

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Secretaría Académica, de Investigación e Innovación
Dirección de Posgrado, Investigación e Innovación

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Mecánica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Diseño de un Sistema de Captación Solar de Mediana Temperatura
para Calentamiento en la Industria**

presentada por
Ing. Raúl Alonso Barrera Ayar

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Director de tesis
Dr. José Jassón Flores Prieto

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero de 2017.

"30 Aniversario del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico"

Cuernavaca, Mor., 23/enero/2017

OFICIO No. DIM/013/2017
Asunto: Aceptación de documento de tesis

C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

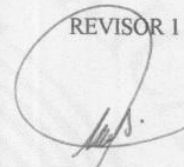
Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Raúl Alonso Barrera Ayar, con número de control M14CE041, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Diseño de un sistema de captación solar de mediana temperatura para calentamiento en la industria" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



DR. JOSÉ JASSÓN FLORES PRIETO
Doctor en Ingeniería
4355408

REVISOR 1



DR. JESÚS ARCE LANDA
Doctor en Ingeniería
6170951

REVISOR 2



DRA. SARA LILIA MOYA ACOSTA
Doctora en Ing. Mecánica (Teórica y Aplicada)
2067214

REVISOR 3



DR. EFRAÍN SIMÁ MOO
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
6601954

C.p. Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

Iniciales AAP/mrsr

S.E.P. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
RECIBIDO
23 ENE 2017
CmaBm
SERVICIOS ESCOLARES

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

"30 Aniversario del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico"

Cuernavaca, Mor. 25 de enero de 2017
OFICIO No. SAC/096/2017

Asunto: Autorización de impresión de tesis

**ING. RAÚL ALONSO BARRERA AYAR
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Diseño de un sistema de captación solar de mediana temperatura para calentamiento en la industria"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

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

ATENTAMENTE

"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO"

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



S.E.P. - TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
DIRECCIÓN

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Mor.
Tels. (01) 777 362-77-70 Ext. 4106, e-mail: direccion@cenidet.edu.mx
www.cenidet.edu.mx



Dedicatorias

A toda mi familia, quienes sin su apoyo no hubiese podido lograr esta meta en mi vida. Gracias por todas sus enseñanzas que siempre van encaminadas en hacerme un buen hombre.

A mi madre **Rosa Miriam**, quien desde el momento en que me tuvo en sus brazos siempre ha tenido fe en mí, me apoya incondicionalmente para lograr mis metas y siempre me tiene en sus oraciones.

A mi padre **Miguel Ángel**, por apoyarme y aconsejarme para que sea un hombre de bien, por quererme como un hijo. El camino no ha sido fácil, pero aquí estamos y estoy feliz por ello.

A mis hermanos, **Miguel "Güero"** y **Miriam "Jaqui"**, gran parte de mis logros y metas son para que se sientan orgullosos de mí, ser un buen ejemplo para ustedes... sepan que siempre contarán conmigo.

A mi abuela **María Antonieta**, ¡gracias por todo! No me bastaría la vida para compensar todo el amor que me hiciste sentir. Quisiera poder verte una vez más, estuve a punto de dejarme caer pero tu recuerdo me hizo seguir adelante y querer terminar esta meta... misión cumplida, abuelita!

Para ustedes es este trabajo, los amo inmensamente.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios por darme la fuerza y sobre todo, el tiempo que me ha permitido hasta hoy en día estar en esta vida.

A mi familia, en serio no hubiese podido lograr esto sin su apoyo y los sacrificios que tuvieron que hacer para darme una educación. Solo me queda ser agradecido y hacer que se sientan orgullosos de mí, prometo no decepcionarlos.

Al Dr. José Jassón Flores Prieto por nunca dejar de confiar en mí y en mis capacidades para poder llevar a cabo este proyecto. Gracias por sus palabras, por las enseñanzas, la amistad, y hacer que hasta yo mismo me convenciera de que tengo con que para lograr este objetivo y las cosas que quiero en la vida... ¡muchas gracias Doc!

A mi comité revisor, Dra. Sara Lilia Moya Acosta, Dr. Efraín Sima Moo y Dr. Jesús Arce Landa, gracias por sus comentarios y críticas para mejorar la calidad de mi trabajo, y por el apoyo durante mi estancia en la institución.

A mis compañeros y amigos del área de mecánica, por todos los buenos momentos, las buenas reuniones y ser parte de esta etapa en mi vida. A todos los amigos del "Lab solar", a los que he visto pasar y he visto llegar, gracias por su amistad, los convivios y experiencias vividas a lo largo de mi estancia en la maestría.

A toda la comunidad que integra al Departamento de Ingeniería Mecánica, por su apoyo y ayuda a lo largo de mi estancia en la institución, desde el día de la bienvenida hasta los días de los trámites necesarios para la culminación de esta etapa en mi vida. A todos los profesores que con sus enseñanzas contribuyeron a mi desarrollo académico.

A todos mis amigos y mi novia, que desde Chiapas me apoyaban y motivaban para cumplir con esta etapa de mi vida, ustedes que creyeron en mí desde el día que partí de la ciudad, esa ciudad donde hemos vivido grandes cosas.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la oportunidad de poder continuar con mi formación académica.

No me alcanzan las palabras, para agradecer a cada una de las personas que forman parte de mi vida y me motivan a seguir adelante, así que solo me resta decirles: **QUE LA FUERZA LOS ACOMPAÑE y ¡GRACIAS, TOTALES!**

Índice.

	Pág.
Lista de Figuras.	i
Lista de tablas.	iii
Nomenclatura.	iv
Resumen.	vii
Abstract.	viii

	Pág.
CAPITULO 1. Introducción.	1
1.1 Generalidades.	2
1.2 Revisión bibliográfica.	4
1.2.1 Metodología para integración de sistemas.	4
1.2.2 Herramientas de simulación de sistemas de captación solar.	6
1.2.3 Aplicaciones de sistemas de captación solar.	10
1.2.4 Normas y procedimientos de evaluación.	14
1.2.5 Potencial industrial en México.	15
1.2.6 Conclusiones de la revisión bibliográfica.	15
1.3 Objetivos y alcances.	17
1.4 Escritura de la tesis.	18
CAPITULO 2. Modelo físico del sistema y modelo matemático de sus componentes.	19
2.1 Fundamentos teóricos.	20
2.1.1 Mecanismos de transferencia de calor.	20
2.1.2 Sistema de captación solar.	23
2.2 Condiciones climáticas y capacidad industrial en las zonas de estudio.	27
2.2.1 Condiciones climáticas.	27
2.2.2 Capacidad industrial en México.	33
2.2.3 Requerimientos de la industria.	35
2.3 Modelo físico.	37

2.4 Sistema de calentamiento solar de agua de referencia.	39
2.5 Modelo matemático.	40
2.5.1 Colectores solares.	40
2.5.2 Intercambiadores de calor	44
2.5.3 Termotanque estratificado.	48
2.5.4 Calentador eléctrico auxiliar.	50
2.5.5 Razón de volumen y Fracción Solar	52
CAPITULO 3. Solución del modelo matemático.	55
3.1 Estrategia de diseño.	56
3.2 Descripción del funcionamiento del simulador.	58
3.3 Simulación del sistema de referencia.	58
3.3.1 Verificación del simulador.	65
3.3.2 Balance de energía.	65
3.3.3 Verificación con datos de referencia.	67
CAPITULO 4. Resultados.	68
4.1 Potencial en México con el sistema de referencia.	69
4.2 Optimización de razón de flujo.	70
4.3 Potencial en México con el sistema optimizado en razón de flujo.	74
4.4 Discusión de los sistemas propuestos.	78
CAPITULO 5. Conclusiones y recomendaciones.	80
5.1 Conclusiones.	81
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros	83
Bibliografía.	84

Lista de Figuras

Figura	Descripción	Página
2.1	Mapa de la República Mexicana con la ubicación de las ciudades de estudio.	28
2.2	Radiación anual sobre una superficie inclinada en las ciudades de estudio.	29
2.3	Comparativa de la radiación anual en las ciudades de estudio.	32
2.4	Mapa de insolación en las ciudades de estudio.	33
2.5	Distribución geográfica del valor agregado de la manufactura en México (1980).	34
2.6	Sistema de generación de vapor con un calentador convencional.	37
2.7	Modelo físico.	38
2.8	Sistema de referencia del sistema de calentamiento solar en estudio.	39
2.9	Balance de energía en el colector solar.	41
2.10	Temperaturas de entradas y salidas en el intercambiador de calor.	44
2.11	Esquema de funcionamiento de un intercambiador de calor.	45
2.12	Temperaturas de entradas y salidas en el termotanque.	48
2.13	Balance de energía en un nodo del termotanque estratificado.	50
2.14	Temperaturas y flujos de calor en las entradas y salidas en un calentador auxiliar eléctrico.	51
3.1	Diagrama de flujo de la estrategia utilizada en el diseño del sistema de captación solar.	57
3.2	<i>Types</i> de los elementos principales del sistema en TRNSYS.	59
3.3	Circuitos del sistema de referencia en TRNSYS.	59
3.4	<i>Type15-2</i> ligado al <i>Type71</i> .	60
3.5	<i>Type14</i> del perfil de carga en el circuito del proceso.	60

3.6	Configuración del sistema de referencia en el software TRNSYS.	61
3.7	Perfil de carga considerando control On-Off en pasos de tiempo pre-seleccionados.	64
3.8	Fracción solar mensual del sistema de referencia en la ciudad de Graz.	64
3.9	Balance energético en el colector, intercambiador de calor y termotanque.	66
3.10	Comparativa entre la simulación realizada y los datos de referencia.	67
4.1	Fracción solar anual del sistema de referencia en las ciudades de estudio.	70
4.2	Fracción solar anual respecto a la Razón de flujo y de una Razón volumétrica de 10.	71
4.3	Fracción solar anual respecto a la Razón de flujo y de una Razón volumétrica de 20.	72
4.4	Fracción solar anual respecto a la Razón de flujo y de una Razón volumétrica de 50.	73
4.5	Tabla gráfica de diseño del sistema de captación solar para la Ciudad de México.	75
4.6	Tabla gráfica de diseño del sistema de captación solar para Toluca, Estado de México.	76
4.7	Tabla gráfica de diseño del sistema de captación solar para Monterrey, Nuevo León.	77
4.8	Comparativa de él sistema propuesto en las tres ciudades estudiadas.	78

Lista de Tabla

Tabla	Descripción	Página
2.1	Condiciones climáticas en ciudades representativas de la Republica.	28
2.2	Sectores y procesos industriales con mayor potencial para aplicaciones solares térmicas.	35
2.3	Requerimientos de calor de procesos en la industria.	36
3.1	Componentes empleados en el sistema de referencia.	62
3.2	Características del colector.	63
3.3	Calores específicos de los fluidos de trabajo.	63
3.4	Características de las bombas hidráulicas.	63
4.1	Valores anuales de la energía útil y la fracción solar.	69
4.2	Dimensionamiento del área de colección y tanque de almacenamiento.	79

Nomenclatura

Variable	Descripción	Unidades
ΔT_m	Diferencia de temperaturas media.	K
a_0	Coeficiente de ganancias.	Adimensional
a_1	Coeficiente de pérdidas.	$W/m^2 \cdot K$
a_2	Factor de corrección.	$W/m^2 \cdot K^2$
A_S	Área de la superficie.	m^2
A_c	Área de colección.	m^2
C	Capacidad térmica.	J/K
C_p	Calor específico constante del fluido de trabajo.	$kJ/kg \cdot K$
F_R	Factor de remoción de calor.	Adimensional
$F_R U_L$	Coeficiente de pérdidas térmicas.	$kJ/h \cdot K$
FS	Fracción solar.	Adimensional
G_A	Cantidad de energía aportada por radiación solar.	kJ/h
h	Coeficiente de transferencia de calor.	$W/m^2 \cdot K$
k	Conductividad térmica.	$W/m \cdot K$
\dot{m}	Flujo másico.	kg/h
N	Numero de segmentos de volumen.	Adimensional
q	Flujo de calor.	kJ/h
q''	Flujo de calor por unidad de área.	W/m^2
Q_c	Calor total del lado frio.	kJ/h
Q_{col}	Calor que proporciona el colector.	kJ/h
Q_{ext}	Calor exterior en el calentador auxiliar	kJ/h
Q_{fluido}	Calor en el fluido.	kJ/h
Q_h	Calor total del lado caliente.	kJ/h
Q_H	Energía aportada por el calentador auxiliar.	kJ/h
Q_{HX}	Energía que aporta el sistema obtenida a través de la tecnología solar.	kJ/h
$\dot{Q}_{m\acute{a}x}$	Calor máximo que puede aportar el calentador.	kJ/h

Q_{per}	Calor de pérdidas al ambiente.	kJ/h
\dot{Q}_{rad}	Razón de transferencia de calor por radiación.	W
\dot{Q}_s	Calor total presente en todo el termotanque.	kJ/h
Q_u	Cantidad de calor ganado útil.	kJ/h
Q_L	Calor perdido a los alrededores.	kJ/h
RU	Razón de uso.	$l/m^2\text{-día}$
R_v	Razón volumétrica.	$l/m^2\text{-año}$
R_f	Razón de flujo.	$Kg/h\text{-}m^2$
T	Temperatura media del fluido.	$^{\circ}C$
T_{∞}	Temperatura del fluido.	$^{\circ}C$
T_a	Temperatura ambiente.	$^{\circ}C$
T_{alred}	Temperatura de los alrededores.	$^{\circ}C$
T_{des}	Temperatura deseada.	$^{\circ}C$
T_{ent}	Temperatura de entrada.	$^{\circ}C$
T_{in}	Temperatura de entrada al calentador	$^{\circ}C$
T_{max}	Temperatura máxima.	$^{\circ}C$
T_{med}	Temperatura media.	$^{\circ}C$
T_{min}	Temperatura mínima.	$^{\circ}C$
T_{prom}	Temperatura promedio.	$^{\circ}C$
T_s	Temperatura de la superficie.	$^{\circ}C$
T_s	Temperatura de trabajo deseada en el termotanque.	$^{\circ}C$
T_{sal}	Temperatura de salida.	$^{\circ}C$
V_{prom}	Velocidad promedio.	m/s
V_t	Volumen del tanque.	m^3
UA	Coeficiente global de transferencia de calor.	$J/s\cdot m^2\cdot K$
U_L	Coeficiente global de pérdidas de calor.	$W/m^2\cdot^{\circ}C$

Símbolos

\mathcal{E}	Eficiencia del intercambiador de calor.	<i>Adimensional</i>
ϵ	Emisividad.	<i>Adimensional</i>
η	Eficiencia del colector.	<i>Adimensional</i>
η_{Calen}	Eficiencia del calentador.	<i>Adimensional</i>
σ	Constante de Stefan-Boltzman	$W/m^2 * K^4$

Subíndices

c	Frio
h	Caliente.
i	Entrada.
o	Salida.

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el diseño de un sistema de captación solar de mediana temperatura para el precalentamiento de agua de reposición para calderas, que puede cumplir una demanda de 25 m³/día de agua tratada a una temperatura de 90°C. En el estudio se estimó el recurso solar disponible en varias ciudades de la república con potencial industrial existente en el país. Con base a un sistema de referencia reportado por la Agencia Internacional de Energía, se realizaron simulaciones en el software TRNSYS, con datos de recurso solar de la ciudad de Graz, Austria. Con estas salidas, se verificó el desempeño de la simulación con balances de energía y comparándolos con datos de referencia. La desviación de los datos de fracción solar obtenidos respecto a los datos de referencia fue menor al 1.0%. La razón de flujo óptima se encontró buscando la mayor fracción solar para diferentes flujos utilizando el simulador. En los resultados se observó que la fracción solar del sistema se puede incrementar un 2.0%, en el caso estudiado la razón de flujo pasó de 30 a 13 kg/h-m² con una disminución considerable de energía para el bombeo.

En los resultados se muestra la construcción de tablas graficas de diseño para Ciudad de México, Toluca de Lerdo y Monterrey, ciudades con gran desarrollo industrial en México. Con ayuda de estas tablas gráficas, se observó que un sistema conveniente para cumplir una demanda de 25 m³/día a 90°C tiene un área de colección de 420 m², un volumen de tanque de 8.4 m³, una razón volumétrica de 20 l/m²-año y una razón de uso de 62 l/m²-día. La aplicación de este sistema de captación solar en la Ciudad de México, Toluca de Lerdo y Monterrey da como resultado una fracción solar de 0.45, 0.42 y 0.49; y una potencia anual de 976.8, 897.3 y 1049.3 kWh/m²-año respectivamente. Con lo anterior, se muestra que el sistema de calentamiento solar en Monterrey presenta una fracción solar 3.3% mayor que en Ciudad de México y que la fracción solar en Toluca es menor en 7.0% que en Monterrey.

Abstract

This thesis presents the design of a medium temperature solar collecting system for the preheating of boiler replacement water, which can meet a demand of 25 m³/day of treated water at 90°C. The study allows estimated the irradiation in Mexican cities with industrial potential. According with International Energy Agency, a parametric study using TRNSYS was carried out, taking as reference case a solar heater in Graz, Austria. It can be seen, that the outputs of our simulation program show a good agreement with the reference case, the difference in the solar fraction was less than 1.0%. In design of the solar heater, the largest solar fraction was optimized varying the flow rate mass.

In the results, it was observed that the solar fraction of the system can be increased by 2.0%, if the flow rate changes from 30 to 13 kg/h-m², with a considerable reduction of energy due to pumping. A graphic design table was constructed, for the same system for Mexico City, Toluca and Monterrey. With these, it was observed that a suitable system to supply 25 m³/day at 90°C is a system with a collection area of 420 m², a tank volume of 8.4 m³, a volume rate of 20 l/m²-year and a usage ratio of 62 l/m²-day. The proposed solar heater showed a solar fraction of 0.45, 0.42 and 0.49; and solar heating of 976.8, 897.3 and 1049.3 kWh/m²-year, for Mexico City, Toluca and Monterrey respectively. As seen, the solar heater in Monterrey results with a solar fraction of 3.3% higher than Mexico City, and 7% higher than Toluca.

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta las generalidades y la revisión bibliográfica de esta tesis, donde se enfatiza en la metodología de integración, las herramientas de simulación y las aplicaciones de los sistemas de captación solar, así como el potencial industrial en México. Finalmente se presenta el objetivo, los alcances de este proyecto y una descripción general de la escritura de la tesis.

1.1 Generalidades

En la escala mundial el sector industrial se caracteriza por ser uno de los mayores consumidores de recursos energéticos. El calor que se consume en las industrias se encuentra generalmente en el intervalo de temperatura de 80-240°C (IEA, 2009), (Secretaría de Energía, IEA, 2011) y (Secretaría de Energía, 2013). Por otro lado el calor obtenido con tecnología solar-térmica ha venido surgiendo y en un escenario con un mercado creciente de sistemas de calentamiento solar se estima que para el 2050 en la industria puede llegar a ser de 5.6 EJ/año (Vannoni, *et al.*, 2008).

En México el consumo energético por las industrias también es considerable. De acuerdo al Balance Nacional de Energía, el sector industrial es el segundo mayor consumidor de energía en el país, siendo que durante 2011 significó el 28.8% del consumo total (Secretaría de Energía, 2013). Con lo anterior, se observa que la aplicación de la energía solar de manera eficiente para suministrar el calor requerido, en procesos y espacios industriales, es considerable para coadyuvar en el ahorro y uso eficiente de la energía.

Un sistema de captación solar, es un dispositivo diseñado para recolectar y aprovechar la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica. Actualmente, se desarrollan en dos grandes grupos, que son los sistemas de baja temperatura (que es menor a 80°C) y los sistemas de alta temperatura (que van de 250 a 800°C y en algunos casos por arriba de los 1000°C). Estos son los dos grupos de sistemas más desarrollados, pero debido a que en la industria principalmente se utilizan temperaturas entre los 80 y 240°C, los sistemas de calentamiento solar son adaptados para obtener estas temperaturas pero de manera menos eficiente. Ahí radica la importancia del desarrollo de tecnología que coadyuve al desarrollo óptimo de los sistemas en el intervalo de mediana temperatura (80° a 240°C).

En este tipo de sistemas, la optimización depende de la disponibilidad del recurso solar, de los requerimientos de calor y de las características térmicas y ópticas del sistema de aprovechamiento solar-térmico. Para esto, se deben identificar las características de los requerimientos de calor, la disponibilidad del recurso solar y

las condiciones climáticas; así como también, se debe optimizar el proceso de acuerdo con el tipo de tecnología de captación solar disponible, ya sean colectores planos, colectores concentradores o con una combinación de ambos.

Para la integración de un sistema de captación solar se consideran los requerimientos y las condiciones del recurso solar en cada caso. La integración adecuada de sistemas, para un gran número de industrias, puede realizarse considerando los requerimientos y condiciones climáticas de situaciones representativas. En la búsqueda de diseños óptimos es conveniente considerar diferentes tipos de tecnologías solar-térmicas disponibles como lo son los colectores de placa plana y colectores de canal parabólico. Para las simulaciones con modelos en estado transitorio, modelos considerando condiciones climáticas de acuerdo a las registradas en México es importante considerar.

1.2 Revisión bibliográfica.

En esta sección se presenta la revisión bibliográfica sobre trabajos e investigaciones más recientes en el área de los sistemas de captación solar para procesos industriales, enfocados a la integración de los sistemas, herramientas para simulación y aplicaciones; además de una revisión del potencial industrial en México.

1.2.1 Metodología para integración de sistemas.

Weiss et al. (2005) realizaron un informe dando una visión general sobre el desarrollo de colectores de mediana temperatura, que se realizan en el marco de la AIE Task 33 / IV de Solar Heat for Industrial Processes (SHIP). Los colectores investigados en cooperación con la industria son colectores de placa plana con doble cristal y acristalamiento con recubierta anti reflectante, colectores estacionarios CPC, MaReCos (Colectores máximos Reflectores por sus siglas en inglés), colectores cilindro parabólicos, así como colectores de concentración lineal Fresnel. Las actividades que se realizaron son investigaciones sobre materiales adecuados para los colectores de temperatura media, y herramientas de prueba de durabilidad apropiadas que son aplicadas a los materiales y componentes específicos para permitir la predicción de la vida útil y para generar propuestas de normas internacionales.

European Solar Thermal Industry Federation (2006) realizó un documento en el marco de "Intelligent Energy-Europe project Key Issues for Renewable Heat in Europe". Este documento tenía por objeto destacar una de las prometedoras y próximas aplicaciones para la energía solar térmica: calor solar de Procesos Industriales (SHIP). La parte importante de la energía, lo que se necesita en las empresas comerciales e industriales de producción está por debajo de 250°C. El calor solar de procesos industriales no se encuentra ampliamente disponible y es importante entender sus barreras específicas para el crecimiento: la confianza solo en tecnología probada a largo plazo, el costo del sistema, la falta de tecnología.

International Energy Agency (2007) elaboró el Task 33 / IV que es un proyecto de investigación de la IEA Solar Heating and Cooling Programme en colaboración con la IEA Solar PACES Programme para poder hacer uso del enorme potencial de calor solar en la industria y para abrir un nuevo sector de mercado a la industria de la energía solar térmica. El documento menciona que para aplicaciones donde se necesitan temperaturas de hasta 250°C, las experiencias son bastante limitadas y también los componentes y sistemas adecuados no están muy desarrollados. En este documento se menciona que la forma más fácil de integrar calor térmico solar en los sistemas de energía industrial, es suministrar el calor al sistema de calefacción ya existente para el proceso. En ese caso, el colector solar tiene que ser operado en el mismo nivel de temperatura como el sistema de calefacción existente, que estará por encima de los 100°C en general. El medio de transferencia de calor debe ser agua y no vapor si es posible. Dicha puesta en marcha es fácil de instalar y de controlar, pero la eficiencia térmica será baja. Se hace mención de las nuevas tecnologías de colectores llamados “colectores de mediana temperatura”, los cuales son óptimos para estos procesos. Se dividen en tres categorías: colectores de placa plana mejorados, colectores estacionarios de baja concentración y pequeños colectores cilindro-parabólicos.

Quijera et al. (2014) realizaron una evaluación de la viabilidad de la integración de un sistema de energía solar térmica, en combinación con una bomba de calor, en la estructura de la energía convencional de una fábrica de conservas de atún en el lado atlántico del País Vasco. Sobre la base de modelos matemáticos y análisis PINCH determinaron el potencial de esta disposición tecnológica, analizaron diferentes hipótesis y escenarios, basado en casos reales del proceso productivo. Como resultado, obtuvieron una fracción solar de 0.115 con un área de colección de 500 m² utilizando colectores de tubos evacuados y un tanque de almacenamiento que mantenga la temperatura menor a 100°C. Afirmaron que la energía potencial de esta combinación, para el proceso industrial estudiado funciona a temperaturas bajas y medias, y debe ser considerado para un futuro próximo.

Ben et al. (2015) elaboraron una guía de integración de sistemas de captación solar a procesos industriales, el objetivo es identificar el punto de integración más adecuado técnicamente y económicamente, así como el concepto de integración más adecuado. Debido a la complejidad del suministro de calor y distribución en la industria, donde un gran número de procesos podría requerir energía térmica, esta tarea por lo general no es sencilla. Esta guía describe un procedimiento general para la integración de calor solar en procesos industriales, incluidas las medidas necesarias para identificar los puntos adecuados de integración para la calefacción solar de procesos industriales (SHIP en sus siglas en inglés) y conceptos de integración. Sobre la base de estos conceptos, se dan los conceptos del sistema (SHIP).

En esta sección se observa que la implementación de los sistemas de captación solar se lleva a cabo por medio de métodos de integración y el análisis Pinch, conociendo las capacidades y condiciones de operación de los procesos industriales.

1.2.2 Herramientas de simulación de sistemas de captación solar.

Schweiger et al. (2000) presentaron una visión para España y Portugal de posibles aplicaciones de calor solar para procesos industrial. Los autores establecen que la temperatura de demanda varía de 180–200°C usualmente. La eficiencia de los sistemas se determinó utilizando la plataforma de TRNSYS, consideraron cinco tipos de colectores solares en cinco ciudades de España y Portugal. En el estudio se encontró que los colectores de placa plana con recubrimientos altamente selectivos alcanzan temperaturas de estancamiento entorno a los 200°C, con temperaturas nominales de 100°C. También se observó que los colectores cilindro-parabólicos son adecuados por su costo-beneficio para la producción de vapor directa, mientras que los colectores planos tienen un mejor costo-beneficio para precalentamiento de agua y para calor a menos de 150°C. La eficiencia de los sistemas ubicados en los lugares estudiados varió de 0.62–0.76. En el estudio se observó que TRNSYS es una opción para simular el sistema que se propone para

un fin y que dependiendo del nivel de temperatura requerido se elige el tipo de colector.

Soteris (2003) estudió cinco tipos de colectores solares que van desde los estacionarios de placa plana sencilla a los cilíndricos parabólicos móviles, dando las características del medio de colectores solares de temperatura media-alta y una visión general de la eficiencia y el costo de las tecnologías existentes. Sobre la base de simulaciones en TRNSYS, dio una estimación de la eficiencia del sistema de plantas de calor de procesos solares que operan en el clima mediterráneo para las diferentes tecnologías de colector, que va de 0.2 para los FPC hasta 0.76 para los PTC. El autor observó que los resultados son aplicables a cualquier país con un clima y condiciones económicas similares a las de Chipre, todos los tipos de colectores considerados en este trabajo se pueden utilizar para procesos térmicos en la industria. Sin embargo, se notó que los colectores de placa plana son más adecuados para aplicaciones de baja temperatura y los colectores de concentración para las temperaturas más altas. La viabilidad económica de cada sistema resultó dependiente del costo inicial del sistema de captación solar y del precio del combustible. Los proyectos resultaron ser más viables cuando el costo de los colectores solares se abarata y se elimina la financiación del combustible.

Ayompe et al. (2011) realizaron un modelo TRNSYS validado para los sistemas de calefacción de agua solar de circulación forzada utilizados en climas templados. Los sistemas están compuestos por dos colectores planos de placa (FPC) y un colector de tubos de vacío (ETC) respectivamente, así como componentes auxiliares idénticos. Los sistemas fueron equipados con una unidad automatizada que controla los calentadores de inmersión y el perfil de la demanda de agua caliente para imitar el uso de agua caliente en una vivienda interior europeo típico. El componente principal del modelo TRNSYS fue el *Type73* FPC o *Type538* ETC. Una comparación de los datos modelados y medidos resultó en un porcentaje medio de errores absolutos de temperatura de salida del colector, calor recogido por los colectores y calor suministrado a la carga de 16.9%, 14.1% y 6.9% para el sistema de FPC y 18.4%, 16.8% y 7.6 % para el sistema ETC respectivamente. El modelo

subestimó la temperatura del fluido de salida del colector de -9.6% y sobrestimó el calor recogido y el calor entregado a cargar en un 7.6% y 6.9% para el sistema de FPC. El modelo sobreestimó los tres parámetros de un 13.7%, 12.4% y 7.6% para el sistema ETC. El modelo TRNSYS validado puede utilizarse para predecir el rendimiento a largo plazo de los sistemas de calentamiento solar de agua en diferentes lugares, simular actuaciones del sistema bajo diferentes condiciones climáticas y de operación, optimizar el tamaño del sistema solar de calefacción de agua para que coincida con diferentes perfiles de carga.

Taherian et al. (2011) realizaron la simulación dinámica de un colector solar termosifón calentador de agua teniendo en cuenta las condiciones climáticas de una ciudad en el norte de Irán. La simulación se realizó para los días despejados y parcialmente nublados. Los resultados de la simulación se compararon con los resultados experimentales en otoño y mostraron un buen acuerdo. La configuración tradicional para el calentador de agua de termosifón consistió en uno o dos colectores de placa plana de 2.06 m² cada uno, montada en una posición inclinada 40° respecto a la horizontal y un tanque de almacenamiento cilíndrico de 160 l de capacidad instalado horizontalmente de forma que su parte inferior fue más alta que la parte superior de los colectores. El programa de simulación que utilizaron fue MATLAB Simulink (de Mathworks Inc.) para proporcionar alta resolución de simulación dinámica del colector de un sistema de calentamiento de agua solar termosifón. La simulación y la experimentación mostraron una eficiencia media del 68%, lo cual fue muy notable para tales sistemas y demostraron que la eficiencia instantánea del sistema disminuye a medida que la relación de la temperatura a radiación incidente aumenta. Por lo tanto, se recomiendan que el tanque de almacenamiento esté diseñado de tal manera que el fluido entrante al colector esté a una temperatura próxima a la de los alrededores. El programa de simulación fue capaz de predecir la eficiencia del sistema en los días soleados, pero en días nublados parcialmente, sólo da resultados adecuados para la temperatura de la cubierta de cristal.

Weiss et al. (2011) desarrollaron el proyecto de colaboración del Programa de refrigeración y de calefacción solar y el programa SolarPACES de la Agencia Internacional de Energía (AIE), *Task 33/IV*, en conjunto con 16 instituciones y 11 empresas de ocho países. El objetivo del proyecto fue el desarrollo de plantas de energía solar térmica para el calor de proceso industrial. Para alcanzar este objetivo, los estudios sobre el potencial se llevaron a cabo en los países involucrados, una temperatura media de 250°C, y buscaban las soluciones a los problemas de la integración del sistema de calor solar en los procesos industriales. El conocimiento es transferido a la industria a través de un boletín anual y por la celebración de las conferencias pertinentes. En este proyecto se observó que los programas de simulación más utilizados fueron TRNSYS, PinCH y SOCO.

Krummenacher et al. (2015) realizaron un informe donde incluye una breve introducción sobre el potencial técnico del SHIP y describen el estado actual de sus aplicaciones. IEA SHC Task 49 tiene como objetivo la elaboración y mejora de los métodos y herramientas, y en la recolección, preparación y difusión de información clave para conseguir asumir el reto de lograr una eficiencia energética y la sustitución de combustibles fósiles por el calor solar a gran escala. El análisis Pinch permite la determinación del alcance y proyección de las soluciones alternativas más prometedoras. La integración de calor solar requiere la variabilidad del tiempo de los flujos de calor y de almacenamiento de calor a ser abordado, y se refiere esencialmente a proyectos de modernización (es decir, la integración en una infraestructura existente). Algunas herramientas de software (por ejemplo, EINSTEIN, Pinch, SOCO y OBI) proporcionan características prácticas para estos problemas y ayudan con la colocación de almacenamiento de calor y el diseño.

En esta sección se aprecia que existen varias herramientas de simulación para la integración de sistemas y que una de las más validadas es el software TRNSYS, que es de gran utilidad para el diseño y dimensionamiento de un sistema de captación solar.

1.2.3 Aplicaciones de sistemas de captación solar.

Soteris (2004) elaboró un estudio de los diferentes tipos de colectores y aplicaciones de energía solar térmica. El autor realizó un análisis óptico, térmico y termodinámico de los colectores y presentó una descripción de los métodos utilizados para evaluar su rendimiento. Ejemplos de aplicaciones mostradas incluyen: el calentamiento solar de agua, que comprenden termosifón, almacenamiento colector integrado, sistemas directos e indirectos y de los sistemas de aire, calefacción y enfriamiento del espacio, que comprenden, sistemas de aire y de agua y bombas de calor calefacción y servicio de agua caliente, refrigeración, calor para procesos industriales, que comprenden los sistemas de aire y de agua y sistemas de generación de vapor, la desalinización, sistemas térmicos de energía, que comprenden los sistemas cilindro-parabólicos, torres de energía y de cocina, hornos solares y aplicaciones de la química. El autor concluyó que con todas las características y aplicaciones mostradas, los colectores de energía solar se pueden emplear en una amplia variedad de sistemas, proporcionar beneficios ambientales y económicos significativos.

Zhai et al. (2010) realizaron una investigación experimental de un colector solar de concentración basado en lentes de Fresnel lineal. Con el fin de hacer un análisis, elaboraron un modelo matemático para la absorción de tubos de vacío calentado por la lente de Fresnel lineal. Los análisis indicaron que el colector de lente Fresnel con absorbedor de tubo de vacío tiene un buen rendimiento (50%) en los días claros, incluso cuando la temperatura de conversión se acerca 200°C. Concluyeron que para calentamiento de agua, la eficiencia térmica de este colector puede alcanzar el 52.1%, superior a la de uso común de un colector de tubos en un 9%, cuando la temperatura del agua de entrada es 80 a 90°C. A partir de los resultados de la simulación térmica, la eficiencia térmica del colector solar por la lente de Fresnel con 1 m ancho es de 50,6% cuando la temperatura de entrada llega a 200°C, mientras que la de un colector de concentración de tubos de vacío es de sólo el 11.7% bajo la misma condición. Cuanto mayor sea la temperatura de conversión,

mejor es el rendimiento del colector solar de lente de Fresnel, en comparación con un colector no concentrador.

Mekhilef et al. (2011) realizaron un estudio de la utilización de sistemas de energía solar en aplicaciones industriales y analizaron los usos industriales que son más compatibles para ser integrado con los sistemas de energía solar. Argumentaron cómo la utilización de la energía solar puede mejorar la calidad y cantidad de los productos, mientras reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. En el trabajo observaron que tanto los sistemas, solares térmicos y fotovoltaicos, son adecuados para diversas aplicaciones de procesos industriales. Sin embargo, la eficiencia global del sistema depende de la integración adecuada de los sistemas y el diseño apropiado de los colectores solares. Los sistemas de energía solar pueden ser considerados ya sea como fuente de alimentación o para aplicación directa a un proceso. Los grandes sistemas de energía solar térmica con grandes campos de colectores son económicamente viables debido a la utilización de colectores estacionarios. Además, necesitan menos costo de inversión inicial en comparación con plantas pequeñas. La viabilidad de la integración de sistemas de energía solar en aplicaciones convencionales depende de los costos considerados en el suministro convencional de energía en las industrias.

Chidambaram et al (2011) revisaron los artículos de investigación en el campo de las técnicas de refrigeración solar, colectores solares, los métodos de almacenamiento y su integración, junto con los estudios de mejora del rendimiento utilizando la estratificación térmica y sistemas de almacenamiento térmico en cascada. En su revisión encontraron que *Balghouthi et al.* Han modelado la tecnología de refrigeración de absorción de energía solar en condiciones tunecinas, utilizando el TRNSYS. Su sistema optimizado para un edificio típico de 150 m² compuesto por una máquina de absorción de bromuro de litio en agua de una capacidad de 11 kW, un área de 32 m² de colectores solares de placa plana inclinados 35° respecto a la horizontal, y un tanque de almacenamiento de agua caliente de 0.8 m³. *Desideri et al.* analizaron la técnica y la viabilidad económica de la sustitución/integración de los sistemas de refrigeración de compresión existentes

con los sistemas de refrigeración por absorción solar para la refrigeración de la carne y una planta de trigeneración termosolar híbrida para la calefacción y exigencias de un hotel de refrigeración.

Ruchi et al (2013) realizaron una revisión detallada exclusivamente en los aspectos de diseño de los sistemas de SHW (calentamiento solar de agua por sus siglas en ingles) y presentaron un resumen sobre el desarrollo de los diversos componentes del sistema que incluye el colector, el tanque de almacenamiento y el intercambiador de calor, así también de la tecnología refrigerante alternativa y los avances tecnológicos en la mejora del rendimiento, así como la rentabilidad del sistema de calentadores solares de agua. Los autores concluyeron que los SWH son una de las tecnologías más eficaces para convertir la energía solar en energía térmica y consideraron que es una tecnología desarrollada y comercializada. Sin embargo, existen oportunidades para mejorar aún más el rendimiento del sistema para aumentar su fiabilidad y eficiencia.

Raisul et al. (2013) presentaron una visión sobre los distintos tipos de sistemas de calentamiento de agua solares y del potencial de su mercado, analizaron las actuaciones junto con la forma única que hay de los diferentes tipos de sistemas de calentamiento solar de agua y sus aspectos económicos. En el documento se presentan diseño y avances técnicos relacionados de los sistemas de calentamiento solar de agua en términos de eficiencia energética y la rentabilidad. En este estudio se observó que la instalación de sistemas de calentamiento de agua es más factible en un área grande en comparación con una pequeña unidad de instalación para los hogares en términos de conservación de la energía y por unidad de costo de la energía sobre los costos iniciales. En muchas aplicaciones de gran escala, como los sectores de la construcción comercial, tanto en la evaluación de la viabilidad económica y tecnológica puede contribuir en la reducción del costo de la energía.

Soteris (2013) realizó una investigación dando una visión general de las posibilidades del calor solar en un proceso industrial, con énfasis en la industria alimentaria. Los requisitos de temperatura de las aplicaciones de la industria alimentaria van desde 60 a 180°C. Sobre la base de simulaciones TRNSYS, indicó

una estimación de la contribución solar de plantas solares de calor de proceso que operan en Chipre para diferentes tecnologías de colector. Las ganancias de energía anuales de tales sistemas son 610 a 910 kWh/m² y los costos de la energía resultante obtenida para el calor solar son 0,028 a 0,05 Euro/kWh dependiendo del tipo de colector aplicado. Los costos serán aún más favorables si los colectores solares se abaratan y se elimina el financiamiento del combustible. El autor concluyó que la viabilidad económica de los sistemas depende del costo inicial de los sistemas de energía solar y el precio del combustible. Los costos resultan ser más favorables cuando los colectores solares se abaratan y se elimina la subvención del combustible. En la etapa del diseño de los sistemas solares se debe considerar la necesidad de ser simulado y sus beneficios económicos evaluados con el fin de seleccionar el mejor sistema para la aplicación particular en el costo del colector y precio del combustible aplicable.

Ramos et al. (2014a) presentaron características de diseño y el desarrollo de un prototipo que incluye un concentrador de cilindro parabólico, montado en una estructura de seguimiento de un solo eje. Los autores mencionaron que el canal parabólico es la tecnología más madura para generar calor a temperaturas de hasta 400°C para aplicaciones de electricidad o calor de proceso de energía solar térmica. Los autores observaron una alternativa adecuada para el calor de procesos industriales.

Ramos et al. (2014b) realizaron una evaluación del potencial en México para las aplicaciones de calor solar en los procesos de industrias de alimentos y textiles. El estudio consideró las micro y pequeñas industrias de alimentos y textiles. Se observó que están utilizando el 68% del consumo total de energía en forma de energía térmica. Los procesos utilizan agua, vapor de baja y media presión, principalmente a temperaturas de 60 a 180°C. Los colectores cilindro-parabólicos son una alternativa para pequeñas instalaciones que van desde varios metros cuadrados a una energía térmica útil de cien metros cuadrados para actividades productivas. Sin embargo, la economía de la CST (tecnología de concentradores solares por sus siglas en inglés) en general, aún no es atractivo de los regímenes

actualmente vigentes en México para la valoración de alternativas para la generación de energía.

En esta sección se observa que la tecnología solar, específicamente la solar térmica, tiene gran aplicación dentro de la industria actualmente. La aplicación de los sistemas de calefacción solar trae consigo beneficios tanto ambientales como económicos.

1.2.4 Normas y procedimientos de evaluación.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2010) desarrolló este documento como parte del proyecto TECH4CDM. Las normas regulatorias de los sistemas de calentamiento solar en México son presentados, así como datos estadísticos del estado actual de la energía solar térmica en el país. Las normas NMX-ES-001-NORMEX-2005, NMX-ES-002-NORMEX2007 y NMX-ES-003-NORMEX-2008 son normas establecidas, mientras que PROY-NMX-ES-004-NORMEX-2009 es un proyecto de norma aun.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (2014) en su página oficial hace mención de la normatividad existente en México para los sistemas solares de calentamiento de agua que permite asegurar a los usuarios una adecuada calidad en los sistemas y sus instalaciones. Las normas NMX-ES-001-NORMEX-2005, NMX-ES-002-NORMEX2007, NMX-ES-003-NORMEX-2008 y NMX-ES-004-NORMEX-2010 son establecidas, al igual que la Norma Técnica de Competencia Laboral (NTCL) para “Instalación del sistema solar de calentamiento de agua”, la Norma ambiental para el Distrito Federal y el documento “Sistemas térmicos solares en agronegocios”. Estas normas y documentos dan especificaciones técnicas para la adecuada instalación de los sistemas, así como los métodos de prueba para su verificación y los requisitos de marcado y etiquetado.

En esta sección se hace mención de las normas y procedimientos de evaluación para los sistemas solares de calentamiento de agua existentes en México, donde

se establecen los requerimientos de instalación y los métodos de prueba para determinar su rendimiento térmico de los colectores y de los sistemas.

1.2.5 Potencial industrial en México.

Instituto Nacional de Ecología (1986) en su artículo titulado “ La Industria en México: oportunidades para la producción sustentable” hace una revisión de la distribución geográfica del valor agregado de las industrias en el país, donde sobresalen los estados de Jalisco, Nuevo León, Estado de México y Ciudad de México con 6.7, 9.1, 18.1 y 29.5 por ciento respectivamente. Con la cual demuestran que en estas entidades federativas existe un mayor desarrollo industrial.

Forbes México (2014) en su artículo titulado “5 Estados con potencial para el desarrollo inmobiliario industrial” hace mención de los estados próximos a desarrollarse industrialmente. El Estado de México, Nuevo León y Ciudad de México son las entidades con mayor desarrollo industrial, y en una proyección a futuro se menciona que los estados de Baja California, Coahuila, Guanajuato, Querétaro y Veracruz tienen un alto potencial de crecimiento industrialmente, debido a su ubicación geográfica y desarrollo económico.

Con la revisión de estos dos artículos se observó que las 3 zonas de México con mayor desarrollo industrial son el Estado de México, Nuevo León y Ciudad de México, por lo que enfocar el diseño del sistema de captación solar para condiciones climáticas de una ciudad de estos 3 lugares es conveniente.

1.2.6 Conclusiones de la revisión bibliográfica.

En la revisión bibliográfica se aprecia que los sistemas de captación solar tienen aplicaciones industriales actualmente. Dentro de la industria al implementar estos sistemas se llegan a obtener beneficios ambientales al reducir la quema de combustibles y evitar la emisión de gases de efecto invernadero; y beneficios económicos ya que necesitan menos costo de inversión inicial en comparación con plantas pequeñas, aunque su viabilidad económica es muy dependiente del precio de los colectores.

La implementación de los sistemas de captación solar se lleva a cabo por medio de métodos de integración. Para llevar a cabo la integración primero se deben identificar los puntos de integración y analizarlos, además de conocer las capacidades y condiciones de operación de los procesos industriales. El análisis PINCH es utilizado en la integración de procesos, para optimizar la energía dentro de los procesos industriales.

Existen varias herramientas para la simulación de sistemas de calentamiento solar, pero el software TRNSYS es uno de los más utilizados al ser de gran utilidad para el diseño y dimensionamiento de un sistema de captación solar, además de ser útil para realizar su validación por medio de simulaciones.

El intervalo de temperaturas con el que trabajan las industrias en sus procesos va de los 60 a 300°C y la mediana temperatura (80-240°C) entra dentro de este intervalo. Sin embargo, los flujos utilizados en el bombeo en el sistema de captación solar, no corresponde a un estudio de optimización de flujo en el sistema, por lo que puede obtenerse aún un mayor rendimiento con costo menor para el bombeo.

Las tres zonas en México con mayor desarrollo industrial son el Estado de México, Nuevo León y Ciudad de México, por lo que enfocar el diseño del sistema de captación solar para condiciones climáticas de una ciudad de estos tres lugares es conveniente.

1.3 Objetivos y alcances

En base a la revisión bibliográfica realizada, se planteó el objetivo general del proyecto, así como los objetivos específicos y alcances de este trabajo de tesis, los cuales se mencionan a continuación.

Objetivo general

Diseñar un sistema de captación solar para calentamiento de agua en el intervalo de mediana temperatura, considerando las capacidades y condiciones de operación de un sistema que pueda suplir a un sistema de los más utilizados actualmente en la industria mexicana.

Objetivos específicos

- Desarrollar una plataforma de simulación considerando el software **TRNSYS** y verificando su buen desempeño.
- Recolectar datos de las condiciones ambientales en las localidades donde existe mayor potencial industrial en el país.
- Recabar datos de las capacidades y condiciones de operación de un sistema representativo de los utilizados en la actualidad dentro de la industria.
- Realizar la integración del sistema y optimizarlo mediante análisis PINCH, utilizando la plataforma **TRNSYS**.

Alcances

- Conocer las condiciones ambientales de 15 localidades del país donde se encuentran las industrias.
- Basar el diseño en las capacidades y condiciones de operación de un sistema representativo que precalienta 25 m³ diarios de agua de reposición a 90 °C, optimizando el flujo del fluido de trabajo en el sistema.
- Realizar el diseño y el dimensionamiento de un sistema de captación solar, para tres localidades con potencial industrial en México, que son Ciudad de México, Toluca de Lerdo y Monterrey.

1.4 Escritura de la tesis.

En el Capítulo 1 se presentó la revisión bibliográfica que justifica el trabajo de tesis, así como, los objetivos y alcances de este trabajo. En el Capítulo 2, se presentan los fundamentos teóricos, las condiciones climáticas en las ciudades de estudio, la capacidad industrial en el país, los requerimientos de la industria y los modelos para realizar el diseño y dimensionamiento del sistema de captación solar, así como un sistema de referencia.

En el Capítulo 3 se desarrolla la solución del modelo matemático, haciendo una descripción del simulador, planteando la configuración del sistema de referencia en la plataforma de simulación y verificando lo desarrollado. El Capítulo 4 muestra los resultados obtenidos de las simulaciones, el comportamiento del sistema de referencia en las ciudades de estudio, el análisis de variación de flujo, así como el diseño y dimensionamiento de un sistema de captación solar. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Modelo físico del sistema y modelo matemático de sus elementos.

En este capítulo de la tesis, se presentan los fundamentos teóricos, las condiciones climáticas de las ciudades de estudio, la capacidad industrial del país y los requerimientos de la industria. Así también se plantea el modelo físico de un sistema de captación solar, se establece un sistema de referencia que cumpla con la demanda establecida y se muestran los modelos matemáticos de los elementos del sistema.

2.1 Fundamentos teóricos.

A continuación, se presentan los fundamentos teóricos de esta tesis, en relación con los mecanismos de transferencia de calor que se involucran en el sistema y los elementos que componen un sistema de captación solar.

2.1.1 Mecanismos de Transferencia de Calor.

En cualquier sistema de conversión de energía fototérmica se busca captar la energía solar y transformarla en calor útil hacia algún medio de trabajo, ya sea agua, aire u otro fluido. También se busca en algunas aplicaciones que la temperatura de operación del sistema sea lo suficientemente alta para que su disponibilidad termodinámica sea satisfactoria. Un simple balance de energía en un colector solar indica que una parte de la energía solar incidente se pierde hacia los alrededores como calor, otra fracción se aprovecha calentando el medio de trabajo, y una fracción es acumulada. En todo diseño de ingeniería se busca disminuir las pérdidas de calor hacia los alrededores intentando siempre lograr el máximo aprovechamiento de energía solar con el mínimo costo posible (Manrique, 1984). Es importante conocer los mecanismos de transferencia de calor para poder evaluar las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación que experimenta cualquier sistema térmico.

Conducción.

El fenómeno de transferencia de calor por conducción es un proceso de propagación de energía en un sólido, líquido o gas, mediante comunicación molecular directa o entre cuerpos a distintas temperaturas. En el caso de los líquidos y gases esta transferencia es importante, siempre y cuando se tomen las precauciones debidas para eliminar las corrientes naturales de flujo que pueden presentarse como consecuencia de las diferencias en densidad que experimentan

éstos. De aquí que la transferencia de calor por conducción es de particular importancia en sólidos sujetos a una diferencia de temperaturas.

Al existir un gradiente de temperatura dentro del medio, la segunda ley de la Termodinámica establece que la transferencia de calor se lleva a cabo desde la región de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. En estas circunstancias se dice que el flujo de calor es proporcional al gradiente de temperatura, como se ve en la Ecuación (2.1) (Manrique, 1984).

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

donde:

q'' Flujo de calor por unidad de área (W/m²).

k Conductividad térmica del material (W/m* K)

El signo negativo de la Ecuación (2.1) es introducido a fin de que la segunda ley de la Termodinámica sea satisfecha, esta ecuación se conoce como la *Ley de Fourier de la conducción de calor*.

Convección.

El fenómeno de transferencia de calor por convección es un proceso de transporte de energía que se lleva a cabo como consecuencia del movimiento de un fluido (líquido o gas) y está íntimamente relacionado con el movimiento de este. La experiencia indica que un sistema disipa más calor cuando se le hace pasar aire proveniente de un ventilador, que cuando se encuentra expuesto al aire ambiente simplemente, de lo cual se deduce que la velocidad del fluido tiene un efecto importante sobre la transferencia de calor en la superficie. De la misma manera, la experiencia indica que el flujo de calor es diferente si la placa se enfría en agua o aceite en vez de en aire, de aquí que las propiedades del fluido tengan también un efecto importante sobre la transferencia de calor.

La ecuación que rige el fenómeno de transferencia de calor por convección es la *Ley de enfriamiento de Newton*, que se muestra en la Ecuación (2.2) (Manrique, 1984).

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

donde:

q'' Flujo de calor por unidad de área (W/m^2).

h Coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot K$)

T_s Temperatura de la superficie.

T_∞ Temperatura del fluido.

El fenómeno de convección usualmente se clasifica como convección forzada o como convección natural. En el primer caso el fluido se hace pasar por el sistema mediante la acción de un agente externo, como un ventilador, una bomba o agentes meteorológicos. Por otra parte, el movimiento del fluido resulta en el segundo caso como una consecuencia de los gradientes de densidad que experimenta este, al estar en contacto con una superficie a mayor temperatura y en presencia de un campo gravitacional (o centrífugo). Un ejemplo de convección forzada sería el caso de un colector plano en el que el agua se hace circular por su interior mediante la acción de una bomba.

Radiación.

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere de la presencia de un medio interventor, es la más rápida y no sufre atenuación en el vacío. Esta es la manera en la que la energía del sol llega a la Tierra.

El fenómeno de radiación se rige por la *Ley de Stefan-Boltzman*. Cuando una superficie de emisividad ϵ y área superficial A_s , a una temperatura termodinámica T_s , está por completo encerrada por una superficie mucho más grande (o negra), a una temperatura T_{alred} , y separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se da por la Ecuación (2.3) (Cengel, 2011).

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (2.3)$$

donde:

\dot{Q}_{rad} Razón neta de transferencia de calor por radiación (W).

ϵ Emisividad de la superficie.

σ Constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

A_s Área de la superficie (m^2).

En este caso especial, la emisividad y el área superficial de la superficie circundante no tienen efecto sobre la transferencia neta de calor por radiación.

2.1.2 Sistema de captación solar.

Un sistema de captación solar, es un dispositivo diseñado para recolectar y aprovechar la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica. En un sistema SHIP la irradiación solar se convierte en calor en un campo de colectores solares, el calor es transportado por medio de un fluido de transferencia de calor, el calor se almacena en un almacenamiento de energía térmica y se suministra directa o indirectamente a través de intercambiadores de calor. Esto es llevado a cabo por una estrategia de operación implementada a través de bombas y controladores de válvulas (Horta, 2015c).

Colectores solares

Los colectores solares son dispositivos que convierte la radiación solar en calor, y transfiere este calor al fluido de trabajo (aire, agua o aceite) que circula a través del sistema. La energía solar que es recogida se transporta desde el fluido de trabajo a

al depósito de almacenamiento de energía que se utilizará más tarde. Existen diferentes tecnologías para diferentes niveles de temperatura de funcionamiento, en el caso de la mediana temperatura, las tecnologías más utilizadas son los colectores de placa plana (30-100°C), los colectores de tubos evacuados (50-130°C) y los colectores de canal parabólico (80-200°C) (Horta, 2015c).

Intercambiadores de calor.

Un intercambiador de calor es un componente que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro fluido. Entre las principales razones por las que se utilizan los intercambiadores de calor se encuentran las siguientes:

- Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura.
- Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mediante un fluido con mayor temperatura.
- Condensar un fluido en estado gaseoso por medio de un fluido frío.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido mientras se condensa un fluido gaseoso con mayor temperatura.

En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan. Dos parámetros que caracterizan a un intercambiador son el coeficiente de transferencia de calor UA (W/K) y su eficiencia, la cual depende del flujo másico, la geometría, las propiedades del fluido y del tipo de intercambiador.

Se presentan 3 tipos de intercambiadores de calor en función de la dirección relativa que existe entre los dos flujos: Flujo paralelo, Contraflujo y Flujo cruzado. Existe un flujo paralelo cuando el flujo interno, o de los tubos, y el flujo externo, o de la carcasa, fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador

por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa. Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproximan la una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Debe quedar claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente.

En el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90°. Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente utilizado donde uno de los fluidos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasando por el intercambiador en dos fases.

Se presenta un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos. Ya que el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada. Este tipo de intercambiador resulta ser más eficiente que los otros dos tipos mencionados anteriormente. En contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo, el intercambiador de contraflujo puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador (Jaramillo, 2007).

Tanque de almacenamiento.

Los tanques térmicos de almacenamiento del agua caliente en instalaciones de calentamiento solar son dimensionados para garantizar la demanda diaria de agua caliente del consumidor final a la temperatura requerida por la aplicación cuando hay una falta de coincidencia entre el suministro de energía y demanda energética.

Hay diferentes tipos de tanques de almacenamiento térmico, entre los cuales se encuentran los presurizados y no presurizados. Los tanques presurizados almacenan fluidos a temperaturas mayores a los 90°C, mientras que los tanques no presurizados su temperatura máxima de almacenamiento es menor a los 90°C.

Los tanques de almacenamiento de agua son la solución estándar para los sistemas de calor de procesos solares. Para el manejo de un fluido líquido, existen tanques de almacenamiento térmico de acero con aislamiento que manejan volúmenes de hasta 200m³ (Horta, 2015c).

Calentador auxiliar eléctrico.

Los calentadores eléctricos auxiliares son dispositivos que elevan la temperatura de un fluido utilizando un controlador interno, externo o ambos, el cual aumenta o disminuye la cantidad de potencia (Watts) necesarios para llevar al fluido a una temperatura establecida al sistema en el que se trabaja, esto para complementar el aporte de calor en aquellos periodos de escasa radiación solar, o bien, cuando la demanda de agua caliente sea superior a la que el sistema solar pueda proporcionar por su diseño.

Sistema de control.

La función clave del sistema de control es vigilar las temperaturas, y controlar las bombas y válvulas asegurando que toda la energía solar disponible se entrega al sistema de calor de una manera optimizada. La estrategia de control debe adaptarse de acuerdo con la demanda específica de calor y puede incluir el control de:

- El caudal másico y el nivel de temperatura en el lado del circuito del colector.
- Punto de entrega y tasa de calor.
- Funcionamiento estándar o modos de operación de seguridad.

Debido a la variedad de procesos industriales no hay controladores estandarizados para sistemas de calor solar para procesos industriales.

2.2 Condiciones climáticas y capacidad industrial en las zonas de estudio.

En esta sección, se muestran las condiciones climáticas en 15 ciudades del país, así como la capacidad industrial en México y los requerimientos en la industria.

2.2.1 Condiciones climáticas.

La búsqueda de las condiciones climáticas y el recurso solar se lleva a cabo con la ayuda de TRNSYS. En el estudio se seleccionaron 15 ciudades de la república mexicana para llevar a cabo esto, las ciudades se eligen por tener disponibilidad a la información de sus condiciones climáticas. En el estudio se utiliza la base de datos de METEONORM, utilizando la plataforma de TRNSYS para su manejo. Las ciudades en estudio son:

- Acapulco, Guerrero.
- Campeche, Campeche.
- Cancún, Quintana Roo.
- Chihuahua, Chihuahua.
- Ciudad de México.
- Coatzacoalcos, Veracruz.
- Guadalajara, Jalisco.
- Mazatlán, Sinaloa.
- Monterrey, Nuevo León.
- San Cristóbal de las Casas, Chiapas.
- San Felipe, Baja California Sur.
- San Ignacio, Baja California Sur.
- Tapachula, Chiapas.
- Toluca, Estado de México.
- Veracruz, Veracruz.

En la Tabla 2.1 se presentan los valores promedio anuales de las temperaturas, humedad relativa y velocidad del viento.

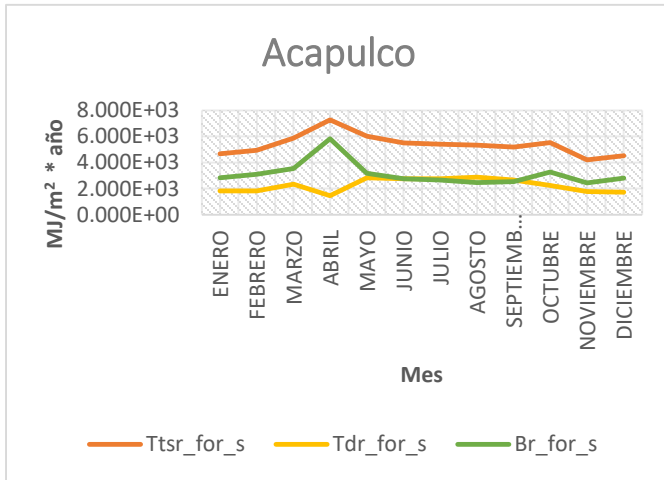
Tabla 2.1. Condiciones climáticas en ciudades representativas de la Republica.

Ciudad	T _{min} anual [°C]	T _{max} anual [°C]	T _{prom} ambiente anual [°C]	Humedad relativa promedio anual [%]	V _{prom} del viento anual [m/s]
Acapulco	17.0	35.5	27.4	61.1	2.21
Campeche	10.6	39.2	26.6	74.9	3.39
Cancún	11.1	34.8	25.5	80.1	3.41
Chihuahua	-8.8	36.5	18.3	48.2	3.55
Ciudad de México	0	30.9	17.1	60.6	4.43
Coatzacoalcos	13.6	36.3	25.6	80.2	4.30
Guadalajara	1.7	34.5	18.7	56.5	1.78
Mazatlán	10.0	34.2	24.3	76.7	2.69
Monterrey	-3.0	42.1	25.1	54.6	4.47
San Cristóbal de las C.	1.4	27.6	14.5	92.4	3.28
San Felipe	7.0	34.3	22.4	74.8	4.47
San Ignacio	1.3	36.9	21.6	51.0	2.22
Toluca	-7.3	22.1	7.7	62.2	2.37
Tapachula	15.2	37.1	26.3	64.6	2.89
Veracruz	12.2	34.0	25.3	78.1	4.76

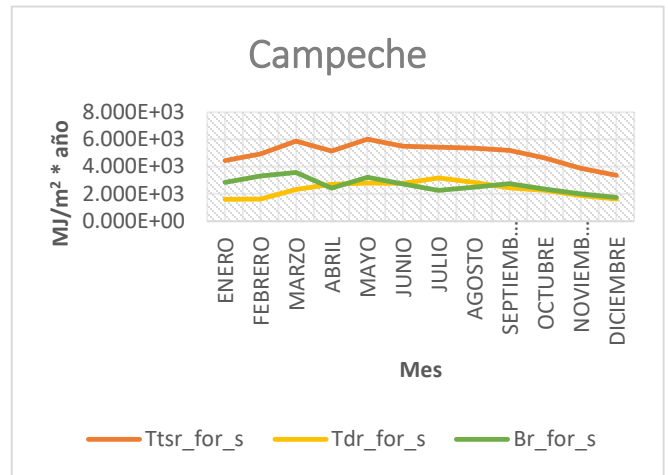


Fig. 2.1 Mapa de la República Mexicana con la ubicación de las ciudades de estudio.

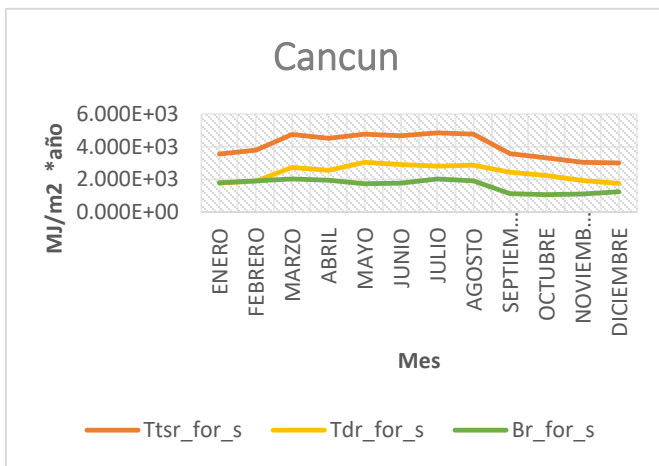
En la Fig. 2.1 se observa que la ubicación de las ciudades hasta el momento son representativas de las regiones sur costeras y norte del país. En esta etapa se realizó el cálculo de la radiación total en una superficie inclinada (19°), la radiación directa en la superficie y la radiación difusa en la superficie. En la Figura 2.2 se aprecia la variación de la radiación sobre una superficie inclinada a 19° a lo largo del año en cada una de las ciudades de estudio.



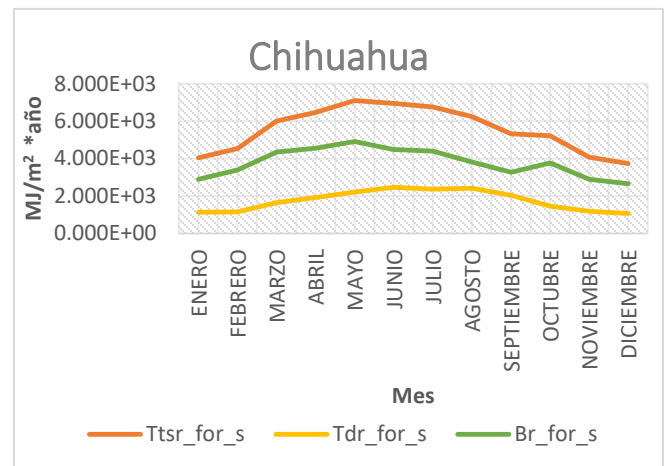
a)



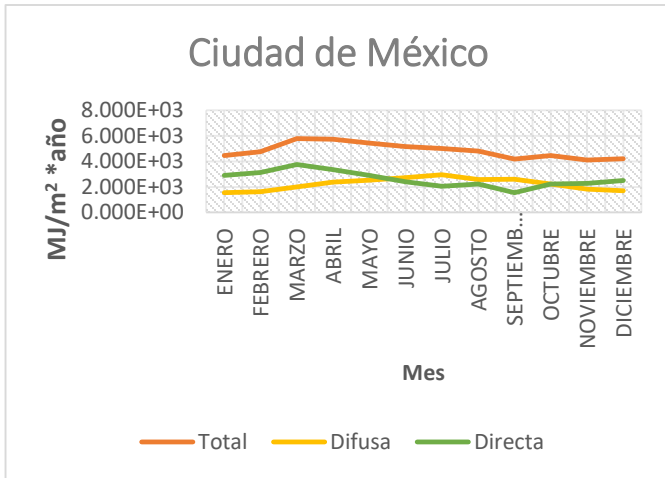
b)



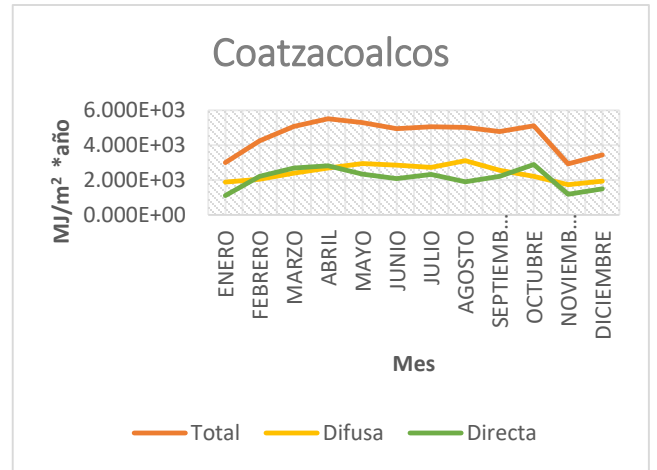
c)



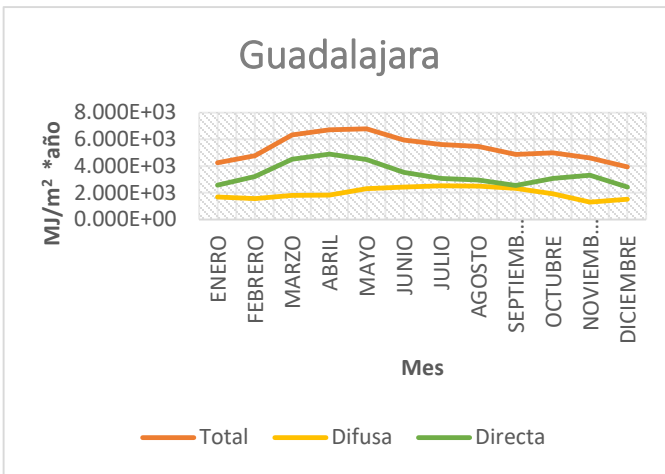
d)



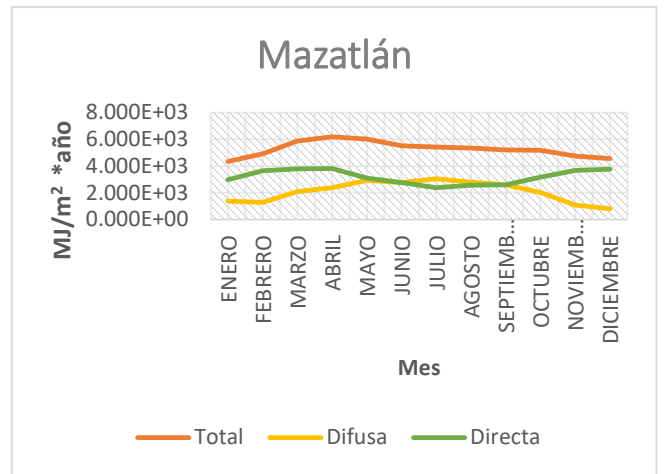
e)



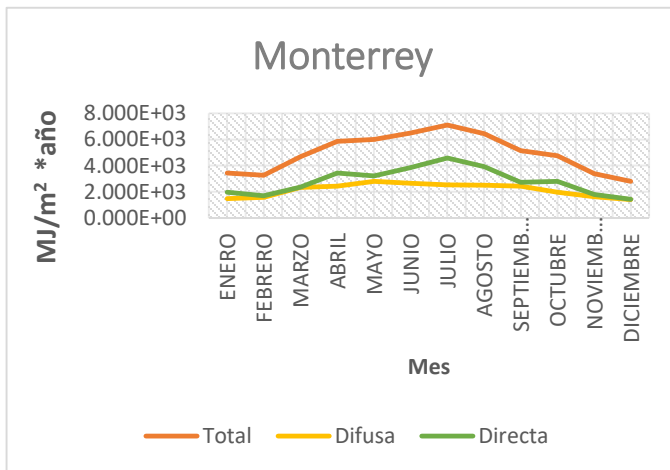
f)



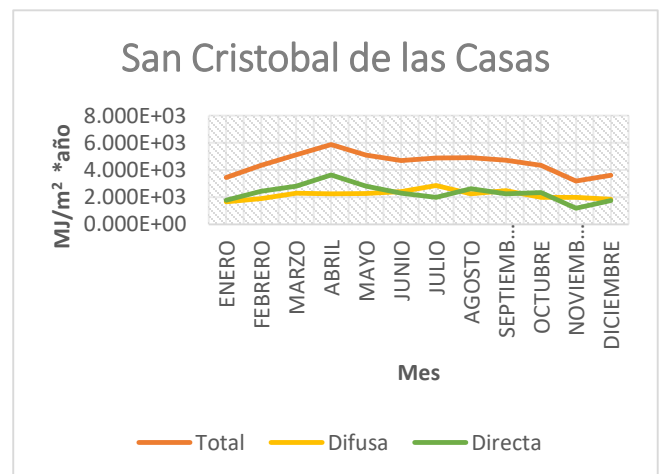
g)



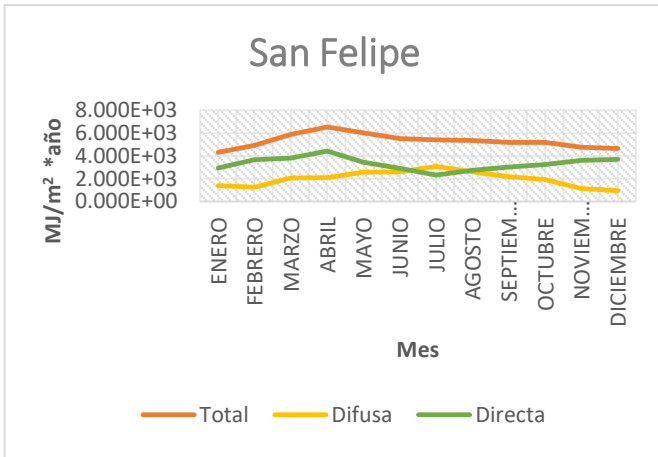
h)



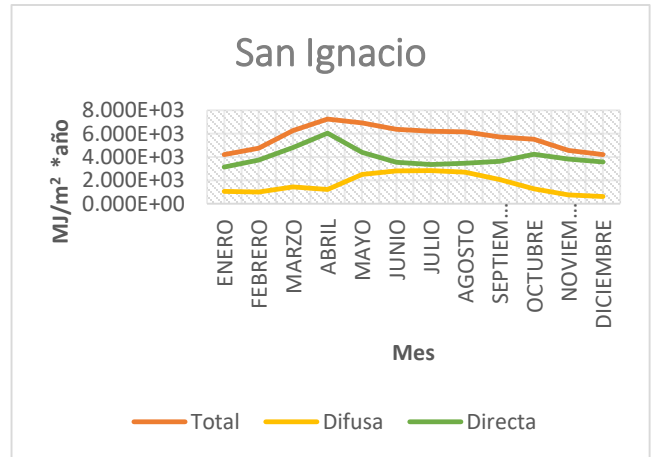
i)



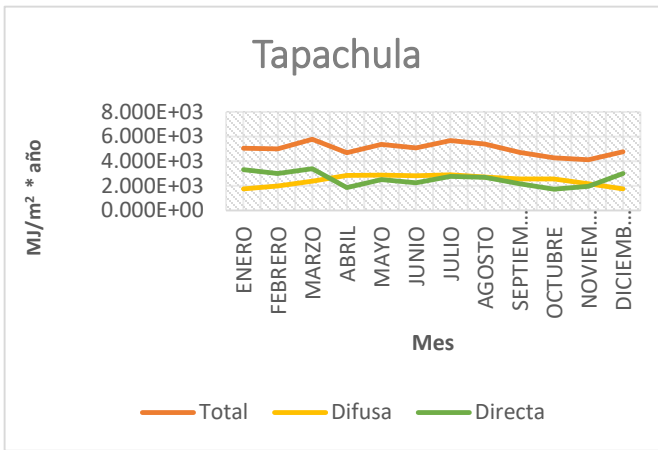
j)



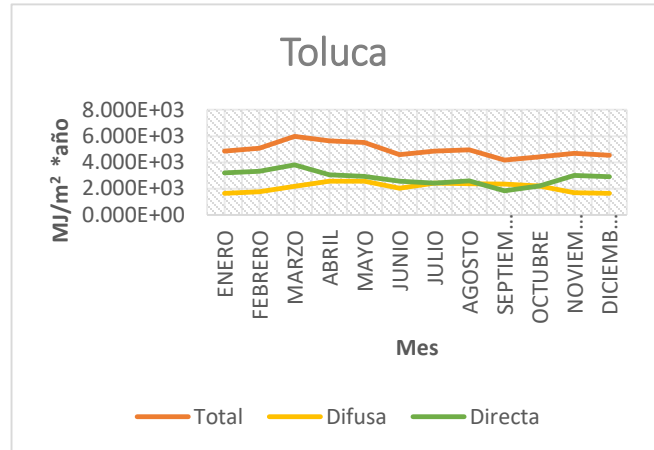
k)



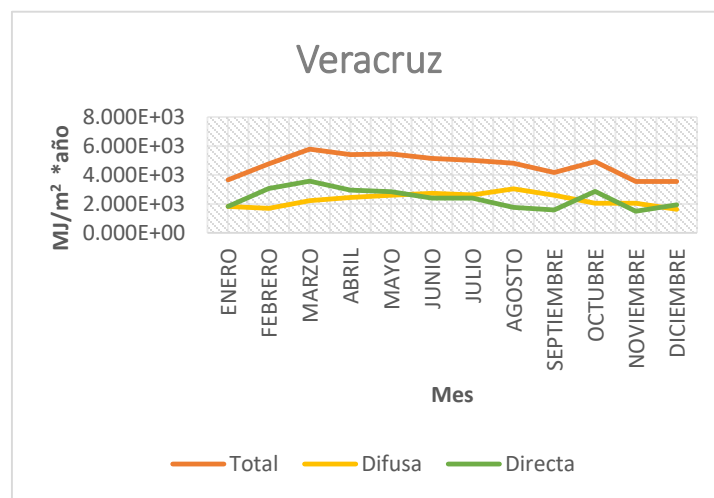
l)



m)



n)



ñ)

Fig. 2.2 Radiación anual sobre una superficie inclinada en las ciudades de estudio.

En las gráficas se puede observar que las ciudades de San Ignacio, Chihuahua, Acapulco, Guadalajara y San Felipe son las que presentan el mayor potencial para la aplicación de los sistemas de captación solar, solo considerando la radiación solar directa, difusa y total. En la Figura 2.3 se muestra en orden descendente el recurso solar en las diferentes ciudades, donde se resalta San Ignacio, Chihuahua y Acapulco, sin embargo estas tres ciudades no representan un buen lugar para la aplicación de la tecnología solar para procesos industriales ya que el nivel de industria en estas ciudades es rebasado por muchas otras a lo largo del país.

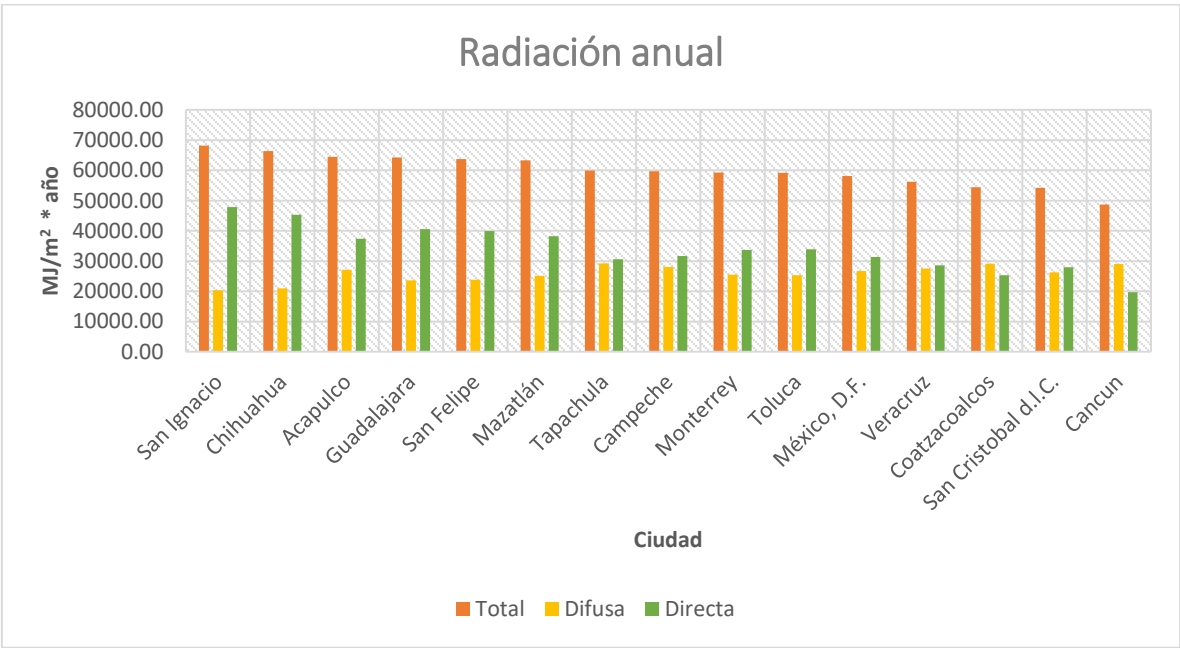


Fig. 2.3 Comparativa de la radiación anual en las ciudades de estudio.

También en la Figura 2.3 se puede observar que las ciudades de San Ignacio, Chihuahua, Guadalajara, San Felipe, Mazatlán y Acapulco son las ciudades donde la radiación directa es mayor a la difusa, por lo cual los colectores concentradores serían mejor aplicados en éstas ciudades. Mientras que en el resto de las ciudades, los colectores concentradores no serían tan factibles y los colectores planos serían una mejor opción.

Tomando en cuenta lo anterior, en la Figura 2.4 se muestra la distribución de las ciudades en el territorio nacional, de color rojo las ciudades con mayor cantidad de radiación directa, de amarillo las de menor radiación directa.

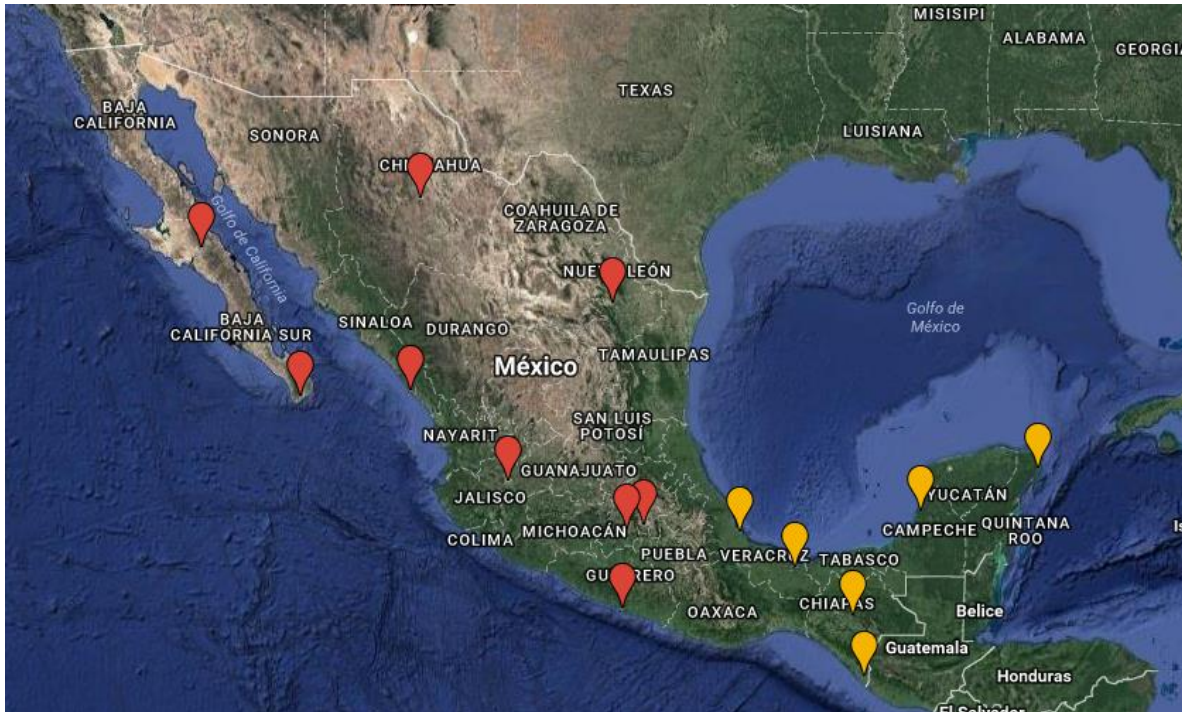


Fig. 2.4 Mapa de insolación en las ciudades de estudio.

2.2.2 Capacidad industrial en México.

La distribución de las industrias manufactureras en el país no es homogénea, su desarrollo ha tenido lugar en algunos polos. En la gráfica de la Figura 2.5 se muestra la distribución del valor agregado de la manufactura en el país con datos obtenidos en 1980, entre los que se distinguen: la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) (la cual contribuye con 48% al Valor Agregado de la Manufactura, vate), y las ciudades de Guadalajara y Monterrey (Instituto Nacional de Ecología, 1986).

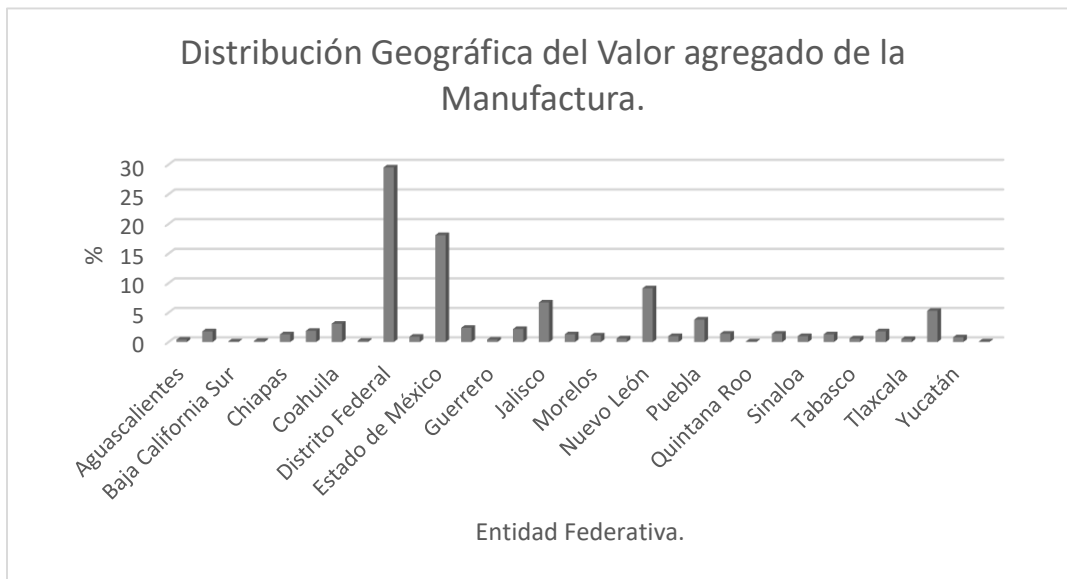


Fig. 2.5 Distribución geográfica del valor agregado de la manufactura en México (1980).

En la Figura 2.5 se observa que las entidades federativas con un mayor porcentaje de capacidad industrial en el país son la Ciudad de México (anteriormente conocido como Distrito Federal), el Estado de México y Nuevo León con 29.5%, 18.1% y 9.1% respectivamente, aunque no se encontró una referencia más actual, es visible la tendencia en lo general continua en estas tres ciudades. Los principales tipos de industria que se presentan, donde se puede aplicar este estudio son las de los sectores textil, automotriz, química, alimentos, maquiladora y productos metálicos. Aunque se podría pensar que al ser datos de hace tantos años los porcentajes han variado y podrían afectar la idea de que estas tres entidades federativas ya no son las que presentan el mayor porcentaje de capacidad industrial en el país, el artículo publicado por la revista Forbes México en 2014 titulado “5 Estados con potencial para el sector inmobiliario industrial”, afirma que estas tres entidades federativas siguen siendo las de mayor desarrollo industrial actualmente.

2.2.3 Requerimientos de la industria.

Las áreas de aplicación actuales del calor solar para procesos industriales (SHIP por sus siglas en inglés) más significativos están en: la industria alimentaria y de bebidas, las industrias textiles y químicas. Esto es, sobre todo, debido a las bajas temperaturas requeridas para los procesos en estos sectores: 30°C a 90°C, lo que permite el uso de colectores de placa plana o de colectores de tubo de vacío comercialmente disponibles que son muy eficientes en este rango de temperatura. De acuerdo con datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) muestra también que, además de los procesos de baja temperatura de hasta 80°C, también existe un potencial significativo para los procesos de la mediana temperatura que van hasta los 240°C (IEA, 2007). La Tabla 2.2 muestra a los sectores industriales con sus respectivos procesos que tienen mayor potencial para usos térmicos solares.

Tabla 2.2. Sectores y procesos industriales con mayor potencial para aplicaciones solares térmicas (ESTIF, 2006).

Sector Industrial	Proceso	Nivel de Temperatura [°C]
Alimentos y bebidas.	Secado.	30-90
	Lavado.	40-80
	Pasteurización.	80-110
	Ebullición	95-105
	Esterilización.	140-150
	Tratamiento térmico.	40-60
Industria textil.	Lavado.	40-80
	Blanqueado.	60-110
	Tintura.	100-160
Industria química.	Ebullición.	95-105
	Destilación.	110-300
	Diversos procesos químicos.	120-180
Otros sectores.	Pre calentamiento de agua de alimentación de caldera.	30-100
	Calentamiento de naves de producción.	30-80

Algunos requerimientos para procesos industriales como el precalentamiento de agua de retorno, baño de calor, calentamiento de agua y producción directa de vapor pueden observarse en la Tabla 2.3. Los requerimientos básicos para el diseño y dimensionamiento de un sistema de captación solar son: la temperatura a suministrar, la demanda diaria de calor y la tasa de flujo másico del proceso.

Tabla 2.3. Requerimientos de la industria (IEA, 2015).

Proceso.	Temperatura de suministro [°C]	Demanda diaria de calor [kWh]	Tasa de flujo másico [L/hr]
Precalentamiento de agua de reposición.	Variable (<100)	1800	5000
Baño de calor.	80	2500	6000
Calentamiento de calor (con flujo de temperatura de elevación de retorno).	130	2400	3000
Producción directa de vapor (circuito cerrado).	250	2100	variable

El precalentamiento de agua de reposición es uno de los procesos más efectuados dentro de la industria, ya sea para su uso en calderas o la generación de vapor. La temperatura de suministro es variable y menor a 100°C ya que el sistema que lo suministra no es presurizado.

Actualmente, en una industria es utilizado un calentador auxiliar (ya sea eléctrico o de gas) para el precalentamiento de agua de reposición, esta agua ya precalentada a 90 °C se almacena en un depósito de agua de alimentación que mantendrá el agua a la temperatura deseada, y cada que sea requerida se transportará por medio de una bomba hidráulica hacia la caldera de vapor para después alimentar al proceso con vapor a una temperatura y presión deseada. Cierta porcentaje del vapor producido se distribuye al depósito de agua de alimentación para mantener el agua caliente. Después de que el vapor cumple su función en el proceso dentro de la industria, un porcentaje de vapor que se haya condensado y que está a una temperatura cercana a los 90°C, regresa al depósito de agua de alimentación para volver a ser calentado.

En la Figura 2.6 se muestra un esquema de un sistema de precalentamiento convencional acoplado a un proceso de generación de vapor (IEA, 2015).

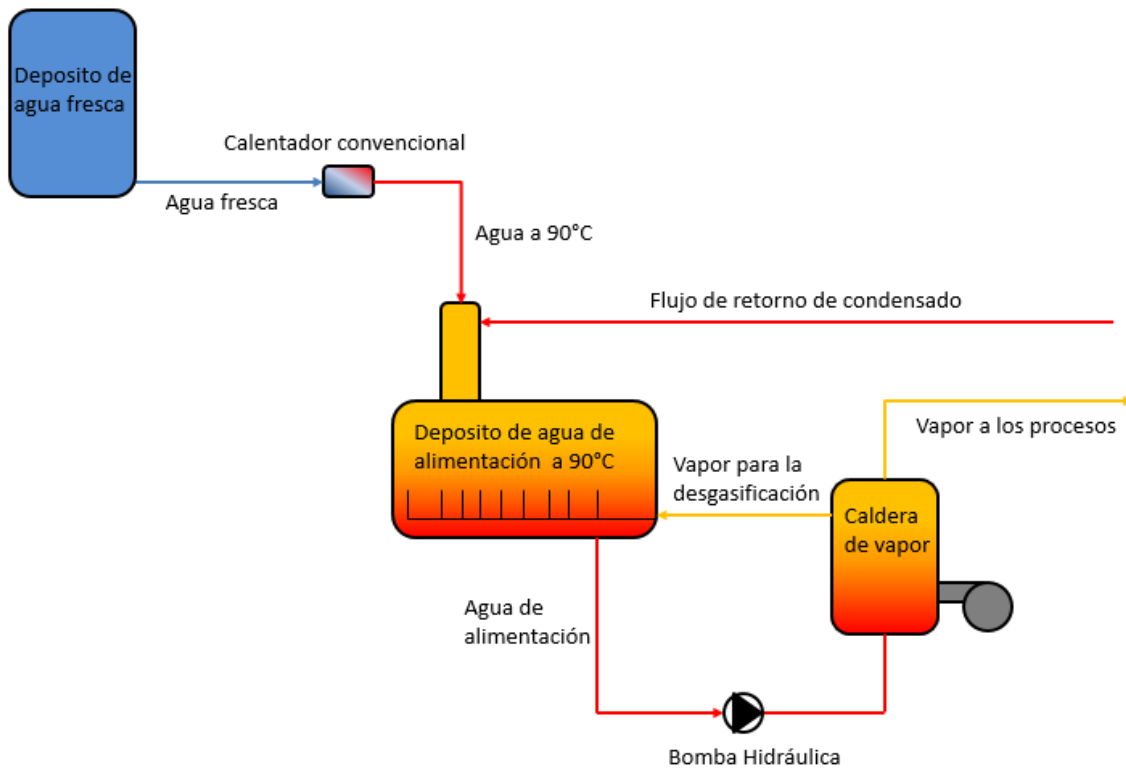


Fig. 2.6 Sistema de generación de vapor con un calentador convencional.

2.3 Modelo físico.

En la Figura 2.7 se muestra el diagrama del sistema de captación solar, propuesto en concordancia con la Agencia Internacional de Energía, que está dividido en tres circuitos: el circuito del colector, el circuito de almacenamiento y el circuito del proceso. En el circuito de colector la energía radiada por el sol es absorbida por el colector, transformada en energía térmica que es transportada por el fluido de trabajo hacia el intercambiador de calor, donde transfiere el calor al fluido de menor temperatura y regresa al colector por medio de la bomba hidráulica.

En el circuito de almacenamiento, el fluido que absorbe la energía proveniente del colector entra al tanque de almacenamiento donde el calor es almacenado y sale de él hacia el segundo intercambiador para transmitir el calor al fluido de menor temperatura que proviene del proceso, retorna al tanque de almacenamiento por medio de la bomba hidráulica a la parte inferior del mismo; el fluido de menor temperatura que se encuentra en la parte inferior del tanque va hacia el primer intercambiador para volver a empezar el ciclo a través de la segunda bomba.

En el circuito del proceso, el fluido que absorbe el calor del segundo intercambiador de calor entra a un calentador auxiliar que eleva la temperatura del agua a un nivel deseado para así integrarla al proceso, a este último punto se le conoce como punto de integración del proceso, y después de ser utilizada retorna al intercambiador de calor por medio de una bomba a cierta temperatura, donde volverá a absorber el calor que viene del circuito de almacenamiento y entrar al proceso nuevamente.

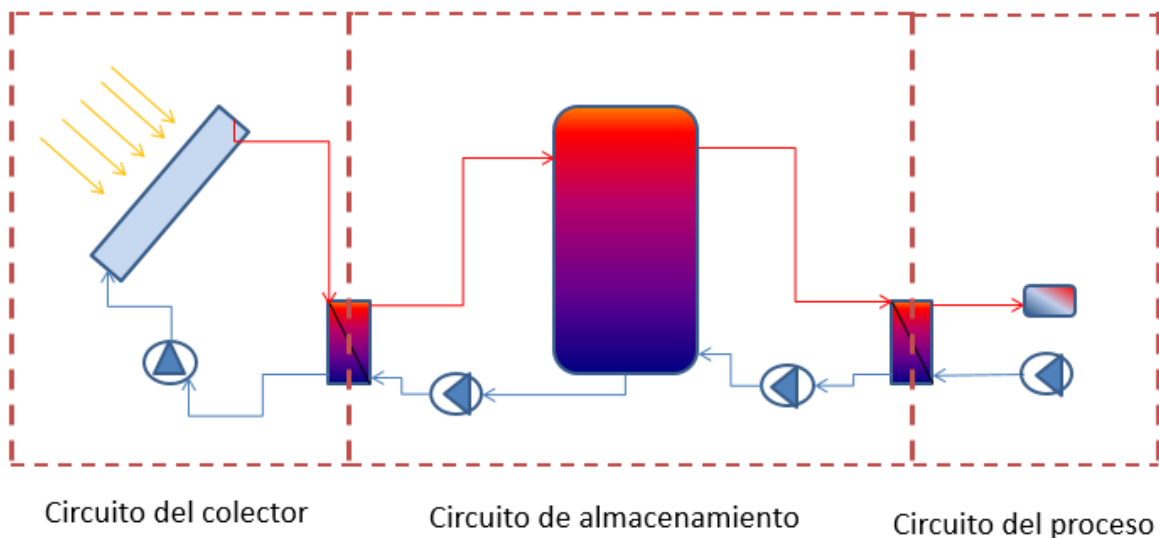


Fig. 2.7 Modelo físico.

2.4 Sistema de calentamiento solar de agua de referencia.

A continuación, se muestra un sistema de referencia de un sistema de calentamiento de agua, donde se hace la integración en el nivel de suministro de pre-calentamiento de agua de reposición a baja temperatura $<100^{\circ}\text{C}$.

El sistema de referencia que se muestra en la Figura 2.8 está compuesto por 6 diferentes elementos:

- Colector solar.
- Intercambiadores de calor.
- Tanque de almacenamiento.
- Bombas hidráulicas.
- Calentador auxiliar.
- Fluido de trabajo.

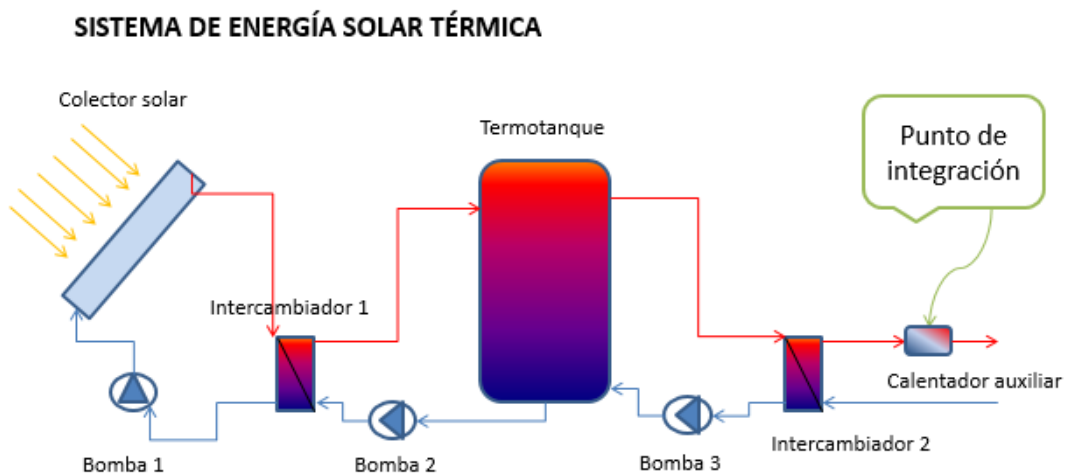


Fig. 2.8 Sistema de referencia del sistema de calentamiento solar en estudio.

El sistema de referencia es un sistema para precalentamiento de agua para calderas. El sistema está compuesto por un área de colección solar de 200 m^2 de colectores planos, dos intercambiadores de calor a contraflujo, 3 bombas hidráulicas

de 6 kW de potencia nominal y un tanque de almacenamiento de 12 m³ de volumen con 2 entradas y 2 salidas (Horta, 2015b).

2.5 Modelo matemático.

El modelo matemático del sistema de calentamiento solar se integra con una serie de modelos secuenciados obtenidos de balances de energía en cada elemento que forma el sistema de calentamiento. Los modelos de cada elemento se resuelven mediante el acoplamiento de un sistema de ecuaciones que se resuelve matricialmente. El software TRNSYS integra la matriz de manera automática y entrega los resultados en términos de temperaturas, cargas térmicas o flujos de calor. El software integra secuencialmente los distintos componentes una vez que se agregan las características de cada elemento.

Como ya se mencionó anteriormente, el sistema está compuesto por colectores solares, intercambiadores de calor, un tanque de almacenamiento y un calentador auxiliar. A continuación se describen los modelos que describen matemáticamente a cada elemento, en concordancia con el manual del software (TRNSYS 16, 2007).

2.5.1 Colectores solares.

El colector solar tiene la capacidad de transformar la radiación solar en calor, transportar el calor y cederlo a un fluido de trabajo. Para el análisis del comportamiento del colector se considera un balance energético para estado permanente, con lo cual se puede llegar a la Ecuación (2.4). En la Figura 2.9 se muestran los flujos de calor que interactúan en un colector solar.

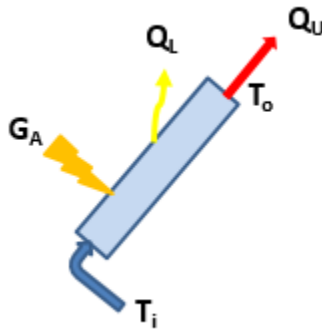


Fig. 2.9 Balance de energía en el colector solar.

$$G_A = Q_u + Q_L \left(\frac{kJ}{hr} \right) \quad (2.4)$$

donde:

G_A Cantidad de energía aportada por radiación solar.

Q_u Cantidad de calor ganado útil.

Q_L Calor perdido a los alrededores.

Despejando Q_L de la Ecuación 1 se tiene la Ecuación (2.5).

$$Q_L = G_A - Q_u \quad (2.5)$$

Por otro lado, de acuerdo a la ley del enfriamiento de Newton, y al modelo reportado en (Duffie,1989), Q_L es igual al producto del factor de remoción, el coeficiente global de pérdidas de calor, la diferencia de la temperatura media en el colector (T_{med}) y de la temperatura ambiente (T_a), que se puede escribir de acuerdo a:

$$Q_L = F_R U_L (T_{med} - T_a) \quad (2.6)$$

donde T_{med} está dado por el promedio de la temperatura de salida y de la temperatura de entrada

$$T_{med} = \frac{T_{sal} - T_{ent}}{2} \quad (2.7)$$

Sustituyendo la Ecuación (2.6) en la Ecuación (2.5) se obtiene que:

$$F_R U_L (T_{med} - T_a) = G_A - Q_u \quad (2.8)$$

Despejando el coeficiente de pérdidas térmicas ($F_R U_L$) se obtiene:

$$F_R U_L = \frac{G_A - Q_u}{T_{med} - T_a} \quad \left(\frac{kJ}{h * K} \right) \quad (2.9)$$

Un colector contiene tres coeficientes característicos para determinar su comportamiento, a_0 es el coeficiente de, a_1 y a_2 , donde a_1 es $F_R U_L$, que medido por cada metro cuadrado de colección es igual al coeficiente de pérdida de eficiencia.

$$F_R U_L \sim a_1 \quad (2.10)$$

Con el conocimiento del coeficiente de pérdidas de calor del colector (a_1) es posible determinar la eficiencia que presenta el colector, con ello se puede determinar la cantidad de Q_u presentada a la salida del colector, misma que está dada en kJ/h.

Estos coeficientes son obtenidos para la ecuación de la eficiencia de los colectores, al despejar la Ecuación (2.4) en función de la Q_u se obtiene que:

$$Q_u = G_A - Q_L \quad (2.11)$$

Cuando a Q_u se evalúa para una $\lim_{t \rightarrow \infty} Q_u$ encontramos el estado permanente de la función por lo que Q_u es igual con 0, quedando de la siguiente forma:

$$G\tau\alpha - (U_L(T_p - T_a) + Q_u) = 0 \quad (2.12)$$

Al dividir la Ecuación (2.12) entre la G obtenemos:

$$\eta = \frac{Q_u}{G} = \frac{G\tau\alpha - (U_L(T_p - T_a) + Q_u)}{G} \quad (2.13)$$

Por lo que la eficiencia es

$$\eta = F_R\tau\alpha - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{G} + \frac{F_R U_L (T_i - T_a)^2}{G} \quad (2.14)$$

donde:

$F_R\tau\alpha$ Coeficiente de ganancias a_0 .

$\frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{G}$ Coeficiente de pérdidas a_1 .

$\frac{F_R U_L (T_i - T_a)^2}{G}$ Factor de corrección a_2 .

Estos coeficientes permiten evaluar la eficiencia que presentara un colector, así como las pérdidas y su factor de corrección, con lo cual se pueden encontrar todas las incógnitas de la Ecuación (2.4) (Duffie, 1989).

2.5.2 Intercambiadores de calor.

El proceso de intercambio de calor entre dos fluidos separados por una pared sólida y que existe un diferencial de temperaturas entre ellos, ocurre con la ayuda de intercambiadores de calor. Los intercambiadores de calor a contraflujo se caracterizan por el uso de dos entradas de fluido en lados opuestos, además de dos salidas, cómo se observa en la Figura 2.10, está configuración mantiene la transferencia de calor entre las partes más calientes de los dos fluidos en un extremo, así como entre las partes más frías en el otro. El intercambiador de calor recibe una temperatura de entrada de fuente caliente (T_{hot1}) y otra de una fuente fría (T_{cold2}) y en consecuencia por el proceso de intercambio de calor este dispositivo tiene como salidas una fuente fría para el lado 1 del intercambiador (T_{cold1}) y una fuente caliente para la salida del lado 2 del intercambiador (T_{hot2}).

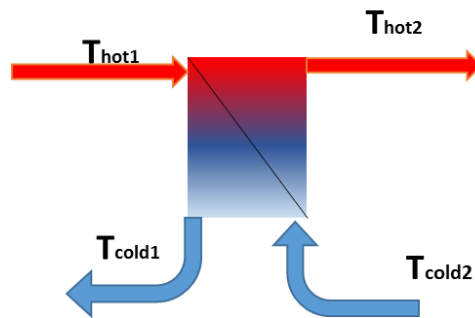


Fig.2.10 Temperaturas de entradas y salidas en el intercambiador de calor.

El análisis de intercambiadores de calor se desarrolla para determinar el coeficiente global de transferencia de calor, UA , el cual está dado por la Ecuación (2.15).

$$R_{Tot} = \frac{1}{UA} \quad (2.15)$$

Este coeficiente se determina al tener en cuenta las resistencias de conducción y convección en los fluidos de trabajo separados por paredes planas y cilíndricas compuestas, respectivamente.

Para el diseño o selección de un intercambiador de calor, es necesario relacionar la transferencia de calor total directamente como una función de las temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo, el coeficiente global de transferencia de calor, y el área superficial total para transferencia de calor. Estas relaciones son obtenidas aplicando balances globales de energía a los fluidos (caliente y frío), y se obtiene las ecuaciones (2.16) y (2.17) para un fluido caliente y frío respectivamente como se ilustra en la Figura 2.11.

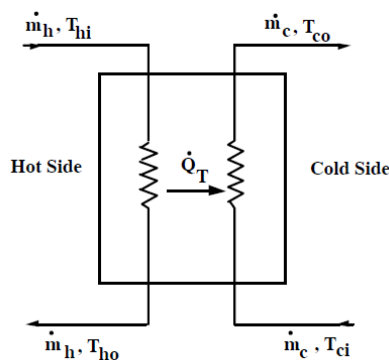


Fig. 2.11 Esquema de funcionamiento de un intercambiador de calor (TRNSYS 16, 2007).

$$q = \dot{m}_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (2.16)$$

$$q = \dot{m}_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci}) \quad (2.17)$$

donde:

\dot{m} Flujo másico.

C_p calor específico constante para el fluido de trabajo.

T temperatura media del fluido en las posiciones que se señalan.

El subíndice h es para un fluido caliente, el subíndice c para un fluido frío; los subíndices i y o se refiere a las condiciones de entrada y salida respectivamente. Sin embargo, como las temperaturas medias (ΔT_m) varían respecto de la posición en el intercambiador de calor, es necesario trabajar con una ecuación de flujo de la forma

$$q = UA\Delta T_m \quad (2.18)$$

donde ΔT_m es la diferencia de temperaturas media para una media apropiada.

La eficiencia en un intercambiador de calor está relacionada con la transferencia de calor máxima posible, $q_{m\acute{a}x}$, para el intercambiador. La cual para un intercambiador de calor de tipo contraflujo, uno de los fluidos experimentarí la diferencia máxima de temperatura, $T_{hi} - T_{ci}$. Para lo cual se debe suponer que en una situación $C_c < C_h$ en donde $|dT_c| > |dT_h|$ y C_c está dado por el producto del flujo másico y la C_p del fluido frío. El fluido experimentarí entonces el cambio más grande de temperatura, en consecuencia se definirían las transferencia de calor máxima posible como

$$C_c < C_h \quad q_{m\acute{a}x} = C_c(T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.19)$$

De manera similar, si $C_h < C_c$, el fluido caliente experimentarí el cambio de temperatura más grande y se enfriaría a la temperatura de entrada del fluido frío ($T_{ho} = T_{ci}$). Por lo tanto, la Ecuación (2.19) pasa a ser

$$C_h < C_c \quad q_{m\acute{a}x} = C_h(T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.20)$$

A partir de esto, se sugiere la expresión general de la transferencia máxima de calor posible cómo

$$q_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n}(T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.21)$$

donde $C_{m\acute{i}n}$ es igual a C_c o C_h según cual sea el menor.

Entonces es posible definir la eficiencia ε como la razón entre la transferencia real de calor para un intercambiador de calor y la transferencia de calor máxima posible.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} \quad (2.22)$$

De las ecuaciones 2.16), (2.17) y (2.21), se tiene que

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{co} - T_{ci})}{C_{m\acute{i}n}(T_{hi} - T_{ci})} \quad (2.23)$$

A partir del conocimiento de la eficiencia y las temperaturas de entrada, es posible determinar la transferencia de calor real a través de la Ecuación (2.24)

$$q = \varepsilon C_{m\acute{i}n}(T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.24)$$

La relación de eficiencia definida para un intercambiador de tipo contraflujo está dada por la ecuación

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{UA}{C_{m\acute{i}n}}\left(1 - \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}}\right)\right]}{1 - \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}} * \exp\left[-\frac{UA}{C_{m\acute{i}n}}\left(1 - \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}}\right)\right]} \quad (2.25)$$

Para la determinación de las temperaturas de trabajo es necesario realizar una lectura de las temperaturas de los fluidos de entrada, en el modelo actual estas temperaturas son obtenidas de la salida del colector y la entrada por la bomba, para cada parámetro de tiempo se debe realizar una integración constante para conocer las temperaturas de salida.

Los flujos de calor para cada punto son dados por las Ecuaciones (2.16) y (2.17), y son totalmente dependientes del conocimiento de las temperaturas de salida del fluido.

2.5.3 Termotanque estratificado.

El termotanque es el elemento encargado del almacenamiento de la energía del fluido de trabajo, el rendimiento térmico de un tanque de almacenamiento de energía sujeto a estratificación térmica, puede ser modelado por el supuesto de que el tanque se compone de N ($N \leq 100$) segmentos de volumen igual completamente mezclados. El grado de estratificación se determina por el valor de N . Si N es igual a 1, el tanque de almacenamiento se modela como un tanque totalmente mezclado y no hay efectos de estratificación.

Un termotanque característico cuenta con dos entradas de temperatura y dos salidas, de manera similar que un intercambiador de calor. Como se puede ver en la Figura 2.12, en la cual se nota que las dos entradas son presentadas con las variables $T_{in, h}$ y $T_{out, c}$, las cuales son entrada de fluido caliente y entrada de fluido frío respectivamente, también, las salidas se denotan con la terminación de salida fría y salida caliente. Su procedimiento de trabajo es similar al de un intercambiador de calor de contraflujo, debido a que la temperatura de salida de la parte superior es más caliente que la salida de temperatura en la parte fría.

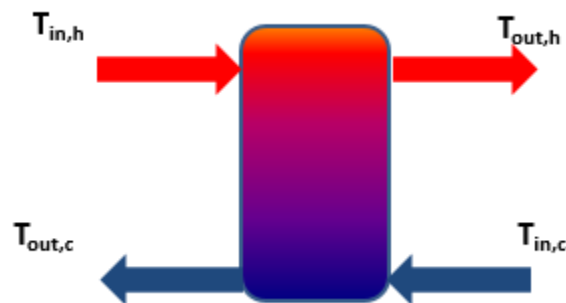


Fig. 2.12 Temperaturas de entradas y salidas en el termotanque.

Mediante la Ecuación (2.26) de balance se representa la forma de intercambio de calor dentro de un termotanque.

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c \quad (2.26)$$

donde:

\dot{Q}_h Calor total del lado caliente.

\dot{Q}_c Calor total de la parte fría.

\dot{Q}_h y \dot{Q}_c están dadas por las ecuaciones (2.27) y (2.28), respectivamente.

$$\dot{Q}_h = \dot{m}C_p(T_{in,h} - T_{out,h}) \quad (2.27)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}C_p(T_{out,c} - T_{in,c}) \quad (2.28)$$

Debido a que el termotanque es un elemento al cual se le establece una temperatura predeterminada T_s , esta temperatura define la carga de calor total presente en todo el dispositivo, mediante la ecuación:

$$\dot{Q}_s = (\dot{m}C_p)_s \Delta T_s \quad (2.29)$$

Un termotanque estratificado requiere de un análisis por cada capa del mismo, en la cual el balance a realizar debe contemplar ciertos elementos como se muestra en la Figura 2.13, en la cual, se ilustra la necesidad de tomar en cuenta la cantidad de calor de pérdidas al medio ambiente (Q_{per}) dentro del balance para cada capa de estratificación.

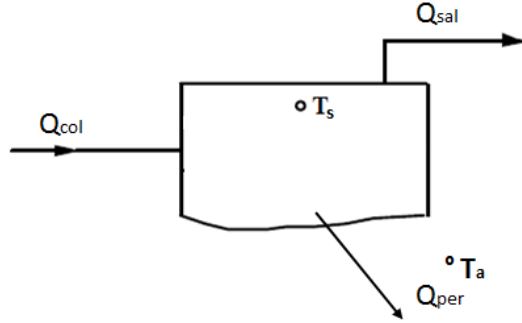


Fig. 2.13 Balance de energía en un nodo del termotanque estratificado.

Contemplando las pérdidas al ambiente se obtiene:

$$Q_{per} = (UA)_s(T_s - T_a) \quad (2.30)$$

donde:

$(UA)_s$ Coeficiente global de transferencia de calor dado por la Ecuación (2.15).

T_s Temperatura de trabajo deseada del termotanque.

T_a Temperatura ambiente.

El balance para el nodo analizado, se representa con la siguiente ecuación:

$$(\dot{m}C_p)_s \frac{dT_s}{dt} = Q_{col} - Q_{sal} - Q_{per} \quad (2.31)$$

donde $(\dot{m}C_p)_s \frac{dT_s}{dt}$ está dada por la temperatura establecida de control del termotanque y representa el calor almacenado por un período de tiempo dt .

2.5.4 Calentador eléctrico auxiliar.

Los calentadores eléctricos auxiliares son dispositivos que elevan la temperatura de un fluido utilizando un controlador interno, externo o ambos, el cual aumenta o disminuye la cantidad de potencia (Watts) necesarios para llevar a una temperatura

establecida al sistema que se trabaja. El esquema del funcionamiento general de un calentador eléctrico se ilustra en la Figura 2.14.

El sistema presenta dos entradas y dos salidas. La característica es una temperatura de entrada y la potencia de para obtener la temperatura a la descarga que se desea contemplando la cantidad de calor perdido al ambiente.

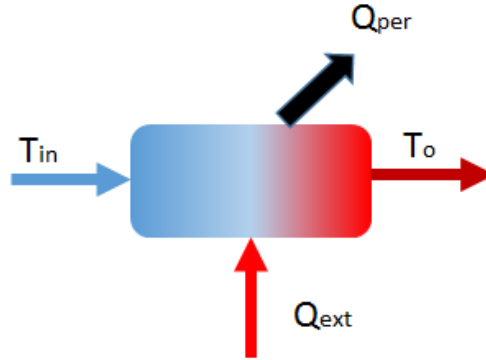


Fig. 2.14 Temperaturas y flujos de calor en las entradas y salidas en un calentador auxiliar eléctrico.

La ecuación que define el balance termodinámico del calentador eléctrico está dado por la ecuación:

$$Q_{ext} = Q_{fluido} - Q_{per} \quad (7.32)$$

donde Q_{ext} está dado por la ecuación (2.33).

$$Q_{ext} = \frac{\dot{m}C_{pf}(T_{des} - T_{in}) + UA(T_{med} - T_a)}{\eta_{calen}} \quad (7.33)$$

donde $\dot{m}C_{pf}$ son el flujo másico y el calor específico del fluido de trabajo, T_{des} es la temperatura de salida deseada, T_{in} es la temperatura de entrada, UA es el coeficiente de transferencia de calor, η_{calen} la eficiencia del calentador y T_{med} está dado por la ecuación:

$$T_{med} = \frac{T_{des} + T_{in}}{2} \quad (7.34)$$

El calor de pérdidas (Q_{per}) de la Ecuación (2.32) está definido por:

$$Q_{per} = UA(T_{med} - T_a) + (1 - \eta_{calen})\dot{Q}_{m\acute{a}x} \quad (7.35)$$

donde $\dot{Q}_{m\acute{a}x}$ es la máxima cantidad de calor que puede aportar el calentador auxiliar.

El calor del fluido dentro del calentador auxiliar está dado por la Ecuación (2.36):

$$Q_{fluid} = m_o C_{pf} (T_o - T_i) \quad (7.36)$$

donde T_o es:

$$T_o = \frac{\dot{Q}_{max}\eta_{calen} + \dot{m}C_{pf}T_{in} + UAT_{env} - \frac{UAT_{in}}{2}}{\dot{m}C_{pf} + \frac{UA}{2}} \quad (7.17)$$

Al ser T_o la variable de control la eficiencia del calentador (η_{calen}) y la cantidad máxima de calor que puede aportar el calentador (\dot{Q}_{max}) son completamente dependientes de esta variable de salida.

2.5.5 Razón de Uso y razón de volumen

Para poder realizar un diseño adecuado de un sistema de captación solar, es necesario realizar un cálculo de proporciones entre las relaciones de área y volumen de los elementos del sistema de colección, para ello es necesario conocer el índice de demanda de fluido dada en litros/día o bien en m³/día (Horta, 2015a).

La razón de uso RU , se determina con los litros de fluido que pasaran por cada m² de área de colección, esta razón está dada en l/día* m² y se representa por la ecuación:

$$RU = \frac{Demanda}{A_c} \quad (7.38)$$

donde A_c es el área de colección del sistema planteado. Es muy común el adaptar las áreas de acuerdo a la razón de uso deseada, para ello la Ecuación (2.38) se modifica y queda como

$$A_c = \frac{Demanda}{RU} \quad (7.39)$$

Con el conocimiento del área de colección, es necesario ubicar una razón volumétrica (R_v), en términos de los litros de almacenaje por área de colección, misma que se expresa en términos de (l/m^2).

$$R_v = \frac{V_T}{A_c} \quad (7.40)$$

Con el conocimiento de la razón volumétrica deseada se establece la relación para encontrar la razón de volumen más adecuada, dada por la ecuación

$$V_T = A_c * R_v \quad (7.41)$$

Con el conocimiento de estos parámetros demanda, razón de uso y razón volumétrica se obtiene un esquema del rendimiento que presentarán los sistemas de colección para áreas y volúmenes varios, por lo que la evaluación de los sistemas completos es más fácil de identificar de manera gráfica.

La Fracción Solar FS , es la cantidad de energía solar obtenida a través de la tecnología solar utilizada, dividido por el total de la energía requerida, la cual se representa en la Ecuación (2.41) (IEA, 2015).

$$FS = \frac{Q_{HX}}{Q_{HX}+Q_H} \quad (7.42)$$

donde:

Q_{HX} es la energía que aporta el sistema obtenida a través de la tecnología solar.

Q_H es la energía que aporta el calentador auxiliar.

La energía Q_{HX} es medida en la salida del lado 2 del segundo intercambiador de calor (Ecuación (2.17)) y la energía Q_H es la energía que requerida por el calentador auxiliar para calentar al fluido a la temperatura deseada (Ecuación (2.33)).

La Fracción Solar oscila entre 0 (ninguna utilización de la energía solar) y 1.0 (toda la energía que se necesita se obtiene del sistema). La FS de un sistema particular depende de muchos factores, como la carga, las dimensiones de los captadores y acumuladores, el funcionamiento y el clima.

Estos parámetros obtenidos, principalmente la razón de uso, la razón volumétrica y la fracción solar, son los que dan la pauta para seleccionar el diseño óptimo del sistema de captación solar.

Capítulo 3

Solución del modelo matemático

En este capítulo se establece una estrategia de diseño de sistemas de captación solar y se desarrolla la solución del modelo matemático haciendo una descripción del simulador TRNSYS, planteando la configuración del sistema de referencia en la plataforma de simulación y verificando lo desarrollado.

3.1 Estrategia de diseño.

La estrategia utilizada para el diseño del sistema de captación solar de mediana temperatura se muestra en la Figura 3.1. El Paso 1 de la estrategia, o metodología, de diseño es la obtención de las condiciones climáticas y el recurso solar de las ciudades de estudio, analizar el potencial industrial de México y los requerimientos de la industria; este paso está descrito en la Sección 2.1 de la tesis.

El Paso 2 es establecer un sistema de referencia y llevar a cabo su simulación en la plataforma de TRNSYS, el sistema de referencia se estableció en la Sección 2.3 y la simulación se describe en la Sección 3.3 de esta tesis.

El Paso 3 es la verificación del correcto funcionamiento del sistema de referencia, realizando balances de energía y una comparativa con datos de referencia. Si la verificación del sistema no se consigue, se regresa al Paso 2 realizando unas adecuaciones al sistema para alcanzar los parámetros deseados o bien estableciendo un nuevo sistema de referencia, de lo contrario, se continúa con el Paso 4.

El Paso 4 es la optimización del sistema de referencia variando el flujo másico en las bombas 1 y 2 del sistema, encontrando cual es el flujo que permita obtener la fracción solar más elevada.

A continuación, se prosigue con el Paso 5 que es la selección de 3 ciudades del país con mayor potencial industrial, para llevar a cabo las simulaciones del sistema de referencia con las condiciones climáticas de estas ciudades y realizar el diseño con base a ellas. En el Paso 6 se realizan las tablas gráficas de diseño, las cuales son una herramienta para visualizar de una mejor manera el comportamiento del sistema con diferentes valores en los parámetros de entrada y son de utilidad para seleccionar el sistema óptimo en cuanto a Fracción Solar, Razón de uso y Razón volumétrica.

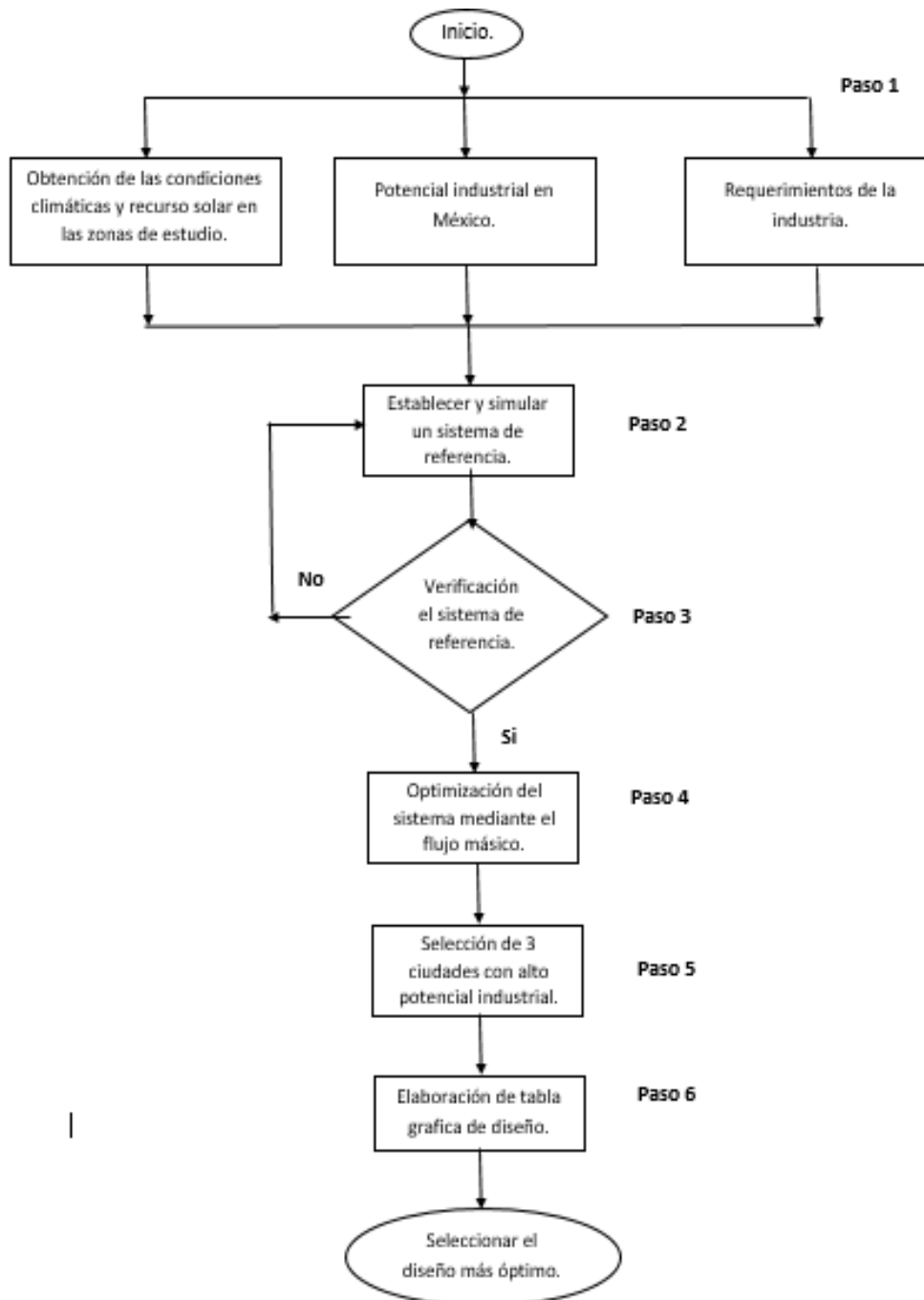


Fig.3.1 Diagrama de flujo de la estrategia utilizada en el diseño del sistema de captación solar.

3.2 Descripción del funcionamiento del simulador.

El software TRNSYS es un programa de simulación transitoria que se compone de dos partes. La primera es un motor (llamado el *kernel*) que lee y procesa el archivo de entrada, iterativamente resuelve el sistema, determina la convergencia y traza variables del sistema. El núcleo (o motor) también proporciona utilidades que (entre otras cosas) determinan las propiedades termofísicas, invierten matrices, realizan regresiones lineales e interpolan archivos de datos externos.

La segunda parte de TRNSYS es una extensa biblioteca de componentes, cada uno de los cuales modela el rendimiento de una parte del sistema. La biblioteca permite que los componentes del sistema representados sean seleccionados como proformas para interconectarlos de cualquier manera a partir del ingreso de datos de entrada los cuales se irán relacionando con datos de salida deseados, estos pueden ser información de entrada para otros módulos, lo cual genera una relación cíclica que apoya el análisis en el software.

En TRNSYS los componentes son denominados *Types*, son complementados con el uso de un número que hace alusión a un tipo particular de componente. Los componentes empleados para la simulación del sistema modelado se describen a continuación.

3.3 Simulación del sistema de referencia.

El sistema de referencia se simula en TRNSYS inter-relacionando los componentes del sistema con la ayuda de ligas que permiten especificar qué acción ejecuta cada parte del proceso.

En la construcción de la plataforma, primero se seleccionaron los *Types* que corresponden a cada uno de los elementos *p* y se introducen en una nueva estrategia, como se muestra en la Figura 3.2.

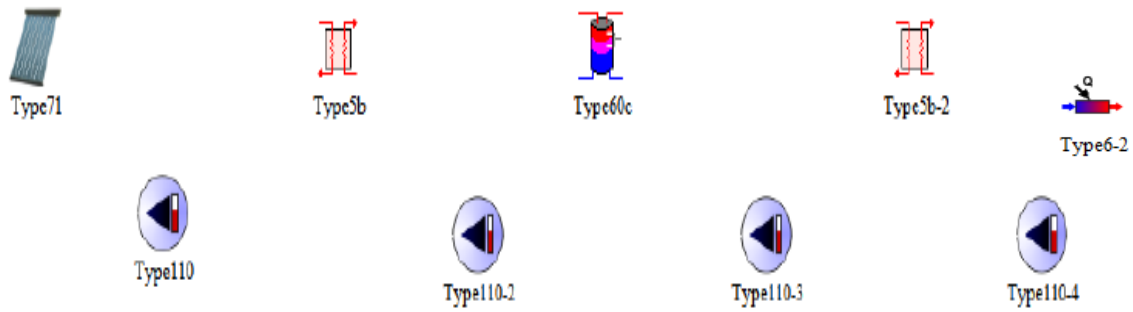


Fig.3.2 *Types* de los elementos principales del sistema en TRNSYS.

Una vez que se introducen los *Types* de los elementos, se agrega una ecuación que se nombra “Process”, que permite simular el flujo de agua que se suministra al proceso. Seguido, se ligan los *Types* para crear los circuitos del sistema como se muestra en la Figura 3.3.

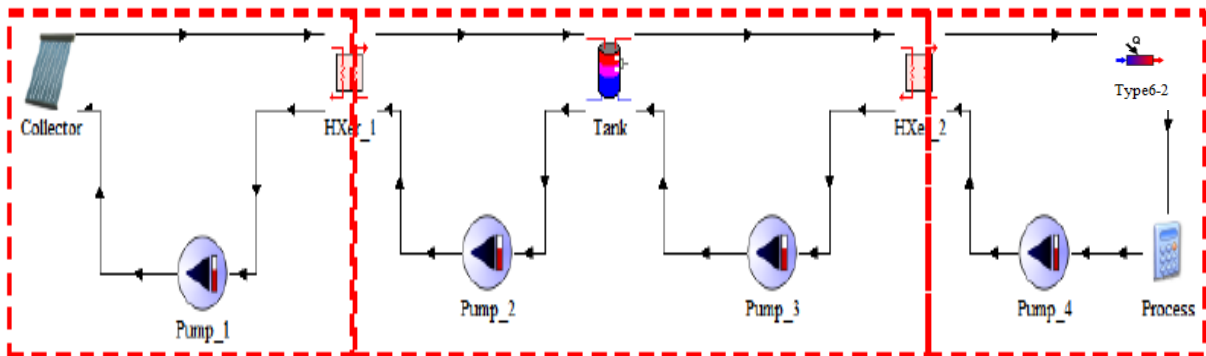


Fig.3.3 Circuitos del sistema de referencia en TRNSYS.

Los *Types* se ligan para relacionar las entradas y salidas entre los diferentes elementos. En el circuito del colector, se introduce el *Type15-2* en el tiene la base de datos climáticos que se liga al *Type71* como se observa en la Figura 3.4.

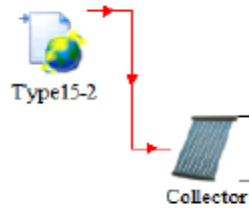


Fig.3.4 *Type15-2* ligado al *Type71*.

El *Type14* es el encargado de proporcionar los datos de la carga de demanda de agua del proceso y se liga a la bomba 4, el cual se observa en la Figura 3.5.

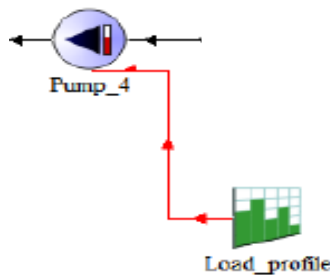


Fig.3.5 *Type14* del perfil de carga en el circuito del proceso.

El sistema de control regula el uso de la bomba. Cuando el proceso está en un óptimo desempeño, el sistema de control tiene la capacidad de impedir o dar paso al uso de las bombas, monitoreando las temperaturas de salida en el colector y en el tanque de almacenamiento. Los controladores de las bombas se simulan con el *Type2b* que es un controlador diferencial por temperaturas y fueron nombrados “collector_controller” y “process_controller” para las bombas 1, 2 y 3, 4 respectivamente. También, se utiliza una nueva ecuación nombrada “pump3_controller” que censa y determina los puntos de ajuste de los elementos a controlar. En la Figura 3.6 se muestra la configuración en su conjunto para el modelo de referencia.

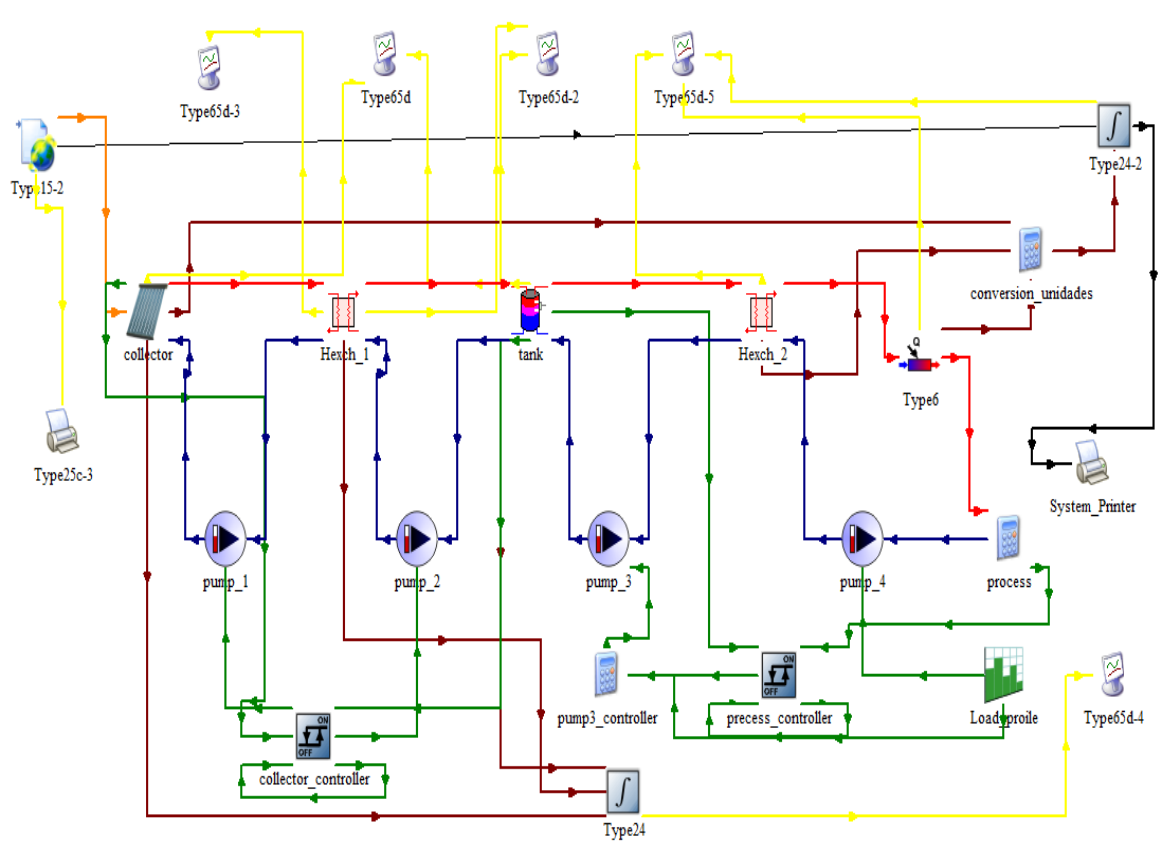














Fig.3.6 Configuración del sistema de referencia en TRNSYS.

La simbología y nomenclatura de los elementos utilizados en la simulación en TRNSYS se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Componentes empleados en el sistema de referencia.

Componentes	Tipo	Características	Simbología
Colector.	Type71	Colector de placa plana.	 Collector
Intercambiador de calor.	Type5b	Contraflujo.	 HXer_1
Calentador auxiliar (heater).	Type6	Set Point 90°C.	 Type6
Perfil de carga.	Type14	Carga de demanda de agua.	 Load Profile
Bomba hidráulica	Type110	Bomba de velocidad variable.	 Pump_4
Termotanque.	Type60	Estratificado, vertical y pérdidas uniformes.	 Tank
Base de datos climáticos.	Type15-2	TMY-2	 Type15-2
Controlador de setpoints.	Process	Censa y determina set points (punto de ajuste) de elementos deseados a controlar.	 Process_
Controlador On-Off.	Type2	Genera una señal de control de encendido o apagado.	 Collector_control
Integrador.	Type24-2	Integra la energía por año.	 Type24-2
Impresora.	Type25c	Representa en una hoja de Excel las variables de análisis.	 System_Printer
Graficador.	Type65c	Representa de manera gráfica las variables deseadas para su análisis.	 Type65d-3

Los parámetros de los componentes para llevar a cabo la simulación del sistema de referencia se describen en las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 (IEA, 2015). Las características del colector solar se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Características del colector.

Colector solar		
Tipo	Placa Plana	
Área de colectores	200 m ²	
Fluido de transferencia por el colector	Agua/Glicol con Cp= 3.7 kJ/(m ² K)	
Eficiencia de intercepción (eta_0)	0.811	
Ángulo azimutal	Frente al Ecuador	
Ángulo de inclinación	19° (México)	40° (Graz, Austria)

Los intercambiadores de calor presentan un coeficiente de transferencia de calor de 24000 W/K, por el intercambiador de calor 1 se hace pasar el agua/glicol por un extremo y en el segundo intercambiador únicamente se emplea agua como fluido de trabajo. Los valores de C_p para cada fluido son presentados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Calores específicos de los fluidos de trabajo.

Fluido de trabajo	C_p
Agua/Propilenglicol	3.7 kJ/(kg*K)
Agua	4.19 kJ/(kg*K)

Los parámetros de las bombas hidráulicas utilizadas fueron el fluido de trabajo, su capacidad, potencia nominal, eficiencia de bomba y motor son presentados en la Tabla 3.4 para cada bomba utilizada.

Tabla 3.4. Características de las bombas hidráulicas.

Bomba	Fluido de trabajo	Capacidad (kg/hr)	Potencia Nominal (kW)	Eficiencia total de la bomba	Eficiencia del motor
1	Agua/Propilenglicol	6000	6	0.6	0.9
2	Agua	6000	6	0.6	0.9
3	Agua	5000	5	0.6	0.9
4	Agua tratada	5000	5	0.6	0.9

El termotanque utilizado es de tipo cilindro vertical de pérdidas uniformes con 2 entradas y 2 salidas tipo (Type60C). La capacidad de 12 m³ y una altura de 3 m. El fluido de trabajo del tanque es agua con C_p de 4.19 kJ/(kg*K) y un coeficiente de pérdida térmica en el tanque de 0.833 kJ/(h*m²*K).

El perfil de carga de agua está definido por la siguiente relación mostrada en la Figura 3.7.

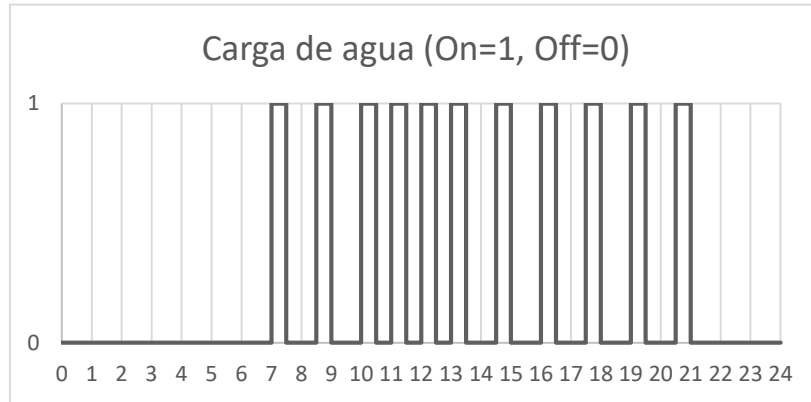


Figura 3.7. Perfil de carga considerando control On-Off en pasos de tiempo pre-seleccionados.

El sistema propuesto cumple con la necesidad de demanda de 25 m³ diarios de agua tratada a 90°C para su incorporación al proceso industrial.

La simulación del sistema de referencia se llevó a cabo, con los parámetros establecidos anteriormente, evaluando su funcionamiento con las condiciones climáticas y de recurso solar de la ciudad de Graz, Austria, Obteniendo la fracción solar mensual del sistema. La *FS* mensual de la ciudad de Graz, Austria se visualiza en la Figura 3.8.

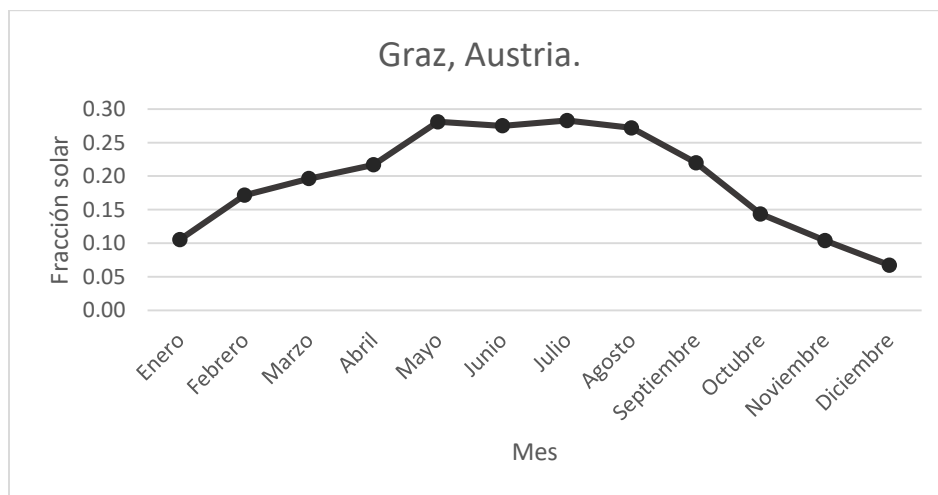


Fig.3.8. Fracción solar mensual del sistema de referencia en la ciudad de Graz.

En la Figura 3.8 puede observarse que los meses de mayo y julio, son donde el sistema de referencia alcanzó las fracciones solares más elevadas, alcanzando un valor 0.28 en ambos meses.

3.3.1 Verificación del simulador.

Una vez que se realizó la simulación de él sistema de referencia en la plataforma TRNSYS para el análisis de su funcionamiento, el siguiente paso de la metodología de simulación es la validación de los resultados obtenidos, por medio de un análisis de balance de energía. Para realizar el análisis se seleccionó el día 15 de abril debido a que este mes es uno de los dos en los cuales el sistema proporciona la fracción solar más alta, y en un periodo de las 13:00 hrs a las 13:20 hrs que es donde mayor insolación se presentó en la ciudad de Graz.

3.3.2 Balance de energía.

En la Figura 3.9 se ilustra el balance de energía realizado para el colector, intercambiador de calor y termotanque. El balance dentro del colector está dado en términos de MJ/h para la energía irradiada por el sol (G_a), la energía útil o aprovechada (Q_u) y la cantidad de energía cedida al ambiente (Q_p) en el período de tiempo mencionado anteriormente. Los resultados ilustrados en la Figura 3.10 muestran que la Ecuación 2.1 se cumple, ya que la suma de la energía útil y la energía cedida al ambiente, es la energía irradiada por él sol que llega a la superficie del colector.

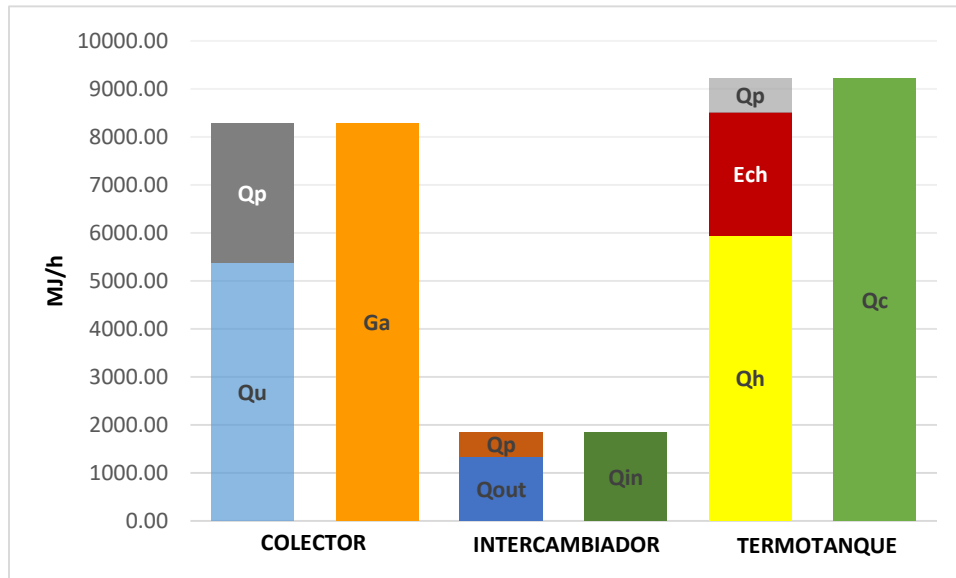


Fig.3.9 Balance energético en el colector, intercambiador de calor y termotanque.

En el balance realizado en el intercambiador se ilustra la energía evaluada en la parte caliente del intercambiador (Q_{in}), también, se muestra la cantidad de energía evaluada por la parte fría (Q_{out}) la cual es la energía de salida al termotanque y la cantidad de energía de pérdidas al ambiente. El balance mostrado demuestra que la primera ley de la termodinámica se cumple para el intercambiador de calor, debido a que la energía de entrada Q_{in} es igual a la suma de Q_{out} y Q_p , con lo que se observa un buen comportamiento de la herramienta codificada en TRNSYS en el intercambiador de calor.

En el termotanque se obtuvieron datos de la potencia de la fuente de alimentación caliente del tanque (Q_h), la fuente de alimentación fría (Q_c), la potencia cedida al ambiente (Q_p) y el cambio de energía sufrida por el termotanque (E_{ch}). La potencia obtenida en la salida de Q_c demuestra una pérdida de energía considerable en el sistema, lo cual significa que para el momento evaluado, el tanque estará perdiendo parte de su energía interna para aportarla al sistema dejando un déficit de energía en el tanque.

3.3.3 Verificación con datos de referencia.

Los resultados obtenidos de la simulación se compararon con datos de referencia reportados por la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2015). Esta simulación se realizó para una razón volumétrica de 15 l/m^2 –año, cumpliendo una demanda de $25 \text{ m}^3/\text{día}$ a una temperatura de 90°C y variando el radio de uso desde 25 a $200 \text{ l/m}^2\text{-día}$, para la ciudad de Graz, Austria.

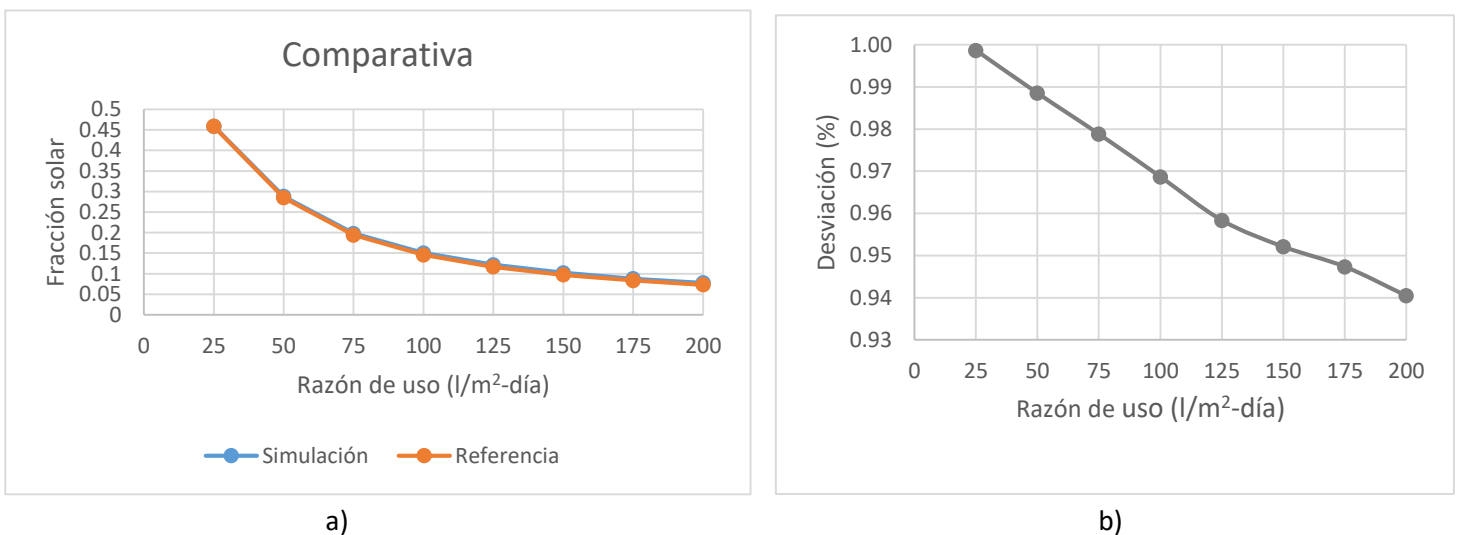


Fig.3.10 Comparativa y desviación entre la simulación realizada y los datos de referencia.

En la Figura 3.10 se puede observar que la diferencia entre la simulación realizada con los datos de referencia fue menor al 1.0%, con lo que se observó concordancia. También, la concordancia se apreció con el cumplimiento del balance de energía, en la Sección 3.3.2, donde no se observaron desviaciones.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas, el comportamiento del sistema de referencia en las 15 ciudades de estudio, el análisis de variación de flujo de las bombas 1 y 2, así como el diseño y dimensionamiento de un sistema de captación solar considerando las condiciones climáticas de Ciudad de México, Toluca de Lerdo y Monterrey.

4.1. Potencial en México con el sistema de referencia.

La simulación del sistema de referencia se llevó a cabo, con los parámetros establecidos anteriormente, evaluando su funcionamiento con las condiciones climáticas y de recurso solar de cada una de las ciudades de estudio. El cálculo de la energía total que el sistema suministra al proceso se realizó y la energía que el sol proporciona al proceso se obtuvo anualmente para obtener la fracción solar anual del sistema. Los valores obtenidos en cada una de las ciudades pueden observarse en la Tabla 4.1 y de manera gráfica en la Figura 4.1 agrupando las ciudades de acuerdo al tipo de clima que domina en ellas.

Tabla 4.1. Valores anuales de la energía útil y la fracción solar.

CIUDAD	Q_H [MWh/año]	Q_{HX} [MWh/año]	FRACCIÓN SOLAR
Acapulco	579	309	0.35
Campeche	595	294	0.33
Cancún	657	232	0.26
Chihuahua	567	321	0.36
Coahuila	631	258	0.29
Guadalajara	597	291	0.33
Mazatlán	580	309	0.35
Ciudad de México	626	263	0.30
Monterrey	605	284	0.32
San Cristóbal d.l.C.	655	234	0.26
San Felipe	575	314	0.35
San Ignacio	539	350	0.39
Tapachula	599	290	0.33
Toluca	642	246	0.28
Veracruz	621	267	0.30

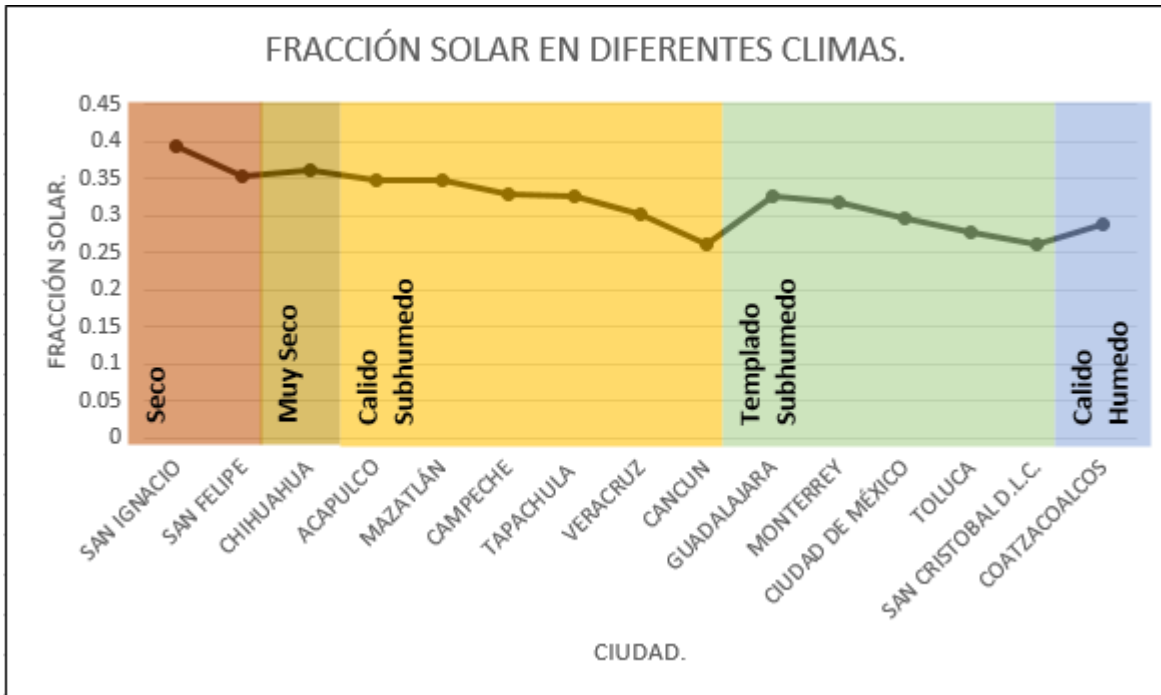


Fig.4.1 Fracción solar anual del sistema de referencia en las ciudades de estudio.

En la Figura 4.1 se observa que San Ignacio, Chihuahua y San Felipe fueron las ciudades donde se presentó mayor fracción solar en un intervalo de 0.39-0.35, mientras que Coatzacoalcos, San Cristóbal de las Casas y Cancún fueron las menos favorecidas, en un intervalo de 0.29-0.26.

4.2. Optimización de razón de flujo.

Con el fin de obtener una fracción solar mayor del sistema, se realizaron cambios en los flujos máxicos de las primeras dos bombas, para razones volumétricas de 10, 20 y 50 l/m²-año. En el sistema de referencia se utilizó un flujo de 30 kg/h-m², dando un flujo máxico de 6000 kg/h en las dos primeras bombas hidráulicas. Para esto, se realizaron simulaciones del sistema de referencia variando el flujo máxico de 1.0 a 40.0 kg/h-m² y el área de colección de 125-1000 m². Se consideró, para realizar estas simulaciones, las condiciones climáticas de la Ciudad de México ya que es la entidad federativa con mayor potencial industrial.

En la Figura 4.2 se observa el comportamiento de la fracción solar, en relación con el flujo másico y el área de colección para la razón volumétrica de 10 l/m²-año.

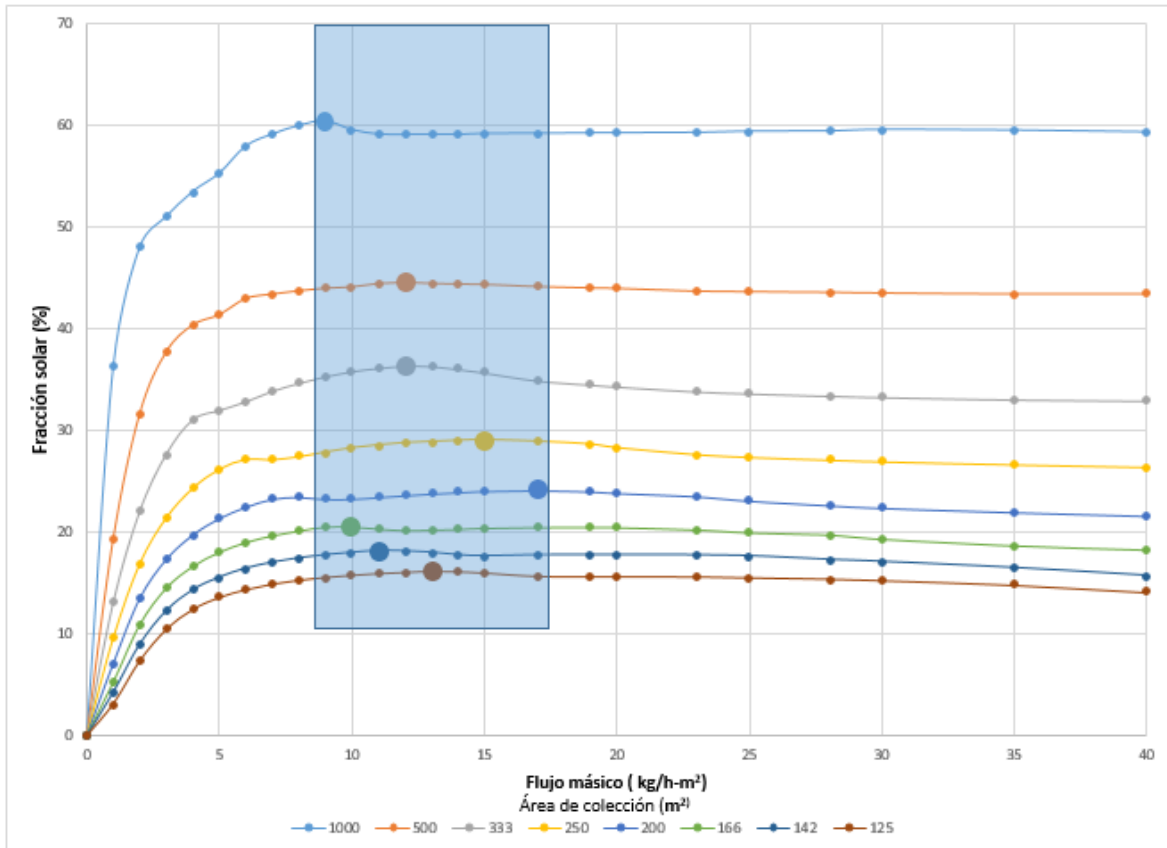


Fig.4.2. Fracción solar anual respecto a la razón de flujo y de una razón volumétrica de 10 l/m²-año.

En la zona sombreada de color azul de la Figura 4.2 se muestran las fracciones solares más elevadas para cada área de colección y resaltando su respectivo flujo másico óptimo. El flujo másico óptimo se encuentra entre los valores de 9 y 17 kg/h-m², de este intervalo de valores se puede establecer que en torno a 12 kg/h-m² es el flujo másico óptimo para esta razón volumétrica, ya que en las áreas de colección de 500 y 333 m² alcanza las fracciones solares más elevadas de 0.45 y 0.37 respectivamente. Es de observar que, aunque para las demás áreas de colección se alcanza una fracción solar más elevada utilizando otros valores de flujo másico, la diferencia es mínima.

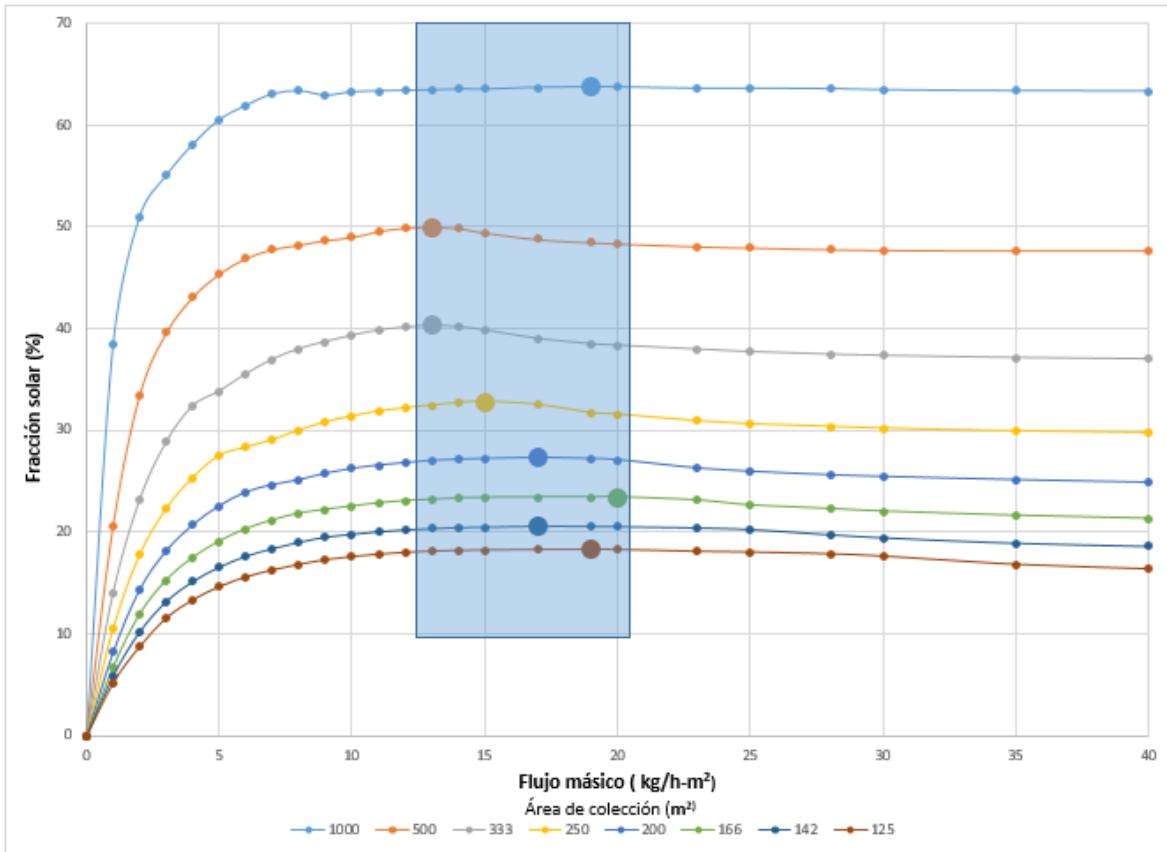


Fig.4.3. Fracción solar anual respecto a la razón de flujo y de una razón volumétrica de 20 l/m²-año.

El comportamiento de la fracción solar, en relación con el flujo másico y el área de colección para la razón volumétrica de 20 l/m²-año se muestran en la Figura 4.3. De igual manera, en la zona sombreada de color azul se muestran las fracciones solares más elevadas para cada área de colección y su respectivo flujo másico óptimo. Para este caso el flujo másico óptimo se encuentra entre los valores de 13 y 21 kg/h-m², con lo que se puede establecer que 13 kg/h-m² es el flujo másico óptimo para esta razón volumétrica, ya que en las áreas de colección de 500 y 333 m² alcanza las fracciones solares más elevadas de 0.50 y 0.40 respectivamente, y aunque para las demás áreas de colección, otros valores de flujo másico dan como resultado una fracción solar más elevada, la diferencia no es considerable.

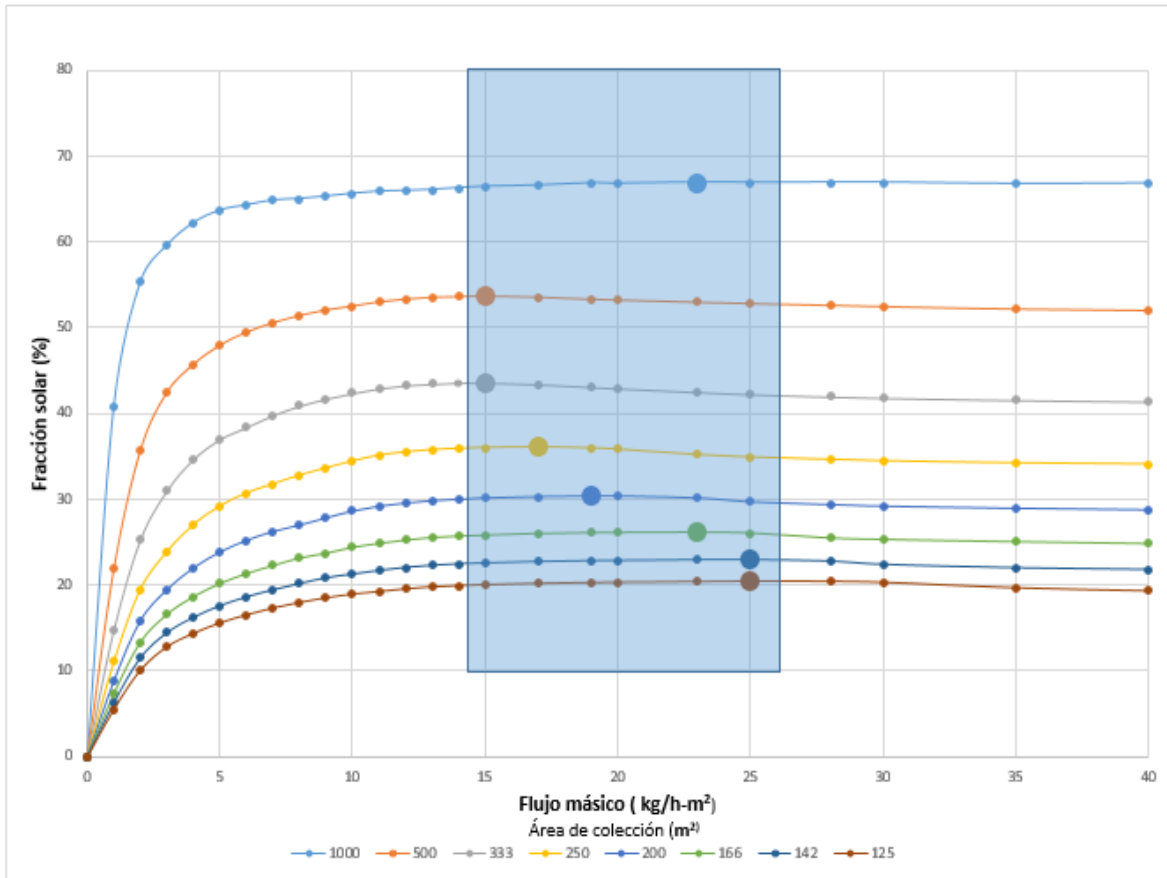


Fig.4.4. Fracción solar anual respecto a la razón de flujo y de una razón volumétrica de 50 l/m²-año.

En la Figura 4.4 se muestra el comportamiento de la fracción solar, en relación con el flujo másico y el área de colección para la razón volumétrica de 50 l/m²-año. En la zona sombreada de color azul de la Figura 4.4 se muestran las fracciones solares más elevadas para cada área de colección y su respectivo flujo másico. El flujo másico óptimo se encuentra entre los valores de 14 y 25 kg/h-m², se puede establecer que 15 kg/h-m² es el flujo másico óptimo para esta razón volumétrica, ya que para las áreas de colección de 500 y 333 m² alcanza las fracciones solares más elevadas de 0.54 y 0.44 respectivamente, y aunque para las demás áreas de colección, otros valores de flujo másico dan como resultado una fracción solar más elevada, la diferencia es mínima y se puede no considerar.

Analizando las figuras 4.4, 4.3 y 4.2, se seleccionó el flujo de 13 kg/h-m² como el flujo óptimo para las bombas 1 y 2 del sistema. Se seleccionó este flujo como un valor promedio, ya que, aunque dependiendo del área de colección y de la razón volumétrica hay otros valores de flujo que alcanzan un valor un poco más elevado de fracción solar, la diferencia entre estos valores y los dados por el flujo de 13 kg/h-m² no es considerable. Esto debido a que después de alcanzar un flujo másico óptimo la relación entre la energía otorgada al sistema y la que este proporciona aumenta, esto puede interpretarse como, que se requiere más energía para mover más fluido y aumentan también las pérdidas, entonces la energía útil disminuye al aumentar las pérdidas de energía.

4.3. Potencial en México con el sistema optimizado en razón de flujo.

Una vez que se ha verificado el funcionamiento de la plataforma TRNSYS, y se optimizó el sistema por medio del flujo másico, los siguientes pasos en la metodología es la selección de 3 ciudades con potencial industrial en el país y el diseño del sistema de colección solar.

Debido a que entre los objetivos está establecido el diseño de un sistema de captación solar para una de las ciudades con mayor desarrollo o potencial a nivel industrial, se decidió realizar las simulaciones y el diseño considerando condiciones climatológicas y de recurso solar de la Ciudad de México, Toluca de Lerdo y Monterrey. La selección de las ciudades fue debido por su localización en las entidades más industrializadas de la República Mexicana que son Ciudad de México, Estado de México y Nuevo León (Forbes México, 2014).

Una vez que se establecieron las tres ciudades para realizar el diseño del sistema de captación solar, se elaboraron tres tablas gráficas que contiene información relacionada con el área de colección, razones de uso y volumen, volumen de tanque y la razón volumétrica deseada, así como el flujo másico requerido para las bombas

que se emplean. Las tablas gráficas de diseño son para un índice de demanda de 25 m³/día de agua tratada y se requirió de un índice de razón de uso de 25 a 200 l/m²-día, con razones volumétricas de 10, 20 y 50 l/m²-año y un flujo másico en las bombas 1 y 2 de 13 kg/h-m², para encontrar los requerimientos de área de colección y volumen del termotanque para el sistema de colección propuesto. En la Figura 4.5 se muestra la tabla gráfica de diseño para el sistema de captación solar de mediana temperatura para la Ciudad de México.

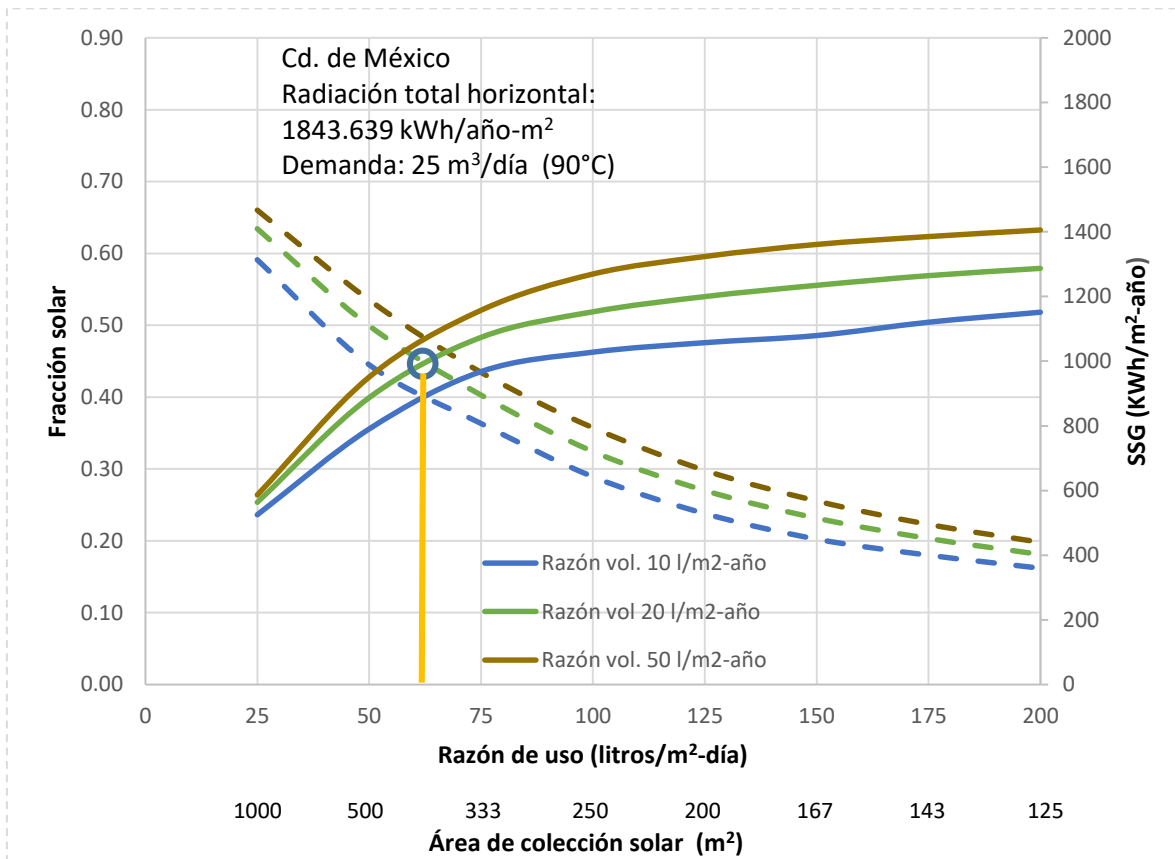


Fig.4.5. Tabla gráfica de diseño del sistema de captación solar para la Ciudad de México.

De la tabla gráfica, la razón volumétrica menos eficiente corresponde a 10 l/m²-año, esto debido a que su fracción solar es de solamente 0.31, con una potencia anual de 965.19 kWh/m²-año. Para este caso, la FS fue menor respecto a lo obtenido para la razón volumétrica de 20 l/m²-año en el cual su fracción solar promedio es de 0.34 con una potencia anual de 1083.02 kWh/m²-año.

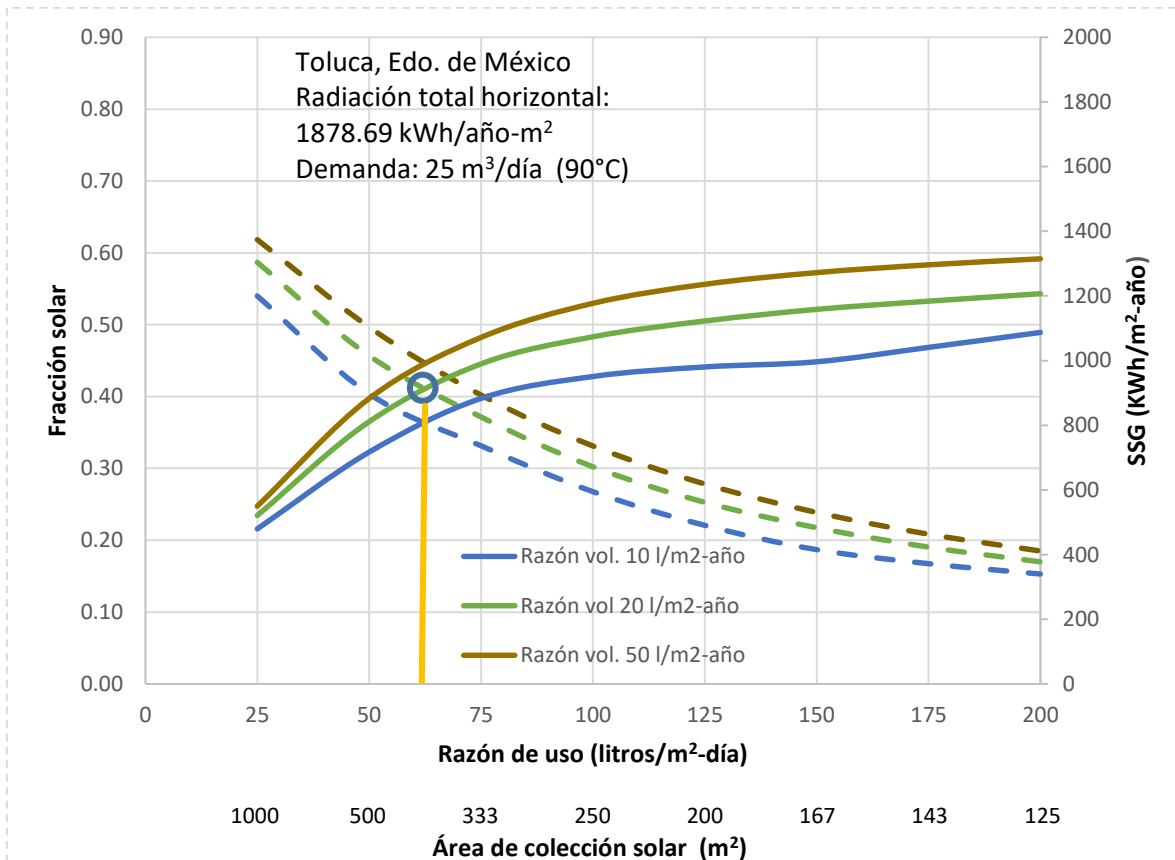


Fig.4.6. Tabla gráfica de diseño del sistema de captación solar para Toluca, Estado de México.

En la Figura 4.6 se muestra que la razón volumétrica que resultó con menor *FS* fue para 10 l/m²-año, ya que solo fue de 0.28 con una aportación energética de 891.80 kWh/m²-año. En este caso, para la razón de 20 l/m²-año la *FS* fue de 0.32 con una potencia anual de 1008.78 kWh/m²-año.

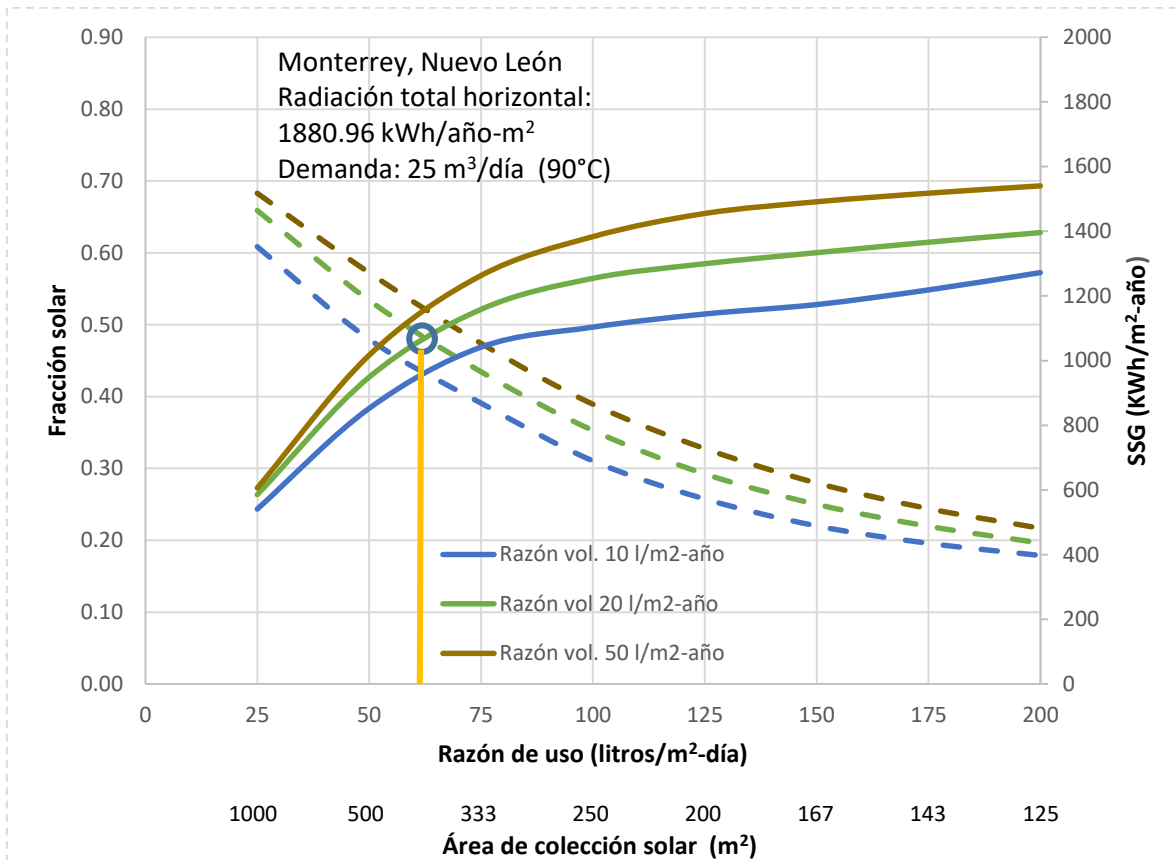


Fig.4.7. Tabla gráfica de diseño del sistema de captación solar para Monterrey, Nuevo León.

En la Figura 4.7 se puede observar que la razón volumétrica de 10 l/m²-año presenta una *FS* de 0.33 y una potencia anual de 1043.33 kWh/m²-año por lo que resulto ser la de menor *FS*. Por otro lado, la razón de 20 l/m²-año presenta una *FS* de 0.37 y una potencia anual de 1167.64 kWh/m²-año.

En los tres casos, optar por la razón de 50 l/m²-año trae como consecuencia costos más elevados en las instalaciones, aunque incrementa su fracción solar en un porcentaje mínimo debido a las áreas y volúmenes requeridos.

4.4. Discusión de los sistemas propuestos.

Analizando las tablas gráficas de la Ciudad de México, Toluca y Monterrey, se muestra que el sistema con mayor FS corresponde al que utiliza una razón volumétrica de $20 \text{ l/m}^2\text{-año}$. En la Figura 4.8 se muestra una comparativa de la fracción solar de los tres sistemas con un índice de razón de uso de 25 a 200 l/m^2 por día, con la razón volumétrica de $20 \text{ l/m}^2\text{-año}$ y un flujo másico en las bombas 1 y 2 de 13 kg/h-m^2 .

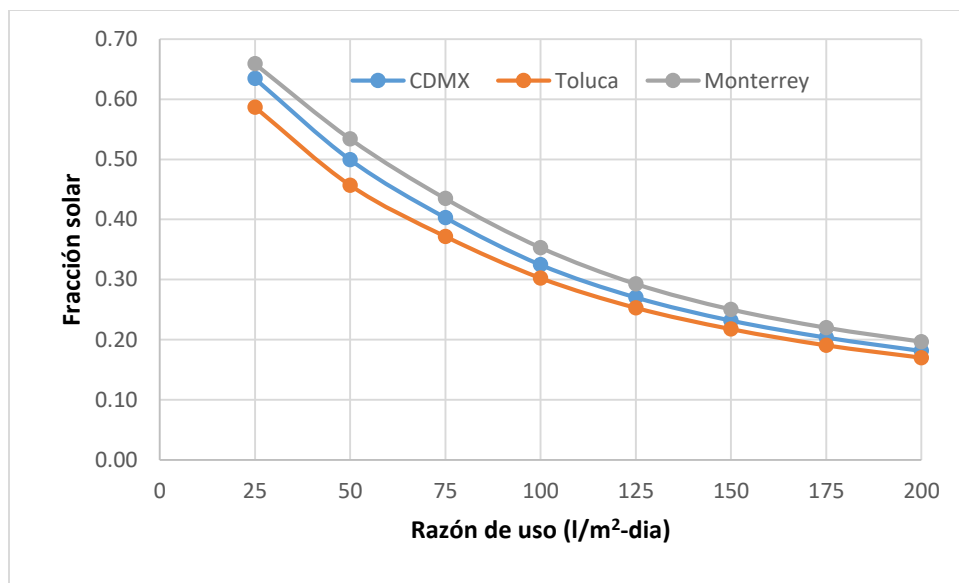


Fig.4.8. Comparativa de él sistema propuesto en tres ciudades.

De la Figura 4.8 se puede determinar que el sistema más eficiente a emplear se encuentra utilizando una razón volumétrica de $20 \text{ l/m}^2\text{-año}$ y una razón de uso de entre $50\text{-}75 \text{ l/m}^2\text{-día}$, debido a que a partir de $75 \text{ l/m}^2\text{-día}$, la fracción solar empieza a decrecer en mayor medida y el área de colección requerida no es tan elevada. Tomando en cuenta lo anterior, un valor medio de la razón de uso adecuado es de $62 \text{ l/m}^2\text{-día}$. Considerando este valor de la razón de uso y la razón volumétrica de $20 \text{ l/m}^2\text{-año}$ para las ecuaciones 2.36 y 2.38, se obtiene el área de colección y el volumen de tanque del sistema. El dimensionamiento de estos elementos del sistema se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Dimensionamiento del área de colección y tanque de almacenamiento.

Ciudad	Área de colección (m²)	Volumen tanque de almacenamiento (m³)	Fracción solar	Ganancia solar de sistema (kWh/m²-año)
Ciudad de México.	420	8.4	0.45	976.8
Toluca.	420	8.4	0.42	897.3
Monterrey.	420	8.4	0.49	1049.3

Considerando la Figura 4.8 y la Tabla 4.2, se puede observar que el mismo sistema de captación solar propuesto tiene un desempeño más elevado en la ciudad de Monterrey que en las otras dos ciudades, debido a las condiciones climáticas y de recurso solar que la ciudad presenta. Por otro lado, también se observa que el sistema de captación solar utilizando la razón de flujo propuesta en el problema de referencia se logró tener una fracción solar de 0.32 para la ciudad de Monterrey, mientras que para el mismo problema optimizando la razón de flujo se logró obtener una fracción solar de 0.34. Con lo anterior, se muestra que se puede incrementar la fracción solar hasta en un 2.0% y al mismo tiempo se pueden reducir costos de instalación utilizando los resultados mostrados en este trabajo de tesis. Cabe mencionar que para el caso de la Ciudad de México y Toluca, el comportamiento fue similar.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones de la tesis y las recomendaciones para trabajos futuros con el fin de continuar con la línea de investigación de los sistemas de captación solar de mediana temperatura aplicados a la industria mexicana.

5.1. Conclusiones.

1. Se propuso una metodología de diseño de sistemas de calentamiento de agua con energía solar para procesos, donde a partir de la demanda de energía y la ubicación del sistema se establecen la razón volumétrica, la razón de uso y la razón de flujo.
2. En el proceso de diseño se desarrolló una estrategia de simulación basada en TRNSYS, que mostró un cumplimiento en el estudio de los balances de energía y una diferencia de la fracción solar menor al 1.0% respecto a lo reportado por la Agencia Internacional de Energía.
3. El sistema de calentamiento solar propuesto se optimizó realizando un análisis de variación del flujo másico y se elaboraron tablas gráficas que relacionan la razón volumétrica, la razón de uso y la fracción solar para tres ciudades.
4. Se aplicó la metodología de diseño, donde se seleccionaron las ciudades de Ciudad de México, Toluca de Lerdo y Monterrey que son ciudades que presentan el mayor potencial industrial en el país y se seleccionó el proceso industrial del precalentamiento de agua de reposición. Estas ciudades presentan una radiación total horizontal anual de 1843.6, 1878.7 y 1881.0 kWh/m² respectivamente. Se elaboró una tabla gráfica para cada una de las ciudades seleccionadas, donde se obtuvo que un sistema conveniente para cumplir una demanda de 25 m³/día a 90°C tiene un área de colección de 420 m², un volumen de tanque de 8.4 m³, una razón volumétrica de 20 l/m²-año y una razón de uso de 62 l/m²-día.
5. Realizando otras simulaciones, se seleccionó el flujo óptimo para las bombas 1 y 2 del sistema. Se seleccionó el flujo de 13 kg/h-m² como un valor promedio, ya que, aunque dependiendo del área de colección y de la razón

volumétrica existen otros valores de flujo que alcanzan un valor un poco más elevado de fracción solar, la diferencia entre estos valores y los obtenidos por el flujo de 13 kg/h-m^2 no es tan considerable.

6. Se observó que utilizando la razón de flujo propuesto en el sistema de referencia se logró tener una fracción solar de 0.32 para la ciudad de Monterrey, mientras que para el mismo problema optimizando la razón de flujo se logró obtener una fracción solar de 0.34. Con lo anterior se muestra que se puede incrementar la fracción solar hasta en un 2.0% y al mismo tiempo se podrían reducir costos de instalación utilizando los resultados mostrados en este trabajo de tesis. Cabe mencionar que para el caso de la Ciudad de México y Toluca, el comportamiento fue similar.

7. La aplicación del sistema de calentamiento solar propuesto en la Ciudad de México, Toluca de Lerdo y Monterrey da como resultado una fracción solar de 0.45, 0.42 y 0.49; y una potencia anual de 976.8, 897.3 y 1049.3 kWh/m²-año respectivamente.

5.2. Recomendaciones para trabajos futuros.

1. Realizar el diseño del sistema de captación solar para los cinco tipos diferentes de climas existentes en el país.
2. Ampliar la cobertura del estudio, elaborando un estudio de mercado de los equipos existentes en el mercado, para establecer un comparativo del desempeño del sistema de captación solar que puede ser aplicado en cada lugar.
3. Realizar las simulaciones considerando otro tipo de captadores solares, para evaluar que tecnología de captación solar pasiva es más eficiente en el sistema.
4. Aplicar la metodología para otros lugares que tienen gran proyección industrial como son Coahuila, Guanajuato y Querétaro.

Bibliografía.

1. Ayompe L. M., Duffy A., McCormack S. J., Conlon M., Validated TRNSYS model for forced circulation solar water heating systems with flat plate and heat pipe evacuated tube collectors, Applied Thermal Engineering 31, pp. 1536-1542, 2011.
2. Ben H. I., Helmke A., Heß S., Krummenacher P., Muster B., Schmitt B., Schnitzer H., 2015. Integration guideline, Solar Process Heat for Production and Advanced Applications, <http://task49.iea-shc.org/>. Obtenido el 5 de agosto de 2015.
3. Cengel Y.A., Ghajar A.J., Transferencia de calor y masa-Fundamentos y Aplicaciones, McGraw-Hill, Capitulo 1: Introducción y conceptos básicos, p.p. 27-29, 2011.
4. Chidambaram L.A., Ramana A.S., Kamaraj G., Velraj R., Review of solar cooling methods and thermal storage options, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, p.p. 3220– 3228, 2011.
5. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, CONUEE, Normatividad, http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/normas_solar, 2014.
6. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, CONUEE, 2010, <https://www.yumpu.com/es/document/view/46365996/solar-termica-en-mexico-tech4cdm>, Obtenido el 17 de mayo de 2015.
7. Duffie J. A., Beckman W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, Willey, Chapter 6: Flat-Plate Collector, p.p. 236-313, 1989.

8. European Solar Thermal Industry Federation, ESTIF, Solar Industrial Process Heat – WP3, Task 3.5, Contract EIE/04/204/S07.38607, Solar Industrial Process Heat – State of the Art –, 2006.
9. Forbes México, 5 Estados con potencial para el desarrollo inmobiliario industrial, <http://www.forbes.com.mx/5-estados-con-potencial-para-el-sector-inmobiliario-industrial/#gs.Zslxnx4>, 2014.
10. Horta, P., SOLVAPOR: Solar heat integration in steam production for industrial processes, Simulation with TRNSYS, FRAUNHOFER, 2015, www.ise.fraunhofer.de, Obtenido el 8 de Julio de 2015a.
11. Horta, P., SOLVAPOR: Solar heat integration in steam production for industrial processes, Basic design principles and performance figures for SPH systems, FRAUNHOFER, 2015, www.ise.fraunhofer.de, Obtenido el 8 de Julio de 2015b.
12. Horta, P., SOLVAPOR: Solar heat integration in steam production for industrial processes, System components, FRAUNHOFER, 2015, www.ise.fraunhofer.de, Obtenido el 8 de Julio de 2015c.
13. Instituto Nacional de Ecología, La industria en México: oportunidades para la producción sustentable, México, 1986, <http://www.publicaciones.inecc.gob.mx/>, Obtenido en abril de 2016.
14. International Energy Agency, Solar heat for industrial processes, Task 33/Task IV: SHIP, Detailed papers to Newsletter No. 1, 2007.
15. International Energy Agency, Energy technology transitions for industry: Strategies for the next industrial revolution, International Energy Agency, pp. 388, 2009.

16. International Energy Agency, Suggestion for references cases, IEA Task 49, Solar process heat for production and advanced applications, 2015.
17. Jaramillo O. A., Intercambiadores de calor, CIE, UNAM, 2007, <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf> , Obtenido en diciembre de 2016.
18. Krummenacher P., Muster B., Methodologies and software tool for integrating solar heat into industrial processes, IEA SHC Task 49, Solar process heat for production and advanced applications, 2015.
19. Manrique J.A., Energía Solar- Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas, Harla, Capitulo 4: Aspectos de la Transferencia de Calor, p.p. 65-66, 1984.
20. Mekhilef S., Saidur R., Safari A., A review on solar energy use in industries, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, pp. 1777–1790, 2011.
21. Quijera J. A., González A. M., Labidi J., Integration of a solar thermal system in canned fish Factory, Applied Thermal Engineering 70, pp. 1062-1072, 2014.
22. Raisul I. M., Sumathy K., Khan S. U., Solar water heating systems and their market trends, Renewable and Sustainable Energy Reviews 17, pp. 1–25, 2013.
23. Ramos C., Beltran J., Ramirez R., Advances on the Development of the Parabolic Trough Technology in Mexico, Energy Procedia 57, pp. 2090 – 2097, 2014a.
24. Ramos C., Ramirez R., Beltran J., Potential assessment in Mexico for solar process heat applications in food and textile industries, Energy Procedia 49, pp. 1879 – 1884, 2014b.

25. Ruchi S., Sumathy K., Erickson P., Gong J., Recent advances in the solar water heating systems: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, pp. 173–190, 2013.
26. Secretaría de Energía, Estrategia nacional de energía: 2013-2027, México, 2013. <http://www.energia.gob.mx>, Obtenido el 13 de mayo de 2015.
27. Secretaría de Energía y Agencia Internacional de Energía, México, Indicadores de eficiencia energética en México: 5 sectores, 5 retos. 2011.
28. Schweiger H., Mendes J. F., Nikolaus Benz, Hennecke K., Prieto G., Cusí M., Gonçalves H., 2000, The potential of solar heat in industrial processes a state of the art review for Spain and Portugal. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.460.4262&rep=rep1&type=pdf>. Obtenido el 4 de septiembre de 2015.
29. Soteris A. Kalogirou, The potential of solar industrial process heat applications, *Applied Energy*, 76, pp. 337-361, 2003.
30. Soteris A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 30, pp. 231-295, 2004.
31. Soteris A. Kalogirou, The potential of solar energy in food-industry process heat applications, 2013, <http://ktisis.cut.ac.cy/bitstream/10488/880/1/C44-IPH-NREC.pdf>, Obtenido el 2 de junio de 2015.
32. Taherian H., Rezania A., Sadeghi S., Ganji D.D., Experimental validation of dynamic simulation of the flat plate collector in a closed thermosyphon solar water heater, *Energy Conversion and Management* 52, p.p. 301–307, 2011.

33. TRNSYS 16, TRNSYS 16 Documentation, Volume 5: Mathematical Reference, 2007.
34. Vannoni, C., Battisti, R., Rigo, S. Potential for solar heat in industrial processes, Task 33/IV: Solar heat for industrial processes, International Energy Agency, 2008.
35. Weiss W., Matthias Rommel, Medium Temperatures Collectors, State of the art within Task33/ IV, Subtask C, 2005.
36. Weiss W., Schweiger H., Battisti R., Market potential and system designs for industrial solar heat applications, 2011.
37. Zhai H., Dai Y.J., Wu Y.J., Wang R.Z., Zhang L.Y., Experimental investigation and analysis on a concentrating solar collector using linear Fresnel lens, Energy Conversion and Management 51, pp. 48–55, 2010.