta prueba se sustituyen en la siguiente ecuación para poder determinar la resistencia a compresión de la pieza. Ver Ecuación 1

Ecuación 1.....  $f_p = \frac{P}{A}$

Donde:

$f_p$  = Resistencia a la compresión en kg/cm<sup>2</sup>

P = Carga máxima soportada por la pieza en kg

A = Área sobre la cual será aplicada la presión en  $\text{cm}^2$

Se verifica que los resultados cumplan con los valores de la tabla de resistencia a compresión según las Tablas 7, 8, 9, 10, 11.

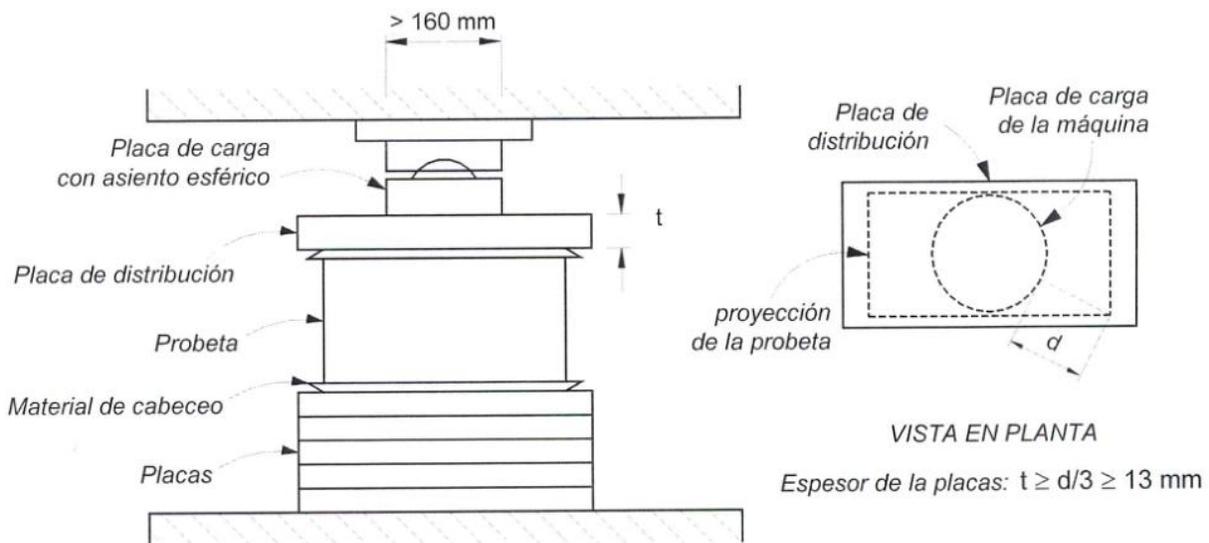


Figura 58: Ensayo de compresión mecánica simple, utilizando una máquina universal  
Fuente: NMX-C-036-ONNCCE-2013

#### 4.3.1.3 Absorción de agua

Se realizaron las pruebas de absorción de agua inicial y absorción total a 24 horas transcurridas conforme a la **NMX-C-037-ONNCCE-2013**.

##### 4.3.1.3.1 Absorción inicial (capilaridad)

Es la cantidad de agua que absorbe un espécimen por una de sus caras bajo determinadas condiciones durante 10 min. de inmersión en agua potable donde esta lo cubra 5 mm. manteniendo el nivel de agua constante en el recipiente, y se expresa por un coeficiente de absorción, como lo indica la norma.

Los ladrillos fabricados se evaluaron técnicamente mediante pruebas de absorción de agua máxima inicial.

- Primero se determina el peso seco de cada ladrillo, luego se consigue un recipiente que tenga una base con área mayor a la cara de mayor área del ladrillo y algún soporte. Colocar los soportes dentro del recipiente y sobre los soportes colocar el ladrillo con la cara mayor hacia abajo.
- Se le agrega agua al recipiente de modo que el nivel del líquido quede arriba de los soportes en un rango entre 3.0 y 3.5 mm. el ajuste del nivel de agua se hace con un ladrillo en estado de humedad saturado, el agua debe de estar entre 17°C y 24°C.
- Se coloca el ladrillo de la prueba en el recipiente y debe quedar sumergido 5 mm. durante 10 minutos cuidando que el nivel del agua se mantenga en el límite establecido.
- Pasados los 10 minutos se retira del recipiente el ladrillo y se secará con un trapo la superficie húmeda el exceso de agua en no más de 10 segundos, luego se procede al pesado nuevamente del ladrillo para poder determinar la cantidad de agua que absorbe.

Con la ecuación 2 podemos determinar la absorción máxima inicial.

$$\text{Ecuación 2} \dots\dots\dots Cb = \frac{100M}{S\sqrt{t}} = \frac{100(M_1 - M_s)}{S\sqrt{10}}$$

Donde:

Cb = absorción máxima inicial en g/min.

M = masa de agua absorbida por el bloque durante el ensayo en g (M = M<sub>1</sub> - M<sub>s</sub>).

M<sub>1</sub> = masa húmeda en g.

M<sub>s</sub> = la masa seca en g.

S = superficie de la cara sumergida en cm<sup>2</sup>.

t = tiempo de inmersión en minutos (t = 10 min.).

En la Figura 59 se observa una ilustración del ensayo de laboratorio:

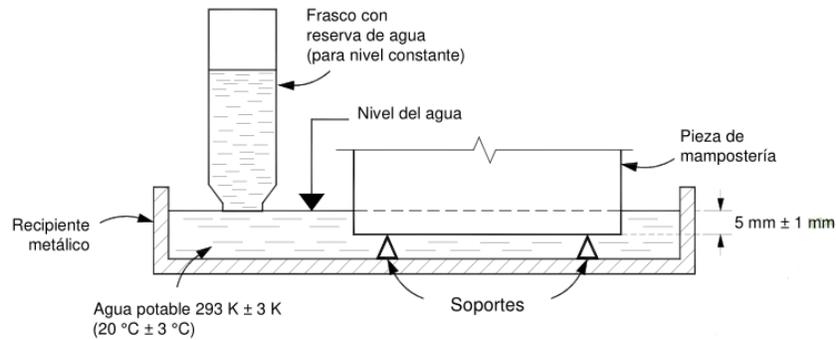


Figura 59: Esquema de la prueba de absorción inicial  
Fuente: NMX-C-037-ONNCCE-2013

#### 4.3.1.3.2 Absorción total de agua en 24 h

Se registran las masas de tres especímenes secos y se sumergen en agua a temperatura entre  $17 \text{ °C}$  y  $23 \text{ °C}$  por un periodo de 24 horas; terminando este periodo se sacan y se elimina el agua superficial con un paño o papel absorbente y se vuelve a determinar la masa.

Con la Ecuación 3 para absorción en porcentaje

Ecuación 3..... 
$$A = \frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} * 100$$

Donde:

A = absorción en % (en masa).

$M_S$  = masa seca del espécimen en gramos (g).

$M_{SSS}$  = masa saturada y superficialmente seca en gramos (g).

Los resultados de las pruebas se comparan con los indicados en la Tabla 08.

#### 4.3.1.4 Prueba de erosión acelerada

Una prueba referente a erosión es el Ensayo de erosión acelerada, lo indica la norma **NMX-C-508-ONNCCE-2015** y la **UNE-41410:2008**.

Se deja caer una corriente continua de agua sobre el bloque durante 10 min. a través de un tubo de cristal de  $\varnothing$  interior = 5 mm., conectado a un tanque de agua de nivel constante, cuya cabecera está a 1.5m sobre la cara del bloque, este se mantiene inclinado a  $27^\circ$  respecto a la

horizontal. Con una varilla de  $\varnothing = 30$  mm. se mide la profundidad de las oquedades (D) que aparecen. En la Figura 60 se puede observar un esquema del ensayo que aparece en la **NMX-C-508-ONNCCE-2015**.

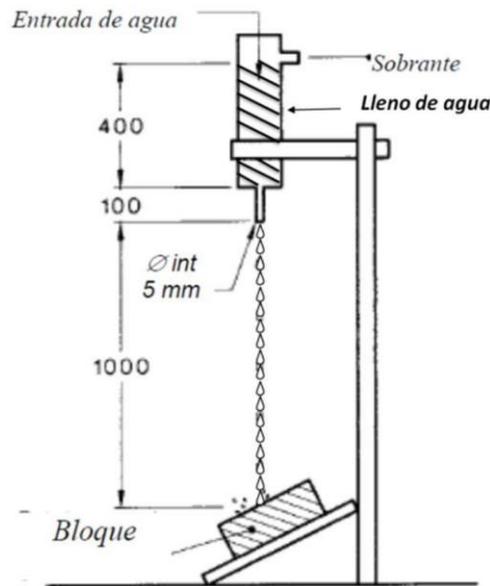


Figura 60: Esquema del ensayo de la prueba de erosión acelerada  
Fuente: NMX-C-508-ONNCCE-2015

Se determina un índice de erosión conforme a la Tablas 4, 5, 6.

#### 4.4 Etapa 4: "Mediciones de campo"

Durante la utilización del prototipo solar se hicieron mediciones cada hora para determinar temperatura y radiación en un horario de 10:00 hrs. a 16:00 hrs., a lo largo de este tiempo se acomodaron los espejos para que reflejaran la energía del sol hacia la cámara de secado.

##### 4.4.1 Instrumentos y equipos a utilizar en las pruebas de campo

Para las mediciones relacionadas a la energía solar se utilizó el equipo indicado en la Tabla 20 y puede verse en las Figuras 61 y 62.

Tabla 20: Instrumentos de medición a ocupar durante las pruebas bajo la luz del sol

Parámetros a medir	Nombre del dispositivo
Temperatura	Thermocouple-thermometer data logger model EA 15 (Extech, Nashua, NH, USA)
Radiación Solar	Pyranometer LabQuest-2 (Vernier Software and Technology, Beaverton, OR, USA).



Figura 61: Thermocouple-thermometer data logger model EA 15  
Fuente: Imagen propia



Figura 62: Pyranometer LabQuest-2  
Fuente: Imagen propia

#### 4.4.2 Características físicas del desecador solar

El desecador solar está fabricado con materiales RCD como aluminio, espejos y vidrio, no cuenta con componentes eléctricos o electrónicos.

Con base en el “Manual para montar secador solar” de Lira, 2019 a continuación en la Tabla 21 se mencionan los componentes del dispositivo. El dispositivo que se puede ver armado en la Figura 63.

**Tabla 21: Componentes del desecador solar**

Componentes	Descripción
Soporte primario A: 2 PIEZAS	Este es un soporte creado para cargar el peso de los espejos más grandes, se pueden identificar debido a su base debido a que es más alargada que el Soporte primario B.
Soporte primario B: 2 PIEZAS	Fueron hechos para soportar los espejos rectangulares B, diferencia de los Soportes primarios A se les puede identificar por la base, pues es más corta.
Soporte secundario: 4 PIEZAS	Fabricados para los espejos menos pesados, es decir los triangulares, se les puede identificar por su poste pues no está reforzado como en los primarios.
Espejo rectangular A con estructura: 2 PIEZAS	Espejos cuya función es redireccionar la radiación solar a la cabina.
Espejo rectangular B con estructura: 2 PIEZAS	Espejos cuya función es redireccionar la radiación solar a la cabina.
Espejo triangular: 4 PIEZAS	Espejos cuya función es adicionar radiación solar a la cabina aprovechado así el máximo espacio disponible.
Estructura para espejo triangular: 4 PIEZAS	Estructuras para colocar espejos triangulares y aprovechar el espacio entre espejos rectangulares.
Tubos aproximadamente 50 cm.: 8 PIEZAS	Su función es como soporte para el ajuste de inclinación de los ocho espejos.
Cabina solar: 1 PIEZA	Cámara aislada para el almacenamiento de producto a secar.



*Figura 63: Dispositivo solar armado, fabricado por el Grupo de Valorización de RSU del Instituto de Ingeniería de la UNAM  
Fuente: Imagen propia*

#### *4.4.2.1 Componentes del dispositivo de estudio*

Conforme a la ASAE 580.1 y al IS 13429-1 se puede observar que los dispositivos solares concentran la energía en una cámara con tapa de material transparente y una superficie reflejante. En las Figuras 64 y 65 se puede observar lo que mencionan la ASAE y el IS. Para este estudio se utilizaron más superficies reflejantes que las mostradas en los estándares estadounidense e indio.

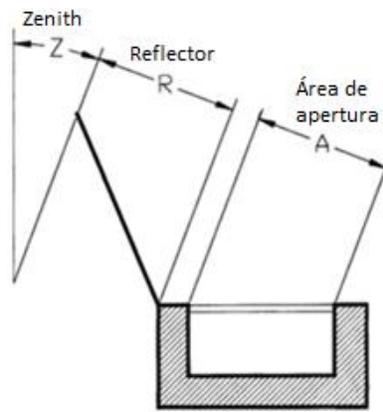


Figura 64: Cocina solar de la ASAE  
Fuente: ASAE S508.1

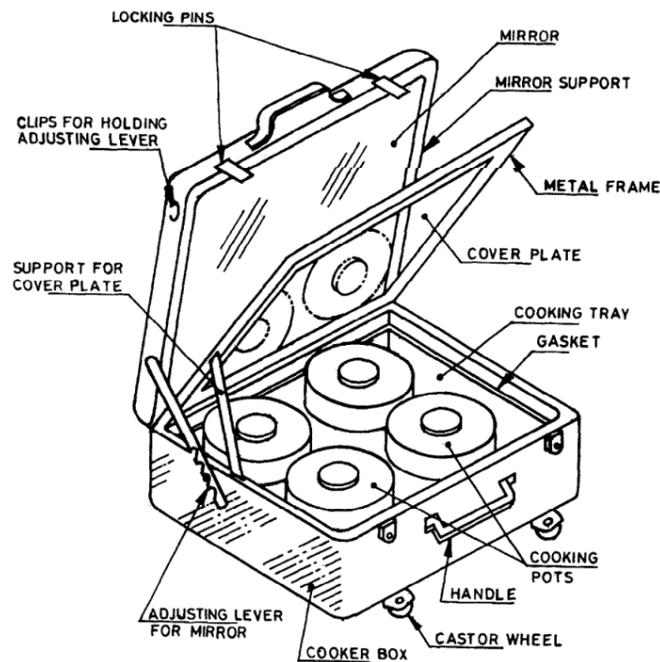


Figura 65: Cocina solar del Indian Standard  
Fuente: IS 13429 part 1

#### 4.4.3 Principio de funcionamiento del desecador solar

El principio de funcionamiento del desecador solar está relacionado con la radiación solar.

El dispositivo capta energía solar en la cámara de secado o cabina que se encuentra la parte central.

La energía que capta es la que recibe directamente y también la que es reflejada de un sistema de espejos que están ubicados alrededor de su acceso como lo ilustra la Figura 66.

El dispositivo tiene que estar orientado con una inclinación hacia el sur debido a que el lugar de pruebas se encuentra en el hemisferio norte.

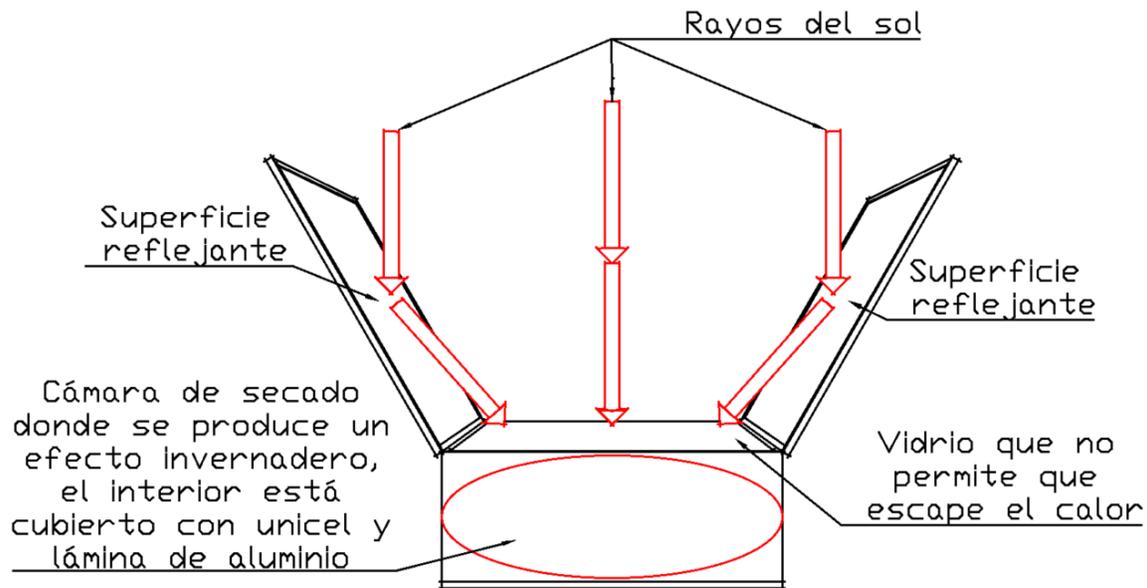


Figura 66: Principio de funcionamiento del desecador solar  
Fuente: Imagen propia

#### 4.5 Etapa 5: “Implementación de mejoras”

Con base en la bibliografía consultada, se implementaron mejoras en su diseño como la utilización de espejos en lugar de placas de tetrapak y colocación de tapa para retener el calor dentro de la cámara de secado. Los materiales de fabricación son RCD.

#### 4.6 Etapa 6: “Análisis de factibilidad técnica, económica y ambiental”

En esta última etapa se analizó la reducción de GEI entre hornos tradicionales contra el desecador solar; con toda la información obtenida se concentró la información y se hizo un análisis comparativo de factibilidad técnica, económica, ambiental y social del uso de hornos convencionales contra un dispositivo que opera con energía solar.

## 5. RESULTADOS

Los avances que se han desarrollado siguen utilizando combustión como generador de calor. Estos avances pueden verse en la Tabla 22.

*Tabla 22: Avances en el proceso de horneado*

<b>Tipos de horno de combustión</b>	<b>Equipos Auxiliares para hornos de combustión</b>	<b>Combustibles para hornos de combustión</b>	<b>Formas de producción de ladrillos con combustión</b>	<b>Dispositivos con energías alternativas</b>	<b>Dispositivos que utilizan energía solar</b>
Horno tiro a cielo abierto	Ventilador para inyección de aire	Leña	Intermitente	-	Concentrador parabólico fuera de eje
Horno de tiro invertido	Dosificador de biomasa	Aserrín	Semicontinua	Horno eléctrico tipo mufla	Desecador solar
Horno MK y MK3	Quemador de Gas Natural	Gas Natural	Continua	-	-

Se observa que las modificaciones que se han hecho en el proceso de horneado tradicional (hornos de combustión) tienen un ahorro de combustible, o apresuran el proceso de cocido, pero siguen generando emisiones a la atmósfera.

Resultado de las visitas a ladrilleras, se puede constatar las condiciones en que operan. En las Figuras 67, 68, 69, 70, 71 y 72 podemos apreciar condiciones de una ladrillera en el municipio de Metepec, Estado de México.



*Figura 67: Arcilla para ladrillos*  
*Fuente: imagen propia*

La calidad de la arcilla o la tierra puede variar, por ejemplo, la arcilla roja (izquierda) y la arcilla negra (derecha) tienen diferente resistencia y maleabilidad, pueden encontrarse en diferentes proporciones según el banco de material provocando situaciones como que existan variaciones dentro de especímenes de una misma tanda de producción.



*Figura 68: Horno artesanal de ladrillera*  
*Fuente: Imagen propia*

Estos hornos están fabricados de ladrillos de tandas pasadas, lo que los hace una opción económica.



*Figura 69: Combustible para horno ladrillero  
Fuente: Imagen propia*

La utilización de aceite de motor usado en la quema para alimentar horno es una práctica común en la industria ladrillera.



*Figura 70: Quemadores de aceite  
Fuente: Imagen propia*

Cuando el horno se encuentra en operación, quemadores de aceite (complementados con aspersion de agua) elevan la temperatura en el interior del horno.



*Figura 71: Horno ladrillero artesanal de tiro superior en operación  
Fuente: Imagen propia*

Los gases calientes son expulsados a la atmósfera por la parte superior del horno.



*Figura 72: Recipientes de aceite  
Fuente: Imagen propia*

En estos contenedores se aloja el aceite que se quema en el horno, conforme se vacían se van apilando.

Se observa que no hay muchos estudios enfocados a la utilización de energía solar para el secado de ladrillos.

Una vez elaborados los ladrillos con las mezclas propuestas se sometieron a prueba de calidad del manual para la construcción de viviendas de adobe, como puede verse en la Figura 73.

Como complemento, se les realizó la prueba de absorción total.



*Figura 73: Prueba de calidad para adobes  
Fuente: Imagen propia*

En la Tabla 23 se muestran los mejores resultados. El manual para la construcción de viviendas de adobe no indica cuantas repeticiones de la prueba de calidad se deben ejecutar, por lo que para este trabajo se realizaron tres repeticiones, tal como lo indica la NMX-C-037-ONNCCE-2013.

*Tabla 23: Resultados para determinar la mezcla base*

MEZCLAS	Promedios de resultados de pruebas de calidad por cada mezcla
Mezcla 1 arcilla 30% tierra 70% agua 500mL	Si pasa
Mezcla 2 arcilla 40% residuos de construcción 60% agua 500mL	Si pasa
Mezcla 4 arcilla 40% residuos de construcción 50% cal 10% agua 700mL	Si pasa
Mezcla 12 arcilla 45% residuos de construcción 1/4" 50% aserrín 5% agua 550mL	Si pasa
Mezcla 13 arcilla 30% tierra 60% cartón 10% agua 350mL	Si pasa

A estos ladrillos se les aplicó la prueba de absorción máxima a 24 horas, la mezcla que tuvo un mejor resultado fue la mezcla 4 (conservó su forma), por lo que se decidió usar esta mezcla como base. Esta mezcla es la que tuvo un mejor desempeño en las pruebas para seleccionar la mezcla base. Un ladrillo fabricados con mezcla 4 puede apreciarse en la Figura 74.



*Figura 74: Ladrillo fabricado con mezcla 4  
Fuente: Imagen propia*

Ya seleccionados los ladrillos con la mezcla base (mezcla 4), se procedió a realizar los procesos de secado/cocido. Los ladrillos elaborados con esta mezcla fueron procesados con combustión en un horno tradicional y se observó que la cal no es un buen agregado para ladrillos rojos sometidos a cocido con combustión, por lo que además se procedió a elaborar una serie de ladrillos con una mezcla que no incluyera cal.

Después de probarse la mezcla 4, se probó la mezcla 2 porque es la más parecida y se ensayaron paralelamente. Además de los ensayos de laboratorio a ladrillos propios, se ensayaron ladrillos con mezcla comercial (de la ladrillera donde se realizaron las visitas) cocida y sin cocer que consiste en tierra, arcilla y agua para ambos casos.

Se determinó el tamaño de los ladrillos conforme la NMX-C-038-ONNCCE-2013 como se puede observar en la Figura 75.



*Figura 75: Determinación de dimensiones  
Fuente: Imagen propia*

Las dimensiones de los ladrillos siempre dependerán del tamaño del molde en el que se fabriquen, si el molde es fabricado con dimensiones aceptadas por norma los ladrillos fabricados tendrán medidas contempladas en normatividad.

Fabricados los ladrillos con mezclas seleccionadas (2 y 4) se sometieron a diferentes procesos de secado, utilizando el desecador solar 8 horas diarias durante 5 días, la mufla de laboratorio a 950°C durante 24 horas y horneado tradicional que duró 40 horas. Los ladrillos sometidos a estos procesos se les hicieron ensayos de laboratorio, y se compararon los resultados conforme a valores establecidos en normas nacionales e internacionales.

Los ensayos se repitieron las veces que menciona la normatividad para cada muestra, 5 ladrillos en el caso de las pruebas de resistencia conforme a la NMX-C-036-ONNCCE-2013, 3 ladrillos en la de absorción inicial y 3 ladrillos en la de absorción a 24 horas conforme a la NMX-C-037-ONNCCE-2013, 2 ladrillos por cada muestra en el ensayo de erosión acelerada conforme a la NMX-C-508-ONNCCE-2015 y la UNE 41410:2008 ejecutándose con especímenes nuevos en cada prueba y cada repetición, los resultados se promediaron. Algunos de los ladrillos mostraron bajo desempeño en ensayos de absorción y de erosión por lo que se les suspendió esa prueba.

De manera complementaria se realizaron ensayos a piezas comerciales procesadas en horno convencional y secadas al aire libre, con el fin de comparar los resultados de los ladrillos fabricados para esta investigación con ladrillos artesanales que se encuentran en el mercado.

## 5.1 Procesados con el desecador solar

Durante el proceso donde se utilizó el desecador solar se realizaron las mediciones de temperatura y radiación solar. Cada hora se tomaron mediciones, se obtuvieron los datos registrados en la tabla 24, y se resumieron en la Tabla 25.

**Tabla 24: Mediciones de radiación y temperatura durante el proceso que utiliza energía del sol con la mezcla 2 y mezcla 4**

Día	Hora	Desecador solar Mezcla 2		Desecador solar Mezcla 4			
		Mediciones fuera del desecador solar		Mediciones dentro del desecador solar			
		Temperatura °C	Radiación solar	Temperatura °C	Temperatura °C	Radiación solar	Temperatura °C
1 Día soleado	08 h	15.8	299	15.8	14.8	226	18.7
	09 h	19.2	324	28.4	18.1	423	27.2
	10 h	22.4	300	50.3	21.2	346	69.7
	11 h	24.3	420	120.6	23.2	433	118.3
	12 h	26.2	320	135.3	24.6	624	132.2
	13 h	28.1	400	145.7	26.5	653	141.1
	14 h	28.7	327	152.2	25.7	336	150.0
	15 h	27.8	350	112.9	24.7	489	113.8
	16 h	24.3	347	98.2	23.8	347	98.0
2 Día nublado	08 h	14.8	245	19.2	14.9	301	19.0
	09 h	18.9	254	29.4	19.0	360	27.9
	10 h	22.4	300	55.1	21.7	299	56.2
	11 h	25.2	401	121.4	23.9	423	120.3
	12 h	26.0	720	132.6	24.8	601	133.8
	13 h	26.8	625	141.7	26.5	734	142.1
	14 h	25.9	660	165.4	27.1	652	166.3
	15 h	24.9	502	110.8	25.8	552	116.4
	16 h	24.1	509	99.0	24.0	520	98.7
3 Día de radiación alta	08 h	15.9	714	16.1	16.0	514	16.0
	09 h	19.1	913	30.4	20.3	616	31.2
	10 h	22.5	407	62.6	22.7	501	61.0
	11 h	25.9	466	120.6	25.8	674	121.8
	12 h	27.1	943	145.3	26.3	950	144.2
	13 h	26.8	1204	166.7	27.0	807	165.1
	14 h	26.9	457	171.2	26.8	602	169.9
	15 h	25.4	796	166.4	25.5	659	166.3
	16 h	24.9	632	161.2	24.8	500	160.7
4 Día soleado	08 h	16.1	327	15.7	16.1	328	15.5
	09 h	16.7	412	30.8	16.7	417	31.0
	10 h	20.1	465	59.1	20.1	675	60.3
	11 h	23.2	874	121.6	22.2	897	121.6
	12 h	26.3	791	134.2	24.5	788	124.2
	13 h	27.1	431	148.8	24.6	623	116.8
	14 h	26.8	247	166.7	22.7	436	101.6
	15 h	25.9	363	111.2	-	-	-
	16 h	24.8	745	98.7	-	-	-
5 Día soleado	08 h	16.0	241	16.3	16.1	233	17.1
	09 h	19.1	255	28.9	18.3	327	29.2
	10 h	20.7	247	56.1	20.7	446	53.9
	11 h	22.2	478	118.4	23.4	439	119.8
	12 h	23.9	741	134.4	25.9	838	135.2
	13 h	25.6	246	152.3	26.6	716	153.1
	14 h	26.9	448	160.8	26.1	848	161.3
	15 h	25.7	685	111.5	25.1	634	112.6
	16 h	24.3	958	91.2	24.6	557	89.9

Tabla 25: Promedios por día de los resultados de las mediciones de temperatura y radiación

Horas del día	Mediciones fuera del desecador solar		Mediciones dentro del desecador solar
Hora	Temperatura °C	Radiación solar	Temperatura °C
08 h	15.7	342.8	16.9
09 h	18.5	430.1	29.4
10 h	21.5	398.6	58.4
11 h	23.9	550.5	120.4
12 h	25.6	731.6	135.1
13 h	26.6	643.9	147.3
14 h	26.4	511.3	156.5
15 h	25.6	545.6	124.7
16 h	24.4	568.3	110.6

Los datos registrados en la tabla de promedios se graficaron para visualizar el comportamiento de la temperatura, en la Figura 76 y 77 se pueden observar curvas de comportamiento de la temperatura y radiación.

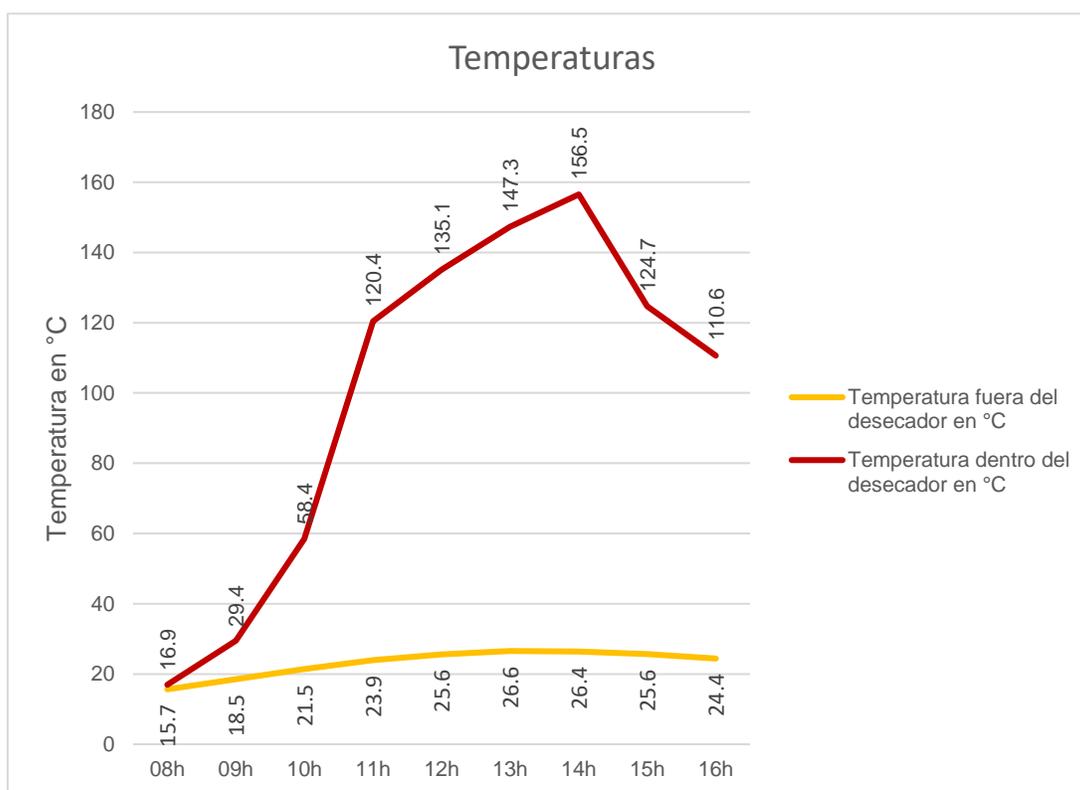


Figura 76: Gráfico de temperaturas al interior y exterior del desecador  
Fuente: Elaboración propia

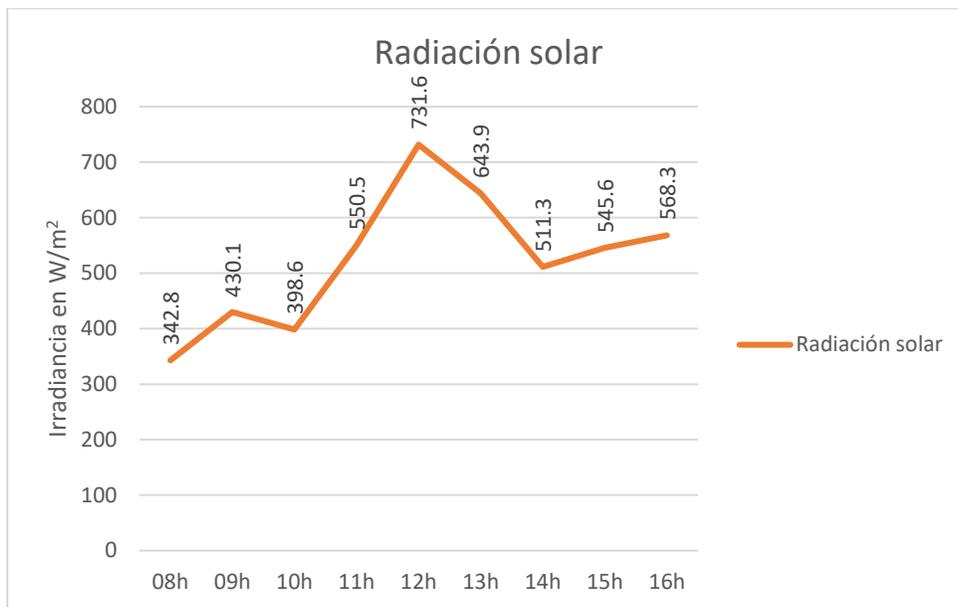


Figura 77: Gráfico de radiación solar  
Fuente: Elaboración propia

Algunos de los días presentaron radiación alta y otros se encontraban parcialmente nublados, además la nubosidad provocaba diferenciales de radiación en lapsos muy cortos de tiempo y muchos picos de radiación alta se presentaron cuando aún no era momento de registrar la medición. Pese a eso, el desecador solar tuvo temperaturas más altas en el interior que a temperatura ambiente. El proceso con el desecador solar se aplicó a las piezas elaboradas con mezcla 2 y mezcla 4.

El desecador que se utilizó tiene algunas mejoras respecto a otros que se han utilizado, por ejemplo, la incorporación de tapa y la utilización de espejos en lugar de placas de aluminio; además incluye más superficies reflejantes que los mencionados por la ASAE y el IS. La Figura 78 muestra la operación del desecador solar.



*Figura 78: Proceso con el desecador solar  
Fuente: Imagen propia*

Los espejos se alinearon cada hora para dirigir los reflejos adecuadamente hacia los ladrillos. Los ladrillos se acomodaron de manera diferente para que pudieran estar todos dentro del dispositivo sin comprometer la condición de que el calor tiene que circular entre ellos, ya que de manera vertical no fue posible.

Una vez listas las piezas a ensayar se procedió a realizar las pruebas resistencia a compresión simple, para lo cual se realizaron los respectivos procedimientos de este ensayo como, la toma de dimensiones y el cabeceo con azufre como se muestra en la Figura 79 para después realizar el ensayo como se ve en las Figuras 80 y 81. Las piezas fueron sometidas a todas las pruebas.



*Figura 79: Ladrillos cabeceados con azufre  
Fuente: Imagen propia*

El cabeceo con azufre o con mortero de azufre no tiene espesor máximo, en el caso de otros materiales como yeso o mezcla de yeso y cemento el cabeceo debe ser de máximo 5mm. y sus superficies no deben apartarse de un plano 0,05mm. en 150mm., esto conforme a la NMX-C-036-ONNCCE-2013.



*Figura 80: Ensayo de compresión, inicio de la prueba  
Fuente: Imagen propia*



Figura 81: Ensayo de compresión, final de la prueba  
Fuente: Imagen propia

Los resultados de los ensayos a piezas procesadas con desecador solar están asentados en las Tablas 26 y 27.

Tabla 26: Ladrillos hechos de mezcla 2 procesados con el desecador solar, cumplimiento con normas

Mezcla 2 Desecador solar Ensayos:	Resultados promedio de ensayos	Resultado comparado con lo propuesto en la norma	Está o no, dentro del rango aceptado por la norma
Dimensiones	largo 26 cm., ancho 12 cm., altura 6 cm.	NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 1) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 2) NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 3)	SI SI SI
Despostilladuras	Menores a 5 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 4) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 5) UNE-41410:2008 (ver Tabla 6)	SI SI SI
Resistencia mecánica a la compresión	48.2644 kg/cm <sup>2</sup>	NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 7) NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 8) NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 9) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 10) UNE-41410:2008 (ver Tabla 11)	Uso estructural: <b>NO</b> Uso no estructural: <b>SI</b> Baja resistencia: <b>SI</b> Piezas fabricadas a mano: <b>SI</b> Resistencia media: <b>SI</b>
Absorción de agua	-	NMX-C-404-ONNCCE-2012 inicial y 24h (ver Tabla 12) NMX-C-441-ONNCCE-2013 24h (ver Tabla 13)	NO NO
Resistencia a la erosión	-	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 14) UNE-41410:2008 (ver Tabla 14)	NO NO

**Tabla 27: Ladrillos hechos de mezcla 4 procesados con el desecador solar, cumplimiento con normas**

Mezcla 4 Desecador solar Ensayos	Resultados promedio de ensayos	Resultado comparado con lo propuesto en la norma	Está o no, dentro del rango aceptado por la norma
Dimensiones	largo 26 cm., ancho 12 cm., altura 6 cm.	NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 1) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 2) NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 3)	SI SI SI
Despostilladuras	Menores a 5 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 4) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 5) UNE-41410:2008 (ver Tabla 6)	SI SI SI
Resistencia mecánica a la compresión	37.6581 kg/cm <sup>2</sup>	NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 7) NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 8) NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 9) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 10) UNE-41410:2008 (ver Tabla 11)	Uso estructural: <b>NO</b> Uso no estructural: <b>SI</b> Baja Resistencia: <b>SI</b> Piezas fabricadas a mano: <b>SI</b> Resistencia baja: <b>SI</b>
Absorción de agua	Absorción inicial 16.53 g/min. Absorción total 24h 21.31%	NMX-C-404-ONNCCE-2012 inicial y 24h (ver Tabla 12) NMX-C-441-ONNCCE-2013 24h (ver Tabla 13)	Inicial <b>NO</b> , 24h <b>SI</b> <b>SI</b>
Erosión acelerada	4 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 14) UNE-41410:2008 (ver Tabla 14)	SI SI

### 5.2 Procesados con mufla de laboratorio

Debido a la limitante del tamaño de la mufla se decidió cortar las muestras para poder meter más unidades en la misma tanda. En las Figuras 82 y 83 puede verse el antes y el después del proceso en la mufla.



**Figura 82: Muestras antes de iniciar el proceso en la mufla**  
Fuente: Imagen propia



*Figura 83: Muestras después de finalizar el proceso en la mufla*  
*Fuente: Imagen propia*

Con las piezas procesadas en la mufla también se realizaron todos los ensayos, en la Figura 84 se puede ver la prueba de absorción inicial.



*Figura 84: Ensayo de absorción inicial*  
*Fuente: Imagen propia*

Los resultados de los ensayos a piezas procesadas con mufla de laboratorio están asentados en la Tabla 28.

**Tabla 28: Ladrillos hechos de mezcla 2 procesados con la mufla de laboratorio, cumplimiento con normas**

Mezcla 2 Mufla Ensayos:	Resultados promedio de ensayos	Resultado comparado con lo propuesto en la norma	Está o no, dentro del rango aceptado por la norma
Dimensiones	largo 26 cm., ancho 12 cm., altura 6 cm.	NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 1) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 2) NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 3)	SI SI SI
Despostilladuras	Menores a 5 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 4) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 5) UNE-41410:2008 (ver Tabla 6)	SI SI SI
Resistencia mecánica a la compresión	62.0926 kg/cm <sup>2</sup> .	NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 7) NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 8) NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 9) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 10) UNE-41410:2008 (ver Tabla 11)	Uso estructural: <b>NO</b> Uso no estructural: <b>SI</b> Baja Resistencia: <b>SI</b> Piezas fabricadas a mano: <b>SI</b> Resistencia media: <b>SI</b>
Absorción de agua	Absorción inicial 40.13 g/min. Absorción total 24h 18.36%	NMX-C-404-ONNCCE-2012 inicial y 24h (ver Tabla 12) NMX-C-441-ONNCCE-2013 24h (ver Tabla 13)	Inicial <b>NO</b> , 24h <b>SI</b> <b>SI</b>
Erosión acelerada	2 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 14) UNE-41410:2008 (ver Tabla 14)	SI SI

Ladrillos elaborados de mezcla 4 procesados con la mufla de laboratorio se volvieron quebradizos por lo que ya no se les realizaron ensayos de laboratorio. En la Figura 85 se aprecian ladrillos con cal bastante quebradizos.



*Figura 85: Muestras de mezcla 4 procesadas en mufla de laboratorio  
Fuente: Imagen propia*

### *5.3 Procesados con horno tradicional de combustión*

Se procesaron piezas en un horno tradicional incorporando las muestras junto a una tanda comercial como puede verse en las Figura 86 y 87.



*Figura 86: Horno que combustiona aceite de motor usado  
Fuente: Imagen propia*



*Figura 87: Emisiones durante el proceso de cocido  
Fuente: Imagen propia*

Todos los ladrillos fueron sometidos a las demás pruebas de laboratorio, en la Figura 88 se muestra la realización de los ensayos de erosión que consiste en dejar caer un flujo continuo de agua durante 10 minutos y revisar cuanto penetró el agua al ladrillo.

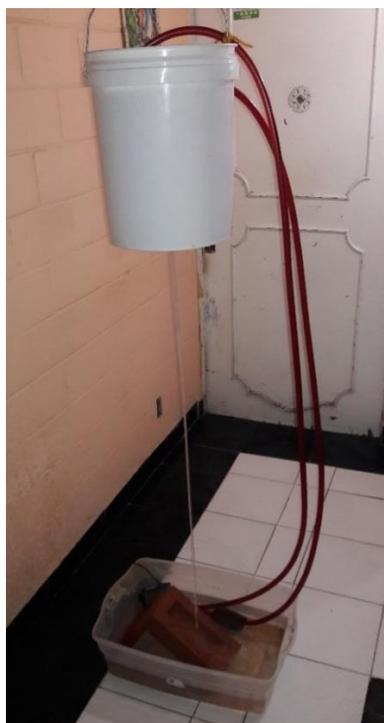


Figura 88: Prueba de erosión acelerada conforme a la NMX-C-508-ONNCCE-2015 y la UNE 41410:2008  
Fuente: Imagen propia

Los resultados de los ensayos a piezas procesadas con un horno convencional están asentados en la tabla 29.

Tabla 29: Ladrillos hechos de mezcla 2 procesados en un horno tradicional, cumplimiento con normas

Mezcla 2 Horno tradicional Ensayos:	Resultados promedio de ensayos	Resultado comparado con lo propuesto en la norma	Está o no, dentro del rango aceptado por la norma
Dimensiones	largo 26 cm., ancho 12 cm., altura 6cm.	NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 1) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 2) NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 3)	SI SI SI
Despostilladuras	Menores a 5 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 4) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 5) UNE-41410:2008 (ver Tabla 6)	SI SI SI
Resistencia mecánica a la compresión	145.1477 kg/cm. <sup>2</sup> .	NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 7) NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 8) NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 9) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 10) UNE-41410:2008 (ver Tabla 11)	Uso estructural: <b>SI</b> Uso no estructural: <b>SI</b> Baja Resistencia: <b>SI</b> Piezas fabricadas a mano: <b>SI</b> Resistencia alta: <b>SI</b>
Absorción de agua	Absorción inicial 17.59 g/min. Absorción total 24h 16.56%	NMX-C-404-ONNCCE-2012 inicial y 24h (ver Tabla 12) NMX-C-441-ONNCCE-2013 24h (ver Tabla 13)	Inicial <b>SI</b> , 24h <b>SI</b> SI
Erosión acelerada	3 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 14) UNE-41410:2008 (ver Tabla 14)	SI SI

Ladrillos hechos de mezcla 4 procesados con un horno tradicional, se volvieron muy frágiles.

## 5.4 Ensayos a piezas comerciales

Además de los ensayos a ladrillos fabricados con mezclas propias, se optó por ensayar piezas comerciales para comparar resultados con piezas que se encuentran disponibles en el mercado. Estos ensayos fueron aplicados a piezas procesadas en horno tradicional Tabla 30 y piezas secadas al aire libre Tabla 31.

**Tabla 30: Comparativa de resultados de piezas elaboradas con mezcla comercial procesada en horno convencional**

Mezcla comercial Horno tradicional Ensayos:	Resultados promedio de ensayos	Resultado comparado con lo propuesto en la norma	Está o no, dentro del rango aceptado por la norma
Dimensiones	largo 27.8 cm., ancho 13.5 cm., altura 7 cm.	NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 1) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 2) NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 3)	SI SI SI
Despostilladuras	menores a 5 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 4) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 5) UNE-41410:2008 (ver Tabla 6)	SI SI SI
Resistencia mecánica a la compresión	87.04 kg/cm. <sup>2</sup> .	NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 7) NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 8) NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 9) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 10) UNE-41410:2008 (ver Tabla 11)	Uso estructural: SI Uso no estructural: SI Baja Resistencia: SI Piezas fabricadas a mano: SI Resistencia alta: SI
Absorción de agua	Absorción inicial 32.24 g/min. Absorción total 24h 19.27%	NMX-C-404-ONNCCE-2012 inicial y 24h (ver Tabla 12) NMX-C-441-ONNCCE-2013 24h (ver Tabla 13)	Inicial NO, 24h NO SI
Erosión acelerada	3 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 14) UNE-41410:2008 (ver Tabla 14)	SI SI

**Tabla 31: Comparativa de resultados de piezas elaboradas con mezcla comercial procesada a la sombra**

Mezcla comercial A la sombra Ensayos:	Resultados promedio de ensayos	Resultado comparado con lo propuesto en la norma	Está o no, dentro del rango aceptado por la norma
Dimensiones	largo 23.3 cm., ancho 12 cm., altura 5.5 cm.	NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 1) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 2) NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 3)	SI SI SI
Despostilladuras	Menores a 5 mm.	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 4) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 5) UNE-41410:2008 (ver Tabla 6)	SI SI SI
Resistencia mecánica a la compresión	51.59 kg/cm. <sup>2</sup>	NMX-C-404-ONNCCE-2012 (ver Tabla 7) NMX-C-441-ONNCCE-2013 (ver Tabla 8) NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 9) N-CMT-2-01-001/02 (ver Tabla 10) UNE-41410:2008 (ver Tabla 11)	Uso estructural: NO Uso no estructural: SI Baja Resistencia: SI Piezas fabricadas a mano: SI Resistencia alta: SI
Absorción de agua	- -	NMX-C-404-ONNCCE-2012 inicial y 24h (ver Tabla 12) NMX-C-441-ONNCCE-2013 24h (ver Tabla 13)	NO NO
Erosión acelerada	-	NMX-C-508-ONNCCE-2015 (ver Tabla 14) UNE-41410:2008 (ver Tabla 14)	NO NO

De acuerdo a los resultados obtenidos en las comparativas, los ladrillos que mejor desempeño obtuvieron fueron los elaborados con mezcla 2 procesados con horno convencional.

Con las piezas elaboradas con mezcla 2 procesada con el desecador solar y la mezcla comercial secada a la sombra no fue posible concluir los ensayos de absorción ni de erosión debido a que se disgregaron durante las pruebas.

Las piezas con cal que tuvieron mejor desempeño son las que no entraron en proceso con alta temperatura.

### 5.5 Comparativo de resultados

Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia, pruebas de absorción y pruebas de erosión se acomodaron en gráficos para poder visualizarlos y compararlos fácilmente. En la Figura 89 se observa el gráfico que compara los resultados de los ensayos de compresión con los parámetros indicados en normas. En el gráfico se observa que solo dos tipos de ladrillos cumplen con la resistencia estructural: la mezcla 2 procesada con horno de combustión y la mezcla comercial cocida en el mismo horno de combustión, los demás ladrillos no alcanzan la resistencia para uso estructural, pero pueden ser implementados en uso no estructural.

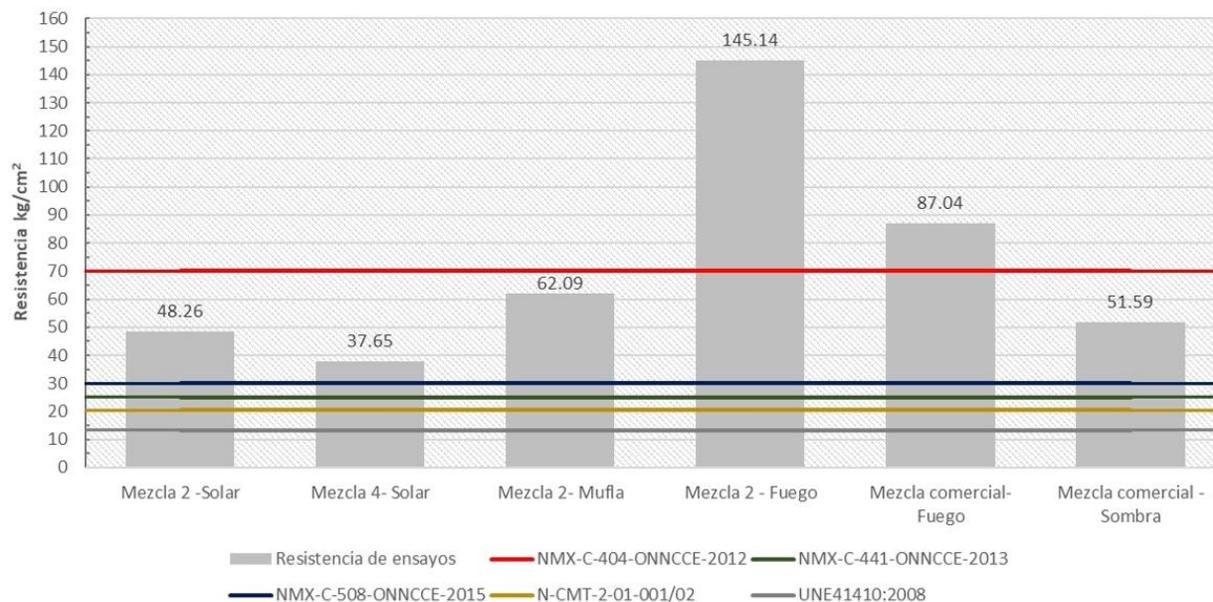


Figura 89: Comparativo de resultados en ensayos de compresión  
Fuente: Elaboración propia

La figura 90 muestra una comparativa de resistencias de ecoladrillos vistas en otras investigaciones, todas las mezclas tienen arcilla como base.

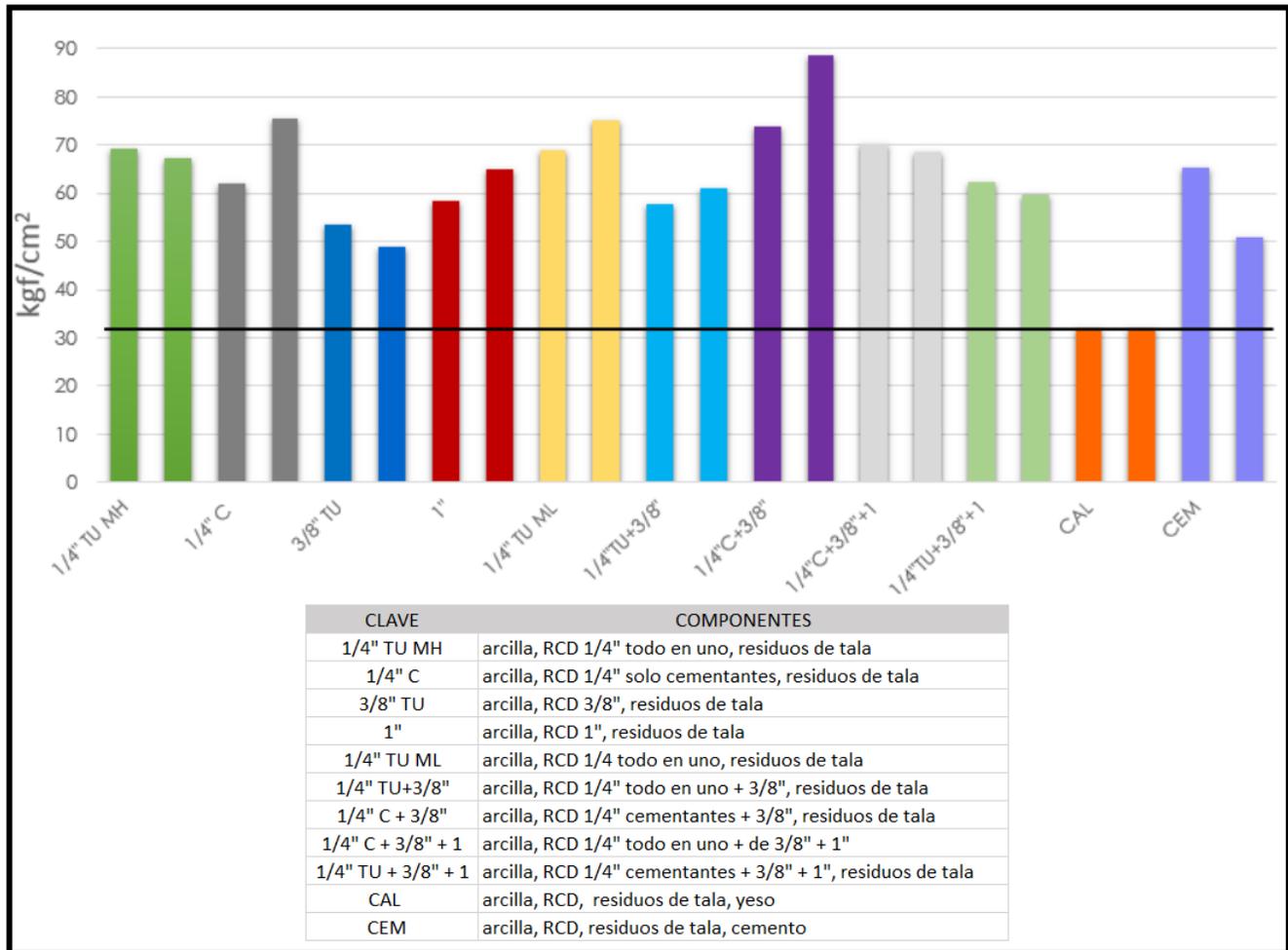
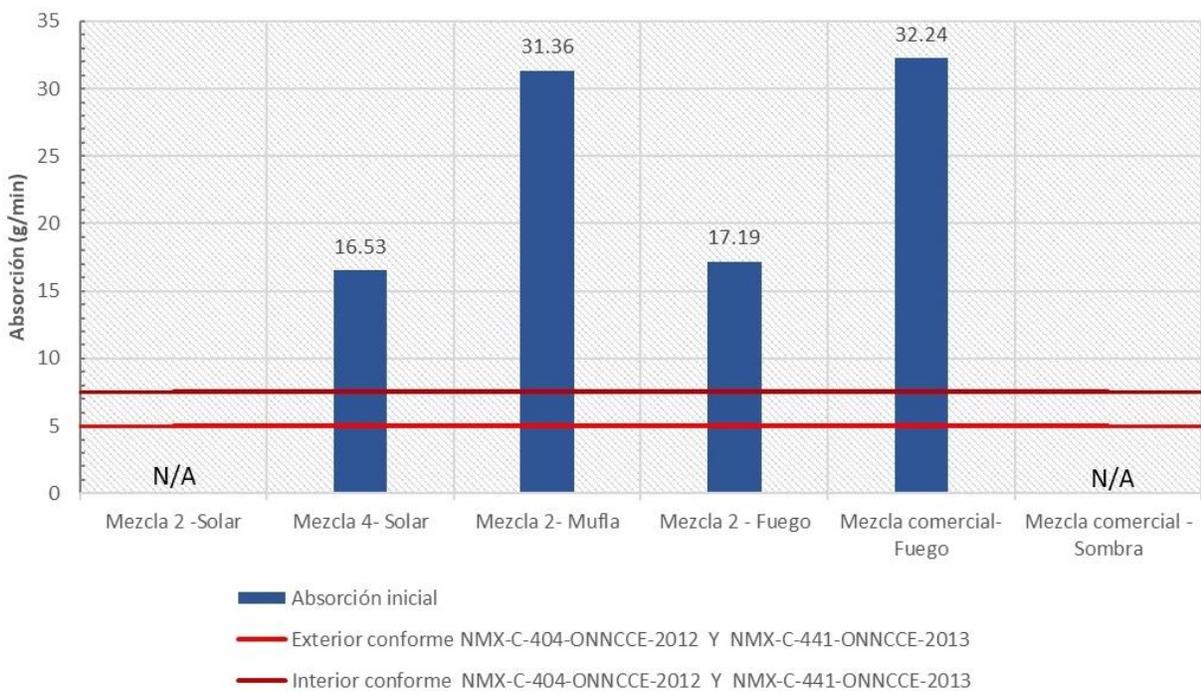


Figura 90: Resistencia de diferentes tipos de ecoladrillos  
Fuente: Maldonado, 2014

Los ladrillos fabricados con arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales mostraron resistencias promedio de 47.19 kg/cm<sup>2</sup> conforme a lo reportado por García (2013).

Observando las Figuras 89 y 90 y la mezcla que incorpora residuos de PTAR es posible comparar las resistencias de diferentes ecoladrillos, se aprecia que la mayoría rebasa los 32 kg/cm<sup>2</sup> por lo que están dentro del rango aceptado por la NMX-C-441-ONNCCE-2013 que aplica para ladrillos de uso no estructural.

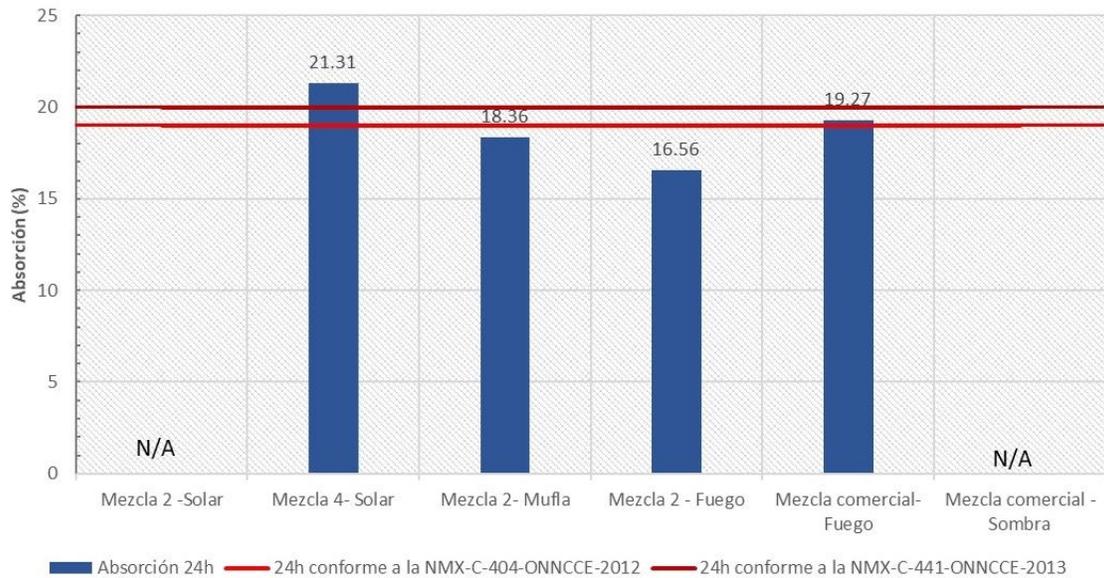
En las Figuras 91 y 92 se observan gráficos en donde se comparan los resultados de los ensayos de absorción inicial y a 24h. En estos gráficos rebasar las líneas límite indica que están fuera de los rangos aceptados en normas. En el gráfico de la Figura 91 se puede ver que los ladrillos elaborados con mezcla 2 procesados con el desecador solar y los ladrillos comerciales secados a la sombra no aplican en esta prueba puesto que se empiezan a deshacer muy rápido y que todos los ladrillos rebasan los parámetros para el ensayo de absorción inicial.



*Figura 91: Comparativo de resultados de ensayos de absorción inicial  
Fuente: Elaboración propia*

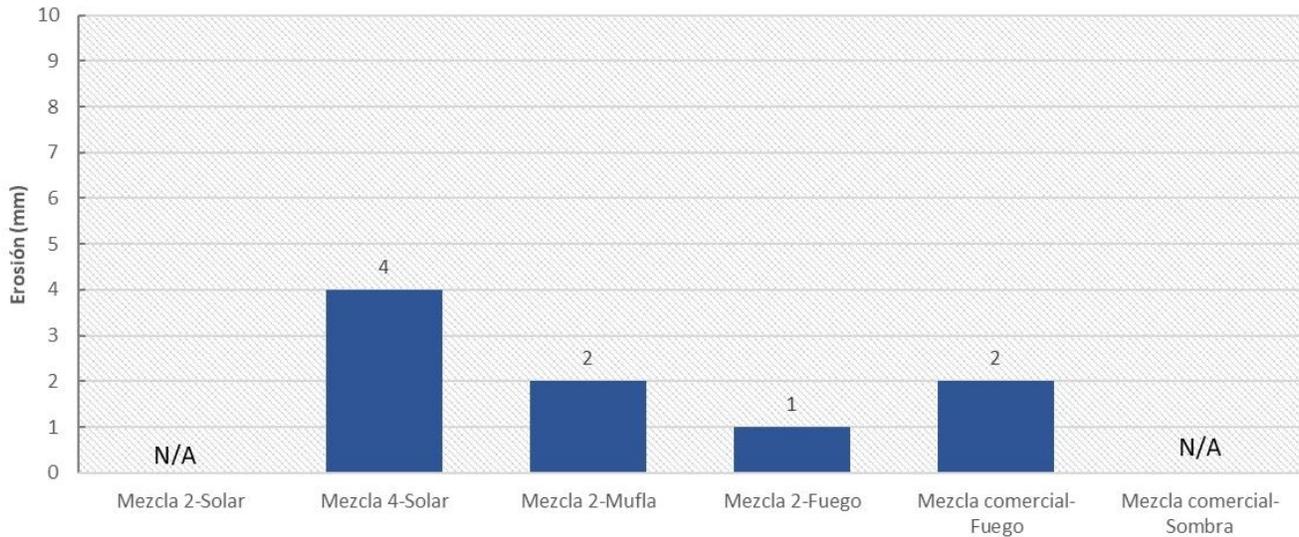
En la Figura 92 se puede ver que los ladrillos elaborados con mezcla 2 procesados con el desecador solar y los ladrillos comerciales secados a la sombra no aplican en esta prueba puesto que se empiezan a deshacer muy rápido, y que los ladrillos con mezcla 2 procesados con mufla y con horno de combustión tradicional si están dentro de rangos aceptados en norma; los ladrillos hechos con mezcla 4 rebasan un poco los límites y la mezcla comercial procesada

en horno tradicional cumple con lo propuesto en la NMX-C-441-ONNCCE-2013 y por poco queda fuera con lo propuesto en la NMX404-ONNCCE-2012.



*Figura 92: Comparativo de resultados de ensayos de absorción a 24 horas  
Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 93 puede observarse el gráfico con la comparativa de los datos de los ensayos de erosión acelerada. En este ensayo los ladrillos fabricados con mezcla 2 procesados con el desecador solar y los ladrillos con mezcla comercial secados a la sombra se desintegraron mucho y muy rápido por lo que no aplicaron en este ensayo, pero los demás ladrillos están debajo del límite indicado en la normatividad que es de 10 mm., por lo que se consideró que pasaron la prueba.



*Figura 93: Comparativo de resultados de ensayos de erosión acelerada  
Fuente: Elaboración propia*

### **5.6 Análisis cualitativo para la factibilidad**

Debido a que no se encontraron pruebas para piezas procesadas con un desecador solar se procedió a hacer un análisis cualitativo para determinar la factibilidad de este proyecto. El análisis puede observarse en la Tablas 32, 33, 34.

Tabla 32: Factibilidad técnica

Factibilidad técnica			
	Horno ladrillero tradicional	Desecador Solar	Mufla laboratorio
Complejidad del mantenimiento.	Sencillo, cada tanda se construye y demuele parcialmente con los mismos materiales	Sencillo, sus componentes se pueden sustituir con RCD	Complejo, si se dañan sus componentes son de costos elevados
Frecuencia del mantenimiento.	Se construye y se demuele parcialmente cada vez que se utiliza	Moderado y económico, hay que protegerlo de la humedad y mantener su vidrio y espejos limpios y sin rayas	Periódicamente, son equipos costosos, es un elemento que está constituido por componentes eléctricos y electrónicos
Acceso a refacciones.	Muy accesible, requiere poca instrumentación y el horno se construye con material de tandas pasadas. Pero podría requerir equipo extra como quemadores.	Accesible, se construye con materiales RCD.	Este tipo de instrumentos requieren refacciones específicas. Por lo que es complicado conseguirlas.
Insumos para su operación.	Material combustible como leña, aceite usado, o basura, según el combustible puede requerir agua.	Energía solar (renovable).	Requiere un alto gasto de electricidad.
Operación nocturna.	Puede operar a cualquier hora.	Su horario de operación está pensado durante las horas de sol.	Puede operar a cualquier hora.
Operación con lluvia.	Puede operar en temporada de lluvia.	No puede operar bajo la lluvia.	Puede operar en temporada de lluvia.
Tiempo de enfriamiento.	5 días a partir de que termina el cocido.	Se puede manipular el mismo día que terminan los días de cocido.	1 día después de terminar el proceso de cocido.
Espacio de operación.	Se colocan tandas mayores a 20000 ladrillos en áreas pequeñas.	Se requiere un área grande para las superficies reflejantes.	Las muflas de eléctricas tienen cámaras de muy poco volumen.

#### Factibilidad técnica:

El uso de energía solar podría requerir un espacio más grande en comparación con las otras alternativas.

El desecador solar no puede operar en días lluviosos, o en horario nocturno, lo que podría ser un problema en temporada de lluvias.

Tiene la ventaja de que no requiere combustibles para su operación.

Respecto al mantenimiento el desecador solar se debe limpiar frecuentemente ya que es propenso a reducir su eficiencia con el polvo, la mufla requiere estar sujeto a un plan de mantenimiento cada dos años según el fabricante, el horno convencional requiere un mantenimiento poco frecuente.

**Tabla 33: Factibilidad económica**

Factibilidad económica			
	Horno ladrillero tradicional	Desecador Solar	Mufla laboratorio
Costo por insumos de operación.	Se utilizan combustibles como leña, basura o aceite usado que representan un costo económico.	La energía solar es gratuita.	Tiene un alto consumo de energía eléctrica que representa un costo económico.
Costo de materiales de fabricación.	El horno resulta económico pues está fabricado de acilla y tierra cocida.	Resulta económico, los materiales pueden ser encontrados como RCD.	Las muflas pueden valer desde 2500 dólares a más de 4000 dólares.

Factibilidad económica:

Para su operación el desecador solar no requiere gasto económico para insumos en comparación con el horno convencional o la mufla. Además, los costos para su fabricación son bajos puesto que está fabricado con RCD, Los costos de fabricación más bajos se presentan en los hornos convencionales simples. Por lo que puede ser buena alternativa a la combustión tradicional.

**Tabla 34: Factibilidad ambiental**

Factibilidad ambiental			
	Horno ladrillero tradicional	Desecador Solar	Mufla laboratorio
Emissiones de GEI.	Se producen diferentes compuestos CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> , HC, CH <sub>4</sub> , compuestos orgánicos volátiles, N <sub>2</sub> O, dioxinas, entre otros.	No combustiona ningún producto por lo que no genera compuestos contaminantes. Tal vez expulsa un poco de vapor de agua atrapado en la cámara de secado.	No genera emisiones pues no trabaja con combustión, pero la energía eléctrica que consume podría provenir de fuentes contaminantes.
Consumo de agua.	Los hornos que queman aceite utilizan agua para mejorar la alimentación de los quemadores.	No utiliza.	No utiliza
Contaminación de suelo.	Los hornos de combustión de hidrocarburos pueden contaminar el suelo por mal manejo de sus insumos.	No genera contaminación de suelo.	No genera contaminación de suelo.
¿Su operación tiene repercusiones a la salud?	Los operadores y comunidad circundante pueden presentar enfermedades de las vías respiratorias. Además de que los operadores pueden presentar malestares oculares.	No, porque no emite compuestos durante su operación.	No, porque no emite compuestos durante su operación.

Factibilidad ambiental:

El desecador solar presenta más ventajas para el medio ambiente que el horno de combustión y que la mufla, ya que no genera emisiones a la atmósfera durante su operación.

El desecador solar está hecho con materiales de RCD lo cual reintegra materiales de residuo a una cadena productiva, además de que su costo no es tan alto.

## 6. CONCLUSIONES

Cualitativamente se puede concluir que las condiciones reales de operación no fueron adecuadas pues no cumplen con las condiciones mencionadas en la NOM-031-STPS-2011, a pesar de los riesgos que esto implica las ladrilleras siguen operando, son el sustento de familias que se han dedicado a ellas durante generaciones.

Reciclar los residuos de construcción disminuye el impacto ambiental de estos en el medio, ya que más del 50% del ladrillo fue elaborado con residuos de construcción, los cuales sustituyen a la tierra que se extrae de manera desmedida de los distintos bancos de materiales, además los RCD se reintegran a la cadena productiva evitando terminar en tiraderos que provocan diferentes tipos de contaminación.

A pesar de que no se pudo tener temperatura constante ni un clima adecuado para el funcionamiento óptimo del desecador solar, este funciona dando resultados dentro de rangos contemplados en normas para ladrillos de uso no estructural.

Los ladrillos procesados con mufla tuvieron mejor resistencia en comparación con la mezcla comercial que es secada simplemente a la sombra y que es comercializada sin la realización de ensayos de laboratorio.

Con el horno tradicional de combustión se obtuvieron buenos resultados en la mezcla 2 que no incluye cal (residuos de construcción y arcilla), estos resultados muestran mejor resistencia que la mezcla que habitualmente comercializan en algunas ladrilleras tradicionales.

Las mejoras implementadas surgieron a partir de modificaciones en la geometría y materiales empleados en la fabricación del desecador solar, probablemente con algún recubrimiento interior y exterior o el uso de un material distinto en la cámara de secado se podrían tener temperaturas de operación más altas.

El desecador solar a pesar de que no logró una vitrificación de los agregados de los ladrillos, tuvo una reducción de tiempo para el secado de 5 días y no 15 como fue encontrado en la información consultada u 8 días como es que dura en las ladrilleras visitadas.

La cal no es un buen agregado para ladrillos sometidos a altas temperaturas, pero si para elementos secados a la sombra y a sol directo.

La resistencia más alta fue registrada con los ladrillos que incluyen agregados reciclados y arcilla, cocidos en horno convencional, esta resistencia es más alta que la que tienen los ladrillos comerciales.

### *6.1 Conclusiones personales*

Es importante cambiar la perspectiva de construcción tradicional y tener un mercado con más opciones para facilitar la transición al uso de materiales como los ecoladrillos.

La planeación en cualquier ámbito es muy importante, pues nos ayuda a optimizar tiempo y recursos: pero, aunque un plan pretenda ser lo más integro posible no siempre se pueden considerar todas las variables que podrían intervenir.

### *6.2 Perspectivas a futuro*

El presente trabajo da pauta a la profundización de conocimientos en líneas de investigación, por ejemplo:

- Energías renovables en la producción de materiales de construcción.
- Incorporación de materiales residuales en construcción.
- Diseño procesos para fábricas de ecoladrillos.

## 7. RECOMENDACIONES

Para poder aprovechar el potencial de la energía solar, se deben tener algunas consideraciones:

- Las superficies reflejantes y la tapa de la cámara de secado del desecador deben estar limpias, además que deben de ser de un material que refleje bien los rayos del sol.
- Orientar los espejos para reflejar los rayos del sol hacia la cámara de secado ya que a distintas horas el posicionamiento solar respecto a nuestra ubicación cambia.
- Considerando la información obtenida, es necesario ampliar el campo de estudio respecto al horneado de ladrillos con alternativas a la combustión.
- Suede utilizar una nave industrial acondicionada para realizar el proceso aprovechando energía solar.
- Se podría utilizar otro energético como biogás o energía geotérmica.



## 8. REFERENCIAS

- Aguilar, Armando de Jesús. "Fabricación de bloques de ecológicos a base de material producto de la construcción." Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2017, pp. 1, 42, 42
- Aquino, Esperanza. "Reciclaje de residuos de la construcción para la fabricación de ladrillo sustentables." Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2015, pp. 60, 72, 73
- Arroyo, Guadalupe, O. Cabrera, M. Muñoz. "Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del tabique rojo recocido, utilizado en la construcción del municipio de Querétaro." Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural A.C., 2002, pp. 358
- Arzate, José. "Diseño de una máquina moldeadora de arcilla humedecida para la fabricación de ladrillos." Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2014, pp. 17
- ASAE S580 - Testing and Reporting Solar Cooker Performance.
- Coordinadas horarias, visto en:  
<https://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum19/vdm02520ar/vdm02520i08.jpg> Fecha de consulta 8 de febrero 2022.
- Coordinadas horizontales, visto en:  
<https://www.proteccioncivil.es/catalogo/carpeta02/carpeta24/vademecum19/vdm02520ar/vdm02520i06.jpg> Fecha de consulta 8 de febrero 2022.
- Cubas, Walter. "Impacto ambiental de las ladrilleras ubicadas en Santa Bárbara – Cajamarca". Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú, 2014, pp. 1

- Durán, Gabriel A. "Pruebas experimentales a paneles colectores de energía térmica solar". Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2010, pp. 29, 30, 41
- Dosificador de biomasa, visto en:  
<https://www.pmtgi.com.mx/files/productos/565-dba.jpg> Fecha de consulta 8 de febrero 2022.
- EELA. "Determinación de emisiones de gases de efecto invernadero en base en factores de emisión y monitoreos de eficiencia energética en la comunidad ladrillera el Refugio, León Guanajuato" 2011, pp. 13
- EELA. "Caracterización de los hornos usados en la industria ladrillera." 2011, pp. 3, 9
- EELA. "Manual de hornos eficientes en la industria ladrillera" 2015, pp. 31, 43
- Fábrica de ladrillos cerámicos Hispaplano Ceramic Engineering (FHCE). "Memoria Básica." 2012, pp. 3
- Febres, Thanud. "Alternativa de solución a la problemática ambiental producida por las ladrilleras artesanales en Arequipa." Tesis de Maestría. Universidad Nacional de San Agustín, Perú, 2017, pp. 9, 59-60
- García, César et al. "Resistencia mecánica de ladrillos preparados con mezclas de arcilla y lodos provenientes de aguas residuales". Revista Tecnura, abril, 2013/ volumen 17, número 38, pp. 71
- Gómez, Cesar et al. "Estudio exploratorio del impacto ambiental generado por la industria ladrillera del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, México en LACANDONIA, junio, 2011/ volumen 5, número 1, pp. 90

- Gutiérrez, Luis Enrique, Lady Ramírez, Evelyn Ramos. "Propuesta de automatización y modernización de horno para cocido de ladrillo rojo." Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, IPN, México, 2016, pp. 22, 4, 65
- Halanocca, Yessica, Ruth Huaman. "Impacto ambiental generado por el sector ladrillero en el distrito de San Jerónimo – Cusco". Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú, 2015, pp. III
- Hernández, Gabriela. "Estudio de un horno solar." Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2004, pp. XVI, 80
- Horno prototipo de MK:  
[http://2.bp.blogspot.com/\\_cmMx1zS1q8I/ShXaUbBVWvI/AAAAAAAAAAg/SJMAfZvnGas/s1600/IMG\\_3718.JPG](http://2.bp.blogspot.com/_cmMx1zS1q8I/ShXaUbBVWvI/AAAAAAAAAAg/SJMAfZvnGas/s1600/IMG_3718.JPG) Fecha de consulta 8 de febrero 2022.
- Ibarra, Felipe. "Diseño de una máquina semiautomática moldeadora de ladrillo de barro de 5.5×13×24 cm. de dimensiones, con una capacidad de 500 ladrillos por hora, utilizable en la industria ladrillera." Tesis de Licenciatura, Universidad de las Américas Puebla, México, 2004, pp. 24, 27, 26y27
- Indian Standard 13429-1 Solar cooker – Boxtype, Part 1: Requeriments.
- Indian Standard 13429-2 Solar cooker – Boxtype, Part 2: Components.
- Indian Standard 13429-3 Solar cooker – Boxtype, Part 3: Test Method.
- INECC. "Análisis de Mercado del Sector de la Construcción y Proyecto piloto a nivel región basado en un portafolio de políticas públicas con el objetivo de reducir los CCVC de las ladrilleras artesanales en México" 2016, pp. 5, 9
- Karupppasamy, Sathya. "Construction and demolition waste recycling, manufacturing of eco blocks and bricks, solar burning as a replacement for the traditional Kiln burning,

Case study Mexico and India". Brandenburg University of Technology Cottbus-Sachsendorf. Alemania, 2019, pp. 39

- Lira, David. "Manual para montar secador solar". Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2018, pp. 16
- López, José. "Análisis de las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas de los materiales empleados en la elaboración de recobloques." Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2018, pp. 40
- Luján, Marcos, Daniel Guzmán. "Diseño, Construcción y Evaluación de un Horno (MK3) para la Cocción de Ladrillos Artesanales". Universidad Católica Boliviana San Pablo, Bolivia, 2015, pp. 170, 171, 173
- Maldonado, Mayra. "Aprovechamiento de los residuos de Construcción y materia orgánica en la fabricación de ecoladrillos para el parque ecológico Tuzandepetl, Veracruz." Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México. México, 2014, pp. 17-25, 44
- Monteros, Lenin, Carlos Villarreal. "Diseño y construcción de un horno mufla para la realización de tratamientos térmicos en aceros." Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2015
- Morales, Roberto, Rafael Torres, Luis Rengifo, Carlos Irala. "Manual para la construcción de viviendas de adobe". Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 1993, pp. 49
- N-CMT-2-01-001-02 Libro CMT. Características de los materiales, Parte 2. Materiales para estructuras - Título: 01. Materiales para Mamposterías - Capítulo: 001. Ladrillos y Bloques Cerámicos. México.

- NMX-C-036-ONNCCE-2013. Industria de la Construcción – Mampostería – Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines – Método de Ensayo. México.
- NMX-C-037-ONNCCE-2013. Industria de la construcción - Mampostería - Determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo. México.
- NMX-C-038-ONNCCE-2013. Industria de la construcción - Mampostería – Determinación de las dimensiones de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones – Método de ensayo. México.
- NMX-C-404-ONNCCE-2012. Mampostería - Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo. México.
- NMX-C-441-ONNCCE-2013. Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural. México.
- NOM-031-STPS-2011. Condiciones de seguridad y salud en el trabajo. México.
- NMX-C-508-ONNCCE-2015. Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal – Especificaciones y métodos de ensayo. México.
- Quintero, Hugo A. “Reciclaje de residuos celulósicos para elaborar materiales de construcción.” Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México 2019, pp. 35
- Pérez, Isabel. 2015. Ecoladrillos, efectivos, baratos y ambientalmente viables. DGDC-UNAM. Publicación en línea:  
[http://ciencia.unam.mx/leer/495/Ecoladrillos\\_efectivos\\_baratos\\_y\\_ambientalmente\\_viables](http://ciencia.unam.mx/leer/495/Ecoladrillos_efectivos_baratos_y_ambientalmente_viables)  
 Fecha de consulta 8 de febrero 2022.

- Radiación solar global horizontal y directa normal en México. Publicación en línea: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/mexico> Fecha de consulta 8 de febrero 2022.
- Ramírez, Lenin. "Los colectores solares en México" Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2009, pp. 21, 28, 3
- Ramos, G. "Design of semi-static solar concentrator for charcoal production." 2013 ISES Solar Word Congress, 2014, pp. 2167
- Rojas, María, Armando Aguilar, Denise Fernández. "Manufacture of Reconstruction-Bricks in Mexico", AIP Conference Proceedings, 2017, pp. 020002-2, 020002-3
- Rojas, María y Esperanza Aquino. "Fabricación de ladrillos ecológicos." IC Ingeniería Civil, noviembre-diciembre 2015, CICM, pp. 17
- Romero, Laura. "Gaceta UNAM 15 de agosto 2016" Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2016, pp. 7
- Romo, María de Lourdes et al. 2004. "Estudio urbano-ambiental de las ladrilleras en el municipio de Juárez, Estudios Fronterizos, vol. 5, núm. 9". Universidad Autónoma de Baja California. México, pp. 23
- Roque, Reyna. "Revista El Hornero Número 02" EELA, Bolivia. 2014, pp. 8
- Sánchez, Oscar. "Emisiones derivadas de la producción de ladrillos en el Estado de México." Tesis de Maestría, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional. México, 2009, pp.55

- Sántis, José. "Actividad artesanal y sustentabilidad. El caso de las ladrilleras de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas." Tesis de Licenciatura, Universidad Intercultural de Chiapas, México, 2013, pp. 75
- Tippens, Paul. "Física, Conceptos y Aplicaciones, Séptima edición revisada en español", Mc Graw Hill, Ciudad de México, 2011, pp. 376
- UNE 41410:2008. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y método de ensayo. España.
- Varela, Luana. "Solar bricks for lunar construction." Construction and Buildings Materials, Estados Unidos de América, 2017, pp. 243
- Villeda, Gabriel. "Horno solar de alta temperatura para el cocimiento de tabiques de arcilla" Tesis de Doctorado, Instituto Politécnico Nacional. México, 2010, pp. XXXV, 43
- Vivanco, Karla. "Contaminación por ladrilleras en Papantla de Olarte Veracruz" Tesina de Licenciatura, Universidad Veracruzana. México, 2011, pp. 42, 37