

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“Desarrollo de un Modelo de Simulación para uso de Energía  
Termosolar en Baja California.”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA**

**PRESENTA**

**RENÉ DELGADO RENDÓN**

**DIRECTOR**

**DR. HÉCTOR ENRIQUE CAMPBELL RAMÍREZ**

**Mexicali, B. C.**

**Marzo de 2017.**



**« DEDICATORIA »**

**“La presente tesis la dedico a mi madre, quien me enseñó a dar lo mejor de mí siempre, a valorar el trabajo y respetar a las personas que me hacen ser mejor día con día.”**



## « AGRADECIMIENTOS »

Antes que nada quiero agradecer a mi director el Dr. Héctor Campbell, a quien le agradezco haberme brindado una oportunidad envidiable, por guiarme siempre con su sabiduría y por el gran apoyo característico de él, por el honor de aprender de ud. Mil gracias.

También quiero agradecer a la Directora del Instituto de Ingeniería de la UABC, por su siempre amable disposición y preocupación, por su confianza y apoyo muchas gracias Dra. Gisela Montero.

Un agradecimiento también a los Maestros Iván Rangel y Diego Bonilla, valiosos compañeros y amigos, quienes sin su colaboración este trabajo no hubiese sido posible.

Finalmente agradezco a CONACYT por el apoyo brindado, durante el periodo de realización de este trabajo doctoral, y por la oportunidad de contribuir a la sociedad con una nueva visión.



## INDICE.

Índice de tablas. ....	I
Índice de figuras. ....	II
Resumen. ....	VI
Introducción. ....	X
Problemática. ....	XIII
Justificación. ....	XV
Hipótesis. ....	XVII
Objetivos y metas. ....	XVIII
CAPITULO I. ANTECEDENTES.....	1
CAPITULO II. CONTEXTO.....	19
CAPITULO III. METODOLOGIA.....	26
CAPITULO IV. FUNDAMENTO.....	32
CAPITULO V. DESARROLLO.....	37
CAPITULOVI. MONITOREO.....	49

CAPITULO VII. MODELADO.....	55
CAPITULO VIII. RESULTADOS.....	66
CAPITULO IX. DISCUSION DE RESULTADOS.....	72
CAPITULO X. CONCLUSIONES.....	78
BIBLIOGRAFIA.....	80
EXPERIENCIA Y RECOMENDACIONES.....	83



## INDICE TABLAS.

Tabla 1.0 Mercado de energía eficiente.....	5
Tabla 1.1 Mercado de calentadores solares de agua.....	5
Tabla 1.2 Mercado fotovoltaico.....	5
Tabla 1.3 Dióxido de carbono evitado de instalaciones solares residenciales de BSI.....	5
Tabla 1.4 Dióxido de carbono evitado de instalaciones solares comerciales de BSI.....	6
Tabla 1.5. Clasificación de energía solar térmica por temperaturas obtenidas.....	17
Tabla 5.0. Ejemplo de tabla resumen de datos procesados por día, mes y año. ....	41
Tabla 8.0. Comparativo de energía útil simulada y medida.....	66
Tabla 8.1. Energía útil por día de las diferentes ciudades para tres orientaciones y tres inclinaciones.....	70
Tabla 9.0. Variación de los datos de Energía útil entre RETScreen y STELLA para CSA.....	72
Tabla 9.1. Energía disponible, energía útil y eficiencia del sistema.....	75

# §

## INDICE FIGURAS.

Figura 1.0 Modelo en STELLA para el consumo eléctrico.....	7
Figura 1.1. Modelo en STELLA del uso de agua.....	8
Figura 1.2. Diagrama de calentamiento de agua y vapor del caso de un hospital.....	10
Figura 1.3. Diagrama de un sistema de calentamiento solar de agua con bombeo e intercambiador de calor.....	13
Figura 1.4. Colector plano sin cubierta para aplicaciones de baja temperatura. ....	14
Figura 1.5. Colector plano con cubierta para aplicaciones de temperatura moderada.....	14
Figura 1.6. Colector de tubos evacuados.....	15
Figura 1.7a Tubos evacuados abiertos.....	16
Figura 1.7b. Tubos evacuados cerrados.....	16
Figura 1.8. Cilindros parabólicos para agua caliente en la industria.....	17
Figura 2.0. Radiación solar para cada ciudad en un día típico de Julio.....	20
Figura 2.1. Radiación solar para cada ciudad en un día típico de Enero.....	21
Figura 2.2. Temperatura ambiente para cada ciudad en un día típico de julio.....	22
Figura 2.3. Temperatura ambiente para cada ciudad en un día típico de enero.....	22

Figura 2.4. Promedio de radiación mensual para las ciudades de B.C.....	23
Figura 2.5. Estructura sectorial en Baja California.....	25
Figura 3.0. Metodología general de trabajo.....	27
Figura 3.1. RetScreen para calentamiento solar de agua, versión SWH3.....	28
Figura 3.2. Programa para modelado de programas de simulación.....	30
Figura 4.0. Instalación con sistema de circulación forzada. ....	33
Figura 4.1. Instalación con sistema de circulación natural.....	34
Figura 5.0. Principales ciudades de Baja California. ....	38
Figura 5.1. Procesamiento de datos meteorológicos. ....	39
Figura 5.2. Comportamiento de las horas solar, o día solar de Ensenada en Enero.....	40
Figura 5.3. Comparación de promedios de radiación solar NASA-Estación Local. ....	41
Figura 5.4. Directorio de sistemas de calentamiento solar de agua.....	42
Figura 5.5. Puntos para medición de temperaturas en el calentador solar de agua. ....	43
Figura 5.6. Calentador solar de agua instalado en residencia de Mexicali. ....	44
Figura 5.7. Sistema de adquisición de datos LogicBus, y termopar en válvula. ....	45
Figura 5.8. Vista de la instrumentación del calentador solar de agua. ....	45
Figura 5.9. Vista de sensor con protección de resina para evitar su deterioro y lecturas erróneas.....	46
Figura 5.10. Flujómetro totalizador con pantalla análoga y cable de registro de activación digital.....	47
Figura 5.11. Estación meteorológica con monitoreo remoto. ....	48

Figura 6.0. Datos de referencia para cálculo de energía útil captada. ....	50
Figura 6.1. Estratificación de agua en un termotanque desde el arranque del sistema. ....	52
Figura 6.2. Comparativo de consumo de agua caliente y relación directa con temperaturas del CSA.....	53
Figura 6.3. Comparativo de horario de consumo de agua caliente y relación directa con temperaturas del CSA.....	54
Figura 7.0. Comportamiento de la temperatura ambiente de días típicos seleccionados. ....	56
Figura 7.1. Comportamiento en el sistema de CSA de los días típicos seleccionados. ....	57
Figura 7.2. Curva de radiación solar de los días típicos seleccionados. ....	58
Figura 7.3. Funciones de ajuste de energía útil para día típico de Enero. ....	58
Figura 7.4. Funciones de ajuste de energía útil para día típico de Junio. ....	59
Figura 7.5 Comparativo entre modelos de radiación y datos medidos de las estaciones de CNA y DAVIS.....	60
Figura 7.6. Modelo de Hottel aplicado a dos meses Junio y Enero. ....	62
Figura 7.7 Radiación solar incidente en diferentes planos para Mexicali, modelo de Hottel. ....	63
Figura 7.8 Radiación solar incidente en diferentes planos para Tijuana, modelo de Hottel. ....	64
Figura 7.9 Radiación solar incidente en diferentes planos para Ensenada, modelo de Hottel. ....	64

Figura 7.10. Submodelo STELLA para CSA de Mexicali en Enero con inclinación a 15 grados y azimut a 0 grados.....	65
Figura 7.11. Controles del Submodelo STELLA para CSA y gráfico de comportamiento horario y energía acumulada.....	65
Figura 8.0. Comparativo entre simulaciones y datos medidos de energía útil. ....	67
Figura 8.1. STELLA para Ensenada en orientación de 45 grados sureste.....	68
Figura 8.2. STELLA para Ensenada en orientación al sur. ....	69
Figura 8.3. STELLA para Tijuana con diferentes orientaciones. ....	69
Figura 8.4. STELLA para Ensenada con diferentes orientaciones. ....	70
Figura 9.0. Comparativo de STELLA para tres ciudades. ....	75
Figura 9.1. Eficiencia del CSA dado para Mexicali con orientación sur e inclinación de 25 grados .....	77

# §

## RESUMEN.

Esta tesis se divide en dos secciones principales, en la primera sección compuesta por la Introducción, la Problemática, la Justificación, la Hipótesis, los Objetivos y Metas, se presenta la información relevante para comprender el contexto de una problemática energética que cada día se vuelve más crítica desde el punto de vista del consumo y demanda de energía térmica. También se plantea de manera puntual las hipótesis acerca de la metodología propuesta y del modelo de simulación, estableciendo que la primera es aplicable, útil y confiable, en tanto que el modelo de simulación es una herramienta con ventajas en cuanto a simplicidad de uso, presentación de información relevante en términos precisos y fáciles de interpretar. En función de lo anterior, los objetivos y metas se establecen considerando la viabilidad de cumplimiento de estos y de las variables de interés fundamental para el cumplimiento del objetivo principal.

En el Capítulo I, los antecedentes contienen algunos casos en los cuales se implementaron metodologías particulares dadas las características y necesidades de cada uno, con el fin de considerar los aspectos más relevantes de cada uno y construir a partir de ello la metodología propuesta. Así mismo, se describen casos donde el uso de agua caliente

corresponde a diferentes aplicaciones, siendo esto relevante dado que cada uno obedece a comportamientos particulares de consumo. También, se describen las diversas tecnologías de calentamiento solar para su diferenciación.

El Capítulo II, describe características correspondientes a cada una de las ciudades de interés (Mexicali, Tijuana y Ensenada), como son los aspectos de clima y variables meteorológicas (radiación solar, temperatura). A fin de destacar las diferencias que se presentan entre estas ciudades y que resultan de gran importancia para definir tanto el nivel de demanda de agua caliente, y el desempeño del sistema de Calentamiento Solar de Agua (CSA).

La metodología se describe a detalle en el Capítulo III, donde se mencionan también las variables consideradas para la realización del modelo de simulación, siendo esto relevante en cuanto la utilización de información de calidad (variables medidas). Además, de proponer el programa de RETScreen para comparar y validar los resultados obtenidos de las simulaciones en STELLA.

Dentro del Capítulo IV de Fundamento, se definen los tipos de sistemas de CSA para colectores de placa plana, así como el método de cálculo empleado para determinar la cantidad de energía útil captada por el sistema solar y la eficiencia del mismo.

En el Desarrollo contenido en el Capítulo V, se definen las características de la región de estudio donde se localizan las ciudades principales de Baja California. Se detalla el método utilizado para el procesamiento de los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas al igual que los criterios establecidos para establecer la información de trabajo y la representación de los datos procesados. Se presentan a detalle la instrumentación y método de monitoreo de las variables de interés en los calentadores solares de placa plana empleados para la validación del modelo de simulación en STELLA para CSA.

La sección de Monitoreo se detalla en el Capítulo VI, donde básicamente se muestra el procedimiento utilizado para calcular la energía útil captada por los sistemas de calentamiento solar monitoreados, se analiza el comportamiento peculiar de las variables medidas y la relación respecto del consumo de agua caliente por parte del usuario. Lo anterior para determinar la relevancia y la relación entre comportamiento de uso y de captación de energía.

El Capítulo VII, muestra la información considerada para la construcción del Modelo de Simulación en STELLA para CSA, el cual se basa en el comportamiento horario de la radiación solar incidente sobre el plano inclinado, en combinación con las funciones de comportamiento de ganancia de energía del calentador solar de placa plana por termosifón, para así determinar la función y la radiación para cada día típico de cada mes de cada ciudad.

En la sección de Resultados, se muestra lo más destacado y particular de las simulaciones realizadas en el Modelo STELLA para CSA, resaltando las peculiaridades de cada caso tomando en cuenta la ciudad, orientación e inclinación como variables o factores que modifican el comportamiento de ganancia de energía útil captada por el colector solar. De esta forma el Capítulo VIII permite señalar puntos relevantes de la herramienta de simulación desarrollada (Modelo STELLA para CSA).

El Capítulo IX Discusión de Resultados, menciona lo destacado del Modelo STELLA para CSA en función de los resultados dados en el capítulo previo. Se presenta la relación de variabilidad entre los resultados de la simulación en RETScreen contra los resultados obtenidos por el Modelo STELLA para CSA, señalando las ventajas de la herramienta desarrollada sobre el programa RETScreen. De igual manera se demuestra que el Modelo

STELLA para CSA permite estimar de forma indirecta la eficiencia del sistema de calentamiento solar obteniendo un porcentaje promedio anual o mensual para cada caso.

Finalmente en el Capítulo X, las conclusiones a las que se llegaron tomando como referencia los objetivos y las hipótesis planteadas inicialmente, permiten argumentar la eficacia de la metodología empleada y la precisión del Modelo STELLA para CSA desarrollado respecto de otras herramientas existentes. Es decir, se concluye el cumplimiento de los objetivos planteados y la validación de lo que se esperaba que fuese el Modelo de simulación.



## **INTRODUCCION.**

En la actualidad el calentamiento global es un problema que nos concierne y más aún que nos involucra a todos en la solución. La reducción de emisiones es un método para mitigar el impacto ambiental que tienen las actividades humanas, por ello es necesario sumar esfuerzos que conlleven a implementar tanto medidas como tecnología capaz de reducir la contaminación desde diferentes áreas de la sociedad.

Algunas medidas encaminadas al uso eficiente y ahorro de energía son suficientes en algunos casos para generar un impacto significativo en la reducción de gases de efecto invernadero, mientras que en otros casos es necesario utilizar tecnología que aproveche fuentes de energía renovable que reemplace parcial o totalmente la demanda de un proceso o que satisfaga una necesidad.

La tecnología para el aprovechamiento de la radiación solar es muy variada hoy en día tanto en materiales como en diversidad de aplicaciones. La radiación solar se aprovecha para generar energía eléctrica y también para energía térmica, las cuales se requieren para numerosos usos en variedad de áreas. México cuenta, por su localización geográfica, con disponibilidad de radiación solar privilegiada de aproximadamente  $5.3\text{kWh/m}^2\text{-día}$  de

acuerdo al Instituto de Geofísica de la UNAM, sobre todo en la parte norte del país, lo que significa un enorme potencial de energía solar aprovechable.

El estado de Baja California es una región con una demanda energética creciente debido a sus características ambientales de temperaturas extremas, y también por su peculiar situación de aislamiento respecto a la falta de conexión a la red eléctrica del resto del país.

Estos aspectos de la región hacen además de necesario, urgente la búsqueda y utilización de fuentes de energía alterna que ayuden a satisfacer una demanda energética de las ciudades que se encuentran actualmente en un pleno desarrollo y crecimiento demográfico.

Mexicali, Tijuana y Ensenada son ciudades importantes en el estado de Baja California, ya que en ellas se dan actividades comerciales, industriales, turísticas y agropecuarias que son fundamentales en el desarrollo económico de la región. Gran número de estas actividades son susceptibles de implementar dentro de sus procesos tecnología para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable, más específicamente, energía eléctrica y térmica.

El calentamiento solar de fluidos es una aplicación beneficiosa para lugares con climas fríos y durante la época invernal. En la región de Baja California el periodo invernal dura aproximadamente seis meses, durante los cuales la necesidad de agua caliente y calefacción se vuelve indispensable. Los restaurantes, hoteles, escuelas, viviendas, oficinas, etc., son algunos ejemplos donde año con año se requiere agua caliente o calefacción. En las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES), como en lavados de auto, lavanderías, talleres de pintado, etc., el uso de un fluido calentado es importante dentro del proceso productivo del negocio.

La caracterización, evaluación y análisis del potencial de uso de tecnología solar térmica en diferentes áreas de aplicación en una ciudad, es el primer paso para coordinar esfuerzos y recursos dirigidos a proyectos específicos con una planeación a mediano y largo plazo, por

ello en este trabajo se propone además de una herramienta de simulación una metodología que pueda ser aplicada y replicada para cualquier ciudad y región, que cuente con un elevado nivel de confiabilidad y que la información se presente en forma útil y adecuada para la toma de decisiones sobre proyectos termosolares y su optimización.

# §

## **PROBLEMÁTICA.**

Baja California es un estado en pleno desarrollo, actualmente el crecimiento del sector residencial, industrial y comercial han implicado un incremento significativo en la demanda de energía. Mexicali, Tijuana y Ensenada son las principales ciudades en el estado y con mayor demanda energética. Al contar con una red eléctrica aislada de la del resto del país, esto se vuelve un factor limitante para el suministro de energía para una región en pleno crecimiento y desarrollo. Estos factores involucran una serie de consecuencias que repercuten principalmente en los costos de energía, impactando directamente en precios de combustibles y tarifas eléctricas.

Estos costos elevados de energía ciertamente limitan el pleno desarrollo de las ciudades principales en el estado de Baja California. Por ello se ha optado por considerar las alternativas del uso de tecnología solar para aprovechar el recurso abundante con el que se cuenta en la región. Sin embargo, existen pocas herramientas para implementar las tecnologías renovables en cada ciudad y región, que permitan a los programas de gobierno dar apoyo a estas tecnologías de manera eficiente, adecuada y enfocada.

Actualmente se sabe que en el estado de Baja California se cuenta con un recurso solar envidiable, sin embargo, se desconocen los métodos para aprovechar las diversas aplicaciones de la tecnología solar tanto fotovoltaica como termosolar.

En las ciudades principales del estado, el desarrollo y crecimiento se ha dado en el área residencial, comercial y por consecuencia también en el sector público como el de la salud. El crecimiento en estos conlleva a un aumento en los requerimientos energéticos para poder satisfacer las necesidades de energía en cada ciudad.

En el caso particular de la ciudad de Mexicali, las condiciones extremas de clima hacen necesario el uso de equipos de aire acondicionado durante el verano y de calentadores de agua en invierno. Esto incrementa la demanda eléctrica en verano y el consumo de gas en invierno.

La ciudad de Tijuana cuenta con una demanda de energía uniforme durante el año, debido a las características ambientales que predominan en la zona, pero aun así, al ser una ciudad en pleno desarrollo cuenta con grandes necesidades de energía.

Ensenada es una ciudad costera que presenta condiciones ambientales confortables, a pesar de ello los costos elevados de energía es un factor presente en la economía de los diferentes negocios, empresas y hogares de las ciudades en el estado de Baja California.

Por todo lo anteriormente mencionado, se observa un problema de demanda energética que para ser afrontado debe contarse con un conocimiento pleno de las áreas de oportunidad, el potencial de estas y la herramienta que permita evaluar en términos energéticos, económicos y tecnológicos los proyectos de energía solar-térmica.

# §

## **JUSTIFICACIÓN.**

La tendencia al uso de las energías renovables es notable en todo el mundo y más aún en las regiones donde la radiación solar disponible es abundante. En Baja California, se vislumbra un cambio al uso de las energías alternativas (solar y eólica), por lo que esta investigación tiene la intención de contribuir a facilitar el uso de la tecnología solar térmica en sus diferentes campos de aplicación posibles en las ciudades.

El potencial de uso de la tecnología solar-térmica cuenta con una oportunidad envidiable desde el punto de vista técnico, tecnológico y económico para su implementación en diferentes áreas de oportunidad en ciudades de Baja California. En Mexicali existen alrededor de 16 empresas cuyos procesos involucran calentamiento de algún tipo de fluido [1], las cuales emplean aproximadamente 1600 trabajadores. En las ciudades de Mexicali, Ensenada y Tijuana se encuentran aproximadamente 228 restaurantes para el sector turístico, de igual manera existen 28 hoteles registrados en Ensenada, 78 hoteles en Mexicali y 195 en Tijuana, incluyendo todas las categorías [2]. En cuanto a la vivienda se tienen en Mexicali 229,477 casas habitadas, en Ensenada 110,453 y en Tijuana 357,064 viviendas [2].

En cuanto a la Relevancia Social, la implementación de tecnología solar-térmica en las diferentes áreas trae como consecuencia el ahorro de energía, reducción de gastos, y por ende beneficios para las empresas y negocios que aprovechan el recurso solar. Ello implica mejorar la calidad de vida de las personas y el desarrollo de una cultura generalizada para el uso de energías renovables. Permite además, asignar recursos y encaminar esfuerzos en la ejecución de proyectos, conociendo de antemano el potencial del recurso natural y los beneficios esperados, además de que proveer la información necesaria para el uso de programas enfocados a la promoción de tecnologías para aprovechamiento de las energías alternativas.

La Relevancia Ambiental al implementar una herramienta de simulación para analizar y evaluar un proyecto de energía solar, no solo se considera el factor técnico y financiero si no también el ambiental, es decir, la reducción de emisiones y del consumo de combustibles en cada una de las áreas y casos de análisis. Por lo tanto, se puede tener información cuantificada de los beneficios aportados por el uso de energía solar-térmica en la ciudad, los cuales estén delimitados por área de oportunidad y aplicación tecnológica.

Viabilidad y factibilidad. Dado que se propone desarrollar una herramienta mediante una metodología propuesta para simulación, esta dependerá directamente de las características de las áreas de análisis y de la información disponible en cada uno de ellos, además de las alternativas tecnológicas disponibles en el mercado para cada uno de las aplicaciones particulares de cada caso y de las características peculiares de cada ciudad. Considerando que en algunos casos el acceso a la información resulta limitado o que dicha información no está disponible, las actividades necesarias para recopilar la información faltante y generar información útil, además de la disponibilidad de los recursos necesarios y medios requeridos para esta investigación.

# §

## **HIPÓTESIS.**

El modelo de simulación desarrollado es capaz de generar información útil y un análisis coherente de la información para proponer un esquema de aprovechamiento termosolar, con potencial de uso en áreas tales como la comercial, hotelera, pequeñas y medianas empresas, de educación (escuelas), edificios de oficinas, de hospitales y clínicas, además determinar el la cantidad de energía útil aprovechable que puede brindar la tecnología termosolar. También, la metodología se adecua a las necesidades y características de otras regiones para el análisis y evaluación de áreas de potencial termosolar, siguiendo como referencia de trabajo los casos analizados de las ciudades de Mexicali, Tijuana y Ensenada.

Finalmente los resultados del modelo desarrollado para el cálculo de la energía tienen una variación respecto de los datos reales de referencia, no mayor al 15% en promedio de los valores de energía útil por hora de un día típico.

# §

## OBJETIVOS Y METAS.

Los objetivos planteados para este trabajo son:

**Primero.** Desarrollar una herramienta de simulación para integrar y procesar la información requerida para la evaluación y análisis para uso de energía termosolar en casos específicos de áreas potenciales definidas en Mexicali, Tijuana y Ensenada. Además de crear una base de datos técnicos actualizados de la tecnología solar para calentamiento de agua predominante en el mercado, así como la información sobre datos ambientales actuales y recientes para las zonas de interés. Además, de presentar información horaria estimando la energía útil captada.

**Segundo.** Desarrollar una metodología que permita replicar estudios de análisis y evaluación para energías renovables en México y otras partes del mundo. Utilizando como base las metodologías existentes para aplicaciones similares como lo son RETScreen, SWIFT, CSA CONAE, STELLA, TRNSYS, etc.

**Tercero.** Estimar el aprovechamiento termosolar para un área de oportunidad específica en Mexicali, Tijuana o Ensenada, en función de la información recopilada y el modelo de

simulación desarrollado. Verificando mediante pruebas experimentales los datos obtenidos de la simulación concernientes al equipo termosolar.

**Metas.**

1.- Recopilar y analizar la información ambiental disponible respecto a cada una de las ciudades. Seleccionar estaciones meteorológicas de las ciudades de Mexicali, Tijuana y Ensenada, y sus datos históricos.

2.- Llevar a cabo un análisis sobre metodologías y herramientas de simulación existentes para generar a partir de estas un modelo de simulación mejorado e integral. Realizar una selección de modelos matemáticos adecuada al propósito del proyecto.

3.- Estimar la demanda de energía térmica a nivel horario para un día representativo de cada mes del año.

4.- Validación de los resultados obtenidos en el modelo de simulación mediante pruebas experimentales con equipos colectores solares de placa plana. Monitorear el equipo termosolar en condiciones de operación real que permitan validar la información correspondiente a las condiciones de cada ciudad.



## **CAPITULO I: ANTECEDENTES.**

### **Introducción.**

El análisis y dimensionamiento de la tecnología de calentamiento solar, ocupa un amplio mercado de oportunidad, ejemplo de ello son las aplicaciones de calentamiento de agua en hoteles, restaurantes, hospitales, lavanderías, vivienda, entre otros. Así mismo la simulación es una herramienta útil y práctica para el análisis de datos y toma de decisiones en los proyectos de calentamiento solar.

## **Antecedentes.**

Los trabajos encaminados al análisis y evaluación del uso de tecnología solar son muchos y muy variados. Sin embargo, aquellos que integran el análisis de potencial y evaluación tecnológica para casos que permitan estimar la utilidad del recurso solar en una comunidad en más de uno de los ámbitos de aplicación son muy escasos.

### **1.1 CASOS DE REFERENCIA.**

#### **Caso Berkeley, Estados Unidos.**

Un ejemplo claro y reciente sobre el análisis y desarrollo de un plan de negocio para el uso de tecnología solar fotovoltaica y solar térmica, es la Iniciativa solar de la ciudad de Berkeley, presentada en el 2008, la cual presenta un análisis detallado del mercado potencial tanto residencial como comercial existente en la ciudad [3]. El estudio de análisis se enfocó a la utilización de calentadores solares de agua y de módulos fotovoltaicos. La iniciativa solar de Berkeley contempla un programa basado en los siguientes principios:

1. Utilización de modelos existentes. Aprovecha los programas y modelos existentes en California para realizar las evaluaciones de eficiencia energética, del calentamiento solar de agua y de los sistemas solares fotovoltaicos.
2. Una organización simple. Es decir, la estructuración simple de funcionamiento desde el punto de vista administrativo y logístico, que permita participar a los clientes, proveedores y facilite a la ciudad la administración del proyecto.
3. Análisis financiero comprensible. Dentro del análisis financiero para la evaluación de cada proyecto se contempló un plan de financiamiento que fuese claro para el cliente y que le ayudase a superar la barrera que involucra realizar la inversión inicial.

4. Preservar la funcionalidad del mercado. Con este principio la BSI busca generar una competencia entre proveedores de productos y servicios, que brinden además de un servicio barato un producto de calidad.
5. Energía renovable y uso eficiente. La BSI incluye integrar las políticas de uso eficiente de energía con el aprovechamiento de energías renovables, de manera que los usuarios puedan obtener beneficios de estas acciones por parte de los programas específicos de apoyo para dichas acciones.
6. Información efectiva y mercadeo. La consideración de las alternativas existentes respecto a la tecnología y los proveedores de estas es relevante para poder tomar las decisiones más adecuadas. También es importante dentro de este principio el considerar la información disponible de casos similares para analizar las condiciones en que se presentó tal proyecto y observar tanto las ventajas como desventajas y por su puesto los resultados que obtuvieron.

Metas del programa y mercado potencial.

- Residencial. El mercado de este aspecto se limita a los casos de usuarios donde es factible implementar el uso eficiente y para los casos que son susceptibles de financiamiento, es decir, aquellos para los que los beneficios resulten significativos y que puedan afrontar la inversión requerida con apoyo de los programas existentes.
- Comercial. En este caso se incluyen todos los negocios existentes en la ciudad de Berkeley. Dado que todos son susceptibles de obtener mejoras y beneficios del uso eficiente en conjunto con el uso de sistemas de calentamiento solar de agua y sistemas fotovoltaicos.

- Potencial técnico. Ya que el consumo de gas natural en la ciudad corresponde al 44% por parte de la fracción residencial y 31.9% a negocios, se tiene una oportunidad para impactar en los usos finales de calentamiento mediante mejoras eficientes de uso de energía. En el estudio de Berkeley se contempló solo el 90% de las viviendas que corresponden aproximadamente a 18,053 viviendas, mientras que el número de negocios se estimó en 3,285 edificios. Para estimar la cantidad de viviendas con viabilidad técnica para instalación de equipos de calentamiento solar y fotovoltaico, se consideró el tipo de construcción y las sombras de árboles, de tal manera que solo un 20% (4,012 casas) se consideraron como potencial disponible. El mismo 20% se aplica para edificios comerciales estimando 730 unidades con techos disponibles para tecnología solar [3].
- Potencial económico. Lo referente al uso de energía eficiente en el área residencial es un potencial que se estimó considerando las tarifas de gas natural y analizando la cantidad de viviendas susceptibles de poder realizar tales mejoras energéticas, de este se determinó un 70% del residencial (12,637). De la misma manera se consideró para el potencial del área comercial un 70% de las unidades equivalentes a 2,300 posibles instalaciones comerciales. De los anteriores para el residencial solo el 39% (1,565) de las viviendas son realmente viables económicamente para el uso de sistemas fotovoltaicos, mientras que el número de negocios con viabilidad económica para proyectos fotovoltaicos se reduce a 285. Lo anterior se refleja en las Tablas 1.0, 1.1, 1.2, 1.3 y Tabla 1.4, en relación al potencial para uso de calentadores solares de agua, equipo fotovoltaico y uso eficiente de energía [3]:

Tabla 1.0 Mercado de energía eficiente (número de propiedades).

Área	Potencial técnico	Potencial económico	Mercado potencial
Residencial	18,053	12,637	9,478
Comercial	3,285	2,300	1,725
TOTAL	21,338	15,192	11,392

Tabla 1.1 Mercado de calentadores solares de agua (número de propiedades).

Área	Potencial técnico	Potencial económico	Mercado potencial
Residencial	4,012	2,808	2,106
Comercial	730	186	140
TOTAL	3,016	1,513	

Tabla 1.2 Mercado fotovoltaico (número de propiedades).

Área	Potencial técnico	Potencial económico	Mercado potencial
Residencial	4,012	1,565	1,174
Comercial	730	385	214
TOTAL	3,016	1,117	1,329

Tabla 1.3 Dióxido de carbono evitado de instalaciones solares residenciales de BSI.

Tecnología	Mercado potencial (techos)	Tamaño promedio del sistema	Promedio de CO <sub>2</sub> evitado por instalación	Mercado potencial de CO <sub>2</sub> evitado (ton)
SWH	2,106	13 ft <sup>2</sup>	0.94 ton/año	2,239
Fotovoltaica	1,174	1.27 kW	0.79 ton/año	927
TOTAL				2,808

Tabla 1.4 Dióxido de carbono evitado de instalaciones solares comerciales de BSI.

Tecnología	Mercado potencial (techos)	Tamaño promedio del sistema	Promedio de CO <sub>2</sub> evitado por instalación	Mercado potencial de CO <sub>2</sub> evitado (ton)
SWH	140	52 ft <sup>2</sup>	3.2 ton/año	448
Fotovoltaica	214	5 kW	3.2 ton/año	685
TOTAL				1,133

La BSI contempla lograr cubrir el mercado potencial para el año 2020, tanto de la porción residencial como del comercial. Es decir, se estiman 3,575 instalaciones estimando 7,150 consultorías durante los once años o en promedio 650 consultorías por año durante la duración del programa. Los recursos económicos serán obtenidos del departamento de energía de estados unidos y de los recursos de la ciudad de Berkeley [3].

#### **Caso de Albena, Bulgaria.**

En este caso se analiza y evalúa mediante la simulación aplicada con STELLA, la mejora de hoteles y restaurantes en Albena, situados en el área turística de Bulgaria [4].

El objetivo de dicho estudio es poder sugerir a partir de las simulaciones la alternativa más limpia de producción y que permita el ahorro y uso eficiente de agua y electricidad. Las simulaciones en STELLA contemplan varios escenarios para periodos de 11 años.

La metodología implementada se basa en la consulta de la literatura, la recolección de información y el modelado en STELLA.

Para la realización del modelado se analizó el consumo eléctrico demandado para los diferentes servicios (Fig. 1.0):

- Hoteles: 38%.



La simulación consistió en escenarios para los cuales no existía ninguna mejora, para el que se realizan mejoras menores lo que reduciría en 14% el gasto de agua, un tercer escenario para el cual se considera cambios en el equipo para reducir el consumo de agua lo que trae como consecuencia en la simulación una reducción de hasta un 42% del consumo de agua.

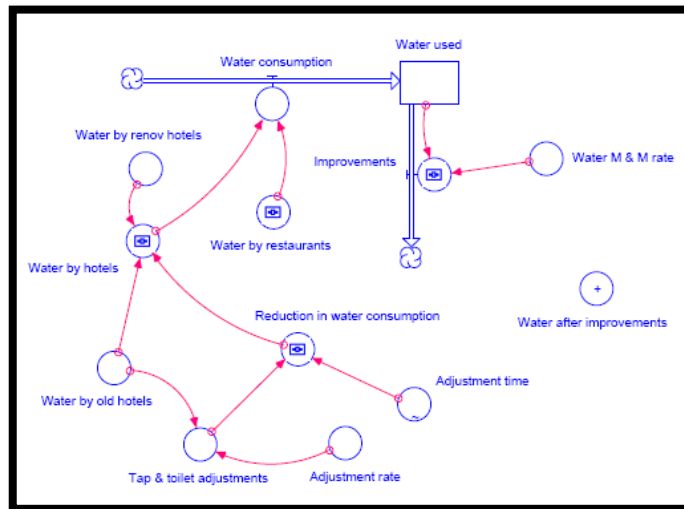


Figura 1.1. Modelo en STELLA del uso de agua. Fuente: <http://www.lumes.lu>

En este caso destaca el uso de STELLA (Fig. 1.1) para evaluar alternativas para lograr la reducción en el consumo de energía y agua además del análisis de alternativas de mejora en hoteles y restaurantes. En este estudio se pueden observar factores relevantes para la evaluación de casos similares como lo son; la relevancia de prácticas de uso adecuado y eficiente, la implementación de medidas que no requieran necesariamente grandes inversiones o modificaciones a los sistemas, y la identificación de factores determinantes para evaluar el impacto de las acciones a evaluar [4].

### **Caso Nueva Zelanda.**

En Nueva Zelanda se realizó en 2005 un estudio para el desarrollo del mercado para un uso a gran escala de calentamiento de agua con tecnología solar. Dicho estudio fue realizado por Ian McChesney en asociación con East Harbour Management Services Ltd. y Enercon Ltd [5].

En este se analizan las aplicaciones potenciales de calentamiento solar de agua y se identifican las áreas potenciales. Se encontró que el sector industrial cuenta con diversas aplicaciones como en la industria de alimentos, agrícola y forestal, de textiles, química, de servicios, de bebidas y en instituciones.

Dado el obvio potencial existente, se realizaron algunas aplicaciones en diferentes edificios, algunos de los ellos se muestran como ejemplo [5].

#### *Caso de estudio de un Hospital.*

En el análisis de un hospital para implementación de sistemas solares térmicos para agua caliente y vapor, se toma en cuenta la carga total de energía para vapor (1.2MW) y agua caliente (2.3MW) que proveen los calentadores alimentados con gas natural. La demanda de agua diaria es de 53,000 litros, la temperatura de 60-80°C, para lo cual se estimó un área de colectores de 44m<sup>2</sup> para la demanda durante el día y 132m<sup>2</sup> para cubrir completamente el calentamiento de agua almacenada. Para un área de 44m<sup>2</sup> se estimó un capital de \$34,800 dólares.

La contribución del calentador solar depende del nivel de contribución solar que se desee para satisfacer la demanda. Se asume que el calentador solar trabaja con una temperatura de entrada a 13°C participando como un proceso de precalentamiento para alcanzar temperaturas de 60°C y finalmente con el boiler lograr temperaturas de 90°C. La mayor demanda se supone en la noche, sin embargo los procesos de esterilización y lavandería operan durante el día.

El costo de energía estimado para el sistema de calentamiento solar es de 10c/kWh, el cual es mayor al costo de utilizar actualmente el proceso de calentamiento convencional a base de gas natural a 5-6c/kWh. Sobre el tiempo de vida del calentador solar los beneficios económicos se harán perceptibles dados los incrementos de precio de gas natural y volatilidad en los precios del gas. En la figura 1.2 se muestra el diagrama de calentamiento de agua y vapor del caso de un hospital [5].

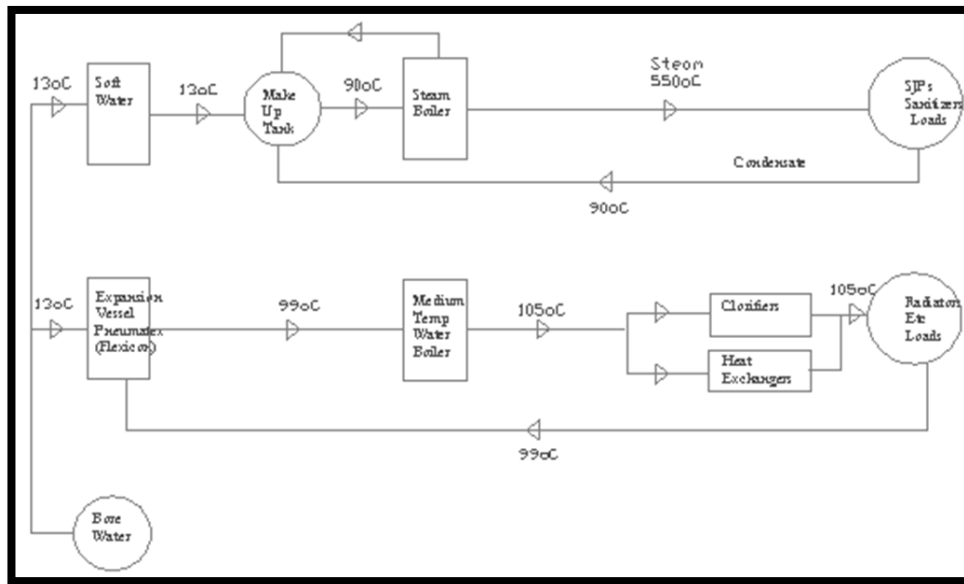


Figura 1.2. Diagrama de calentamiento de agua y vapor del caso de un hospital. Fuente: <http://motu.nz>

### *Caso de Edificio de oficinas.*

En un edificio de 40m de altura para oficinas, que cuenta con 8 niveles más un nivel base, fue evaluado la alternativa solar para ayudar a satisfacer la demanda de agua caliente para los servicios de regaderas en el nivel base, cocinetas en cada piso y la cafetería en el nivel base. Se propuso utilizar un sistema de calentadores solares en el techo del edificio para satisfacer la demanda de agua caliente además del uso de calentadores eléctricos instantáneos en cada piso.

La demanda estimada para regaderas es de 50 litros de agua caliente por día, en las cocinetas se estimó en 100 litros, en la cocina principal del edificio 150 litros. A partir de estos datos se calculó un sistema, considerando que la demanda a través del año no es uniforme, capaz de suministrar agua caliente a 3 tanques de 400 litros mediante el uso de 22m<sup>2</sup> de calentadores solares.

La evaluación económica arrojó la no viabilidad del proyecto dados los precios actuales de energía, ya que el costo estimado del sistema solar es aproximadamente de 20c/kWh. Los factores relevantes en el costo son la tubería instalada a través de los 8 pisos y las pérdidas térmicas a través de la

misma. Por lo tanto, dado el volumen de agua caliente utilizada relativamente bajo, la longitud de tubería necesaria y los posibles efectos de sombra provocados por futuras edificaciones en los alrededores, y el uso de las oficinas solo 5 días a la semana, reducen el potencial de uso del sistema solar a 30% [5].

#### *Caso de una casa de descanso.*

En una casa de descanso donde se utiliza un calentador eléctrico para satisfacer la demanda de 30 habitaciones individuales y 5 dobles, para el servicio de regaderas, baño y cocina. Los picos de demanda se dan entre las 7 y 11am. El sistema solar sugerido para este caso consiste en bloques, cada uno con tres boiler eléctricos de 2kW o 3kW.

Los colectores solares fueron instalados en cada bloque como precalentadores para cada grupo de boilers existentes. El consumo eléctrico se desactiva durante las horas pico y durante las tardes después de pruebas de experimentación.

El equipo instalado consistió en un par de sistemas termosifón de 400 litros para proveer una capacidad adicional de suministro de agua caliente. De tal manera que el consumo de electricidad se mantiene desactivado durante la mayor parte del año. El consumo de agua estimado es de 670 litros diarios, a una temperatura de 60°C. Por lo que la energía solar aprovechada al año es de 10,500 kWh/año para un sistema de calentamiento solar de agua de 15m<sup>2</sup>, para lo cual se invirtieron \$14,400 dólares. La evaluación económica arroja que no es económicamente viable, ya que implica un costo de 15c/kWh que está por arriba del costo de la energía eléctrica. Sin embargo, puede ser viable para lugares particulares y en el caso de incrementos en los costos de la energía eléctrica [5].

#### *Caso de estudio de un restaurante.*

En este estudio se refiere a un restaurante que opera en la tarde principalmente, el cual demanda agua caliente para el lavado de trastes en la cocina. El consumo de agua es de 400 litros para lavado

de trastes y 100 litros para la preparación de alimentos después de mediodía. Para tal caso se acopló un sistema termosifón de calentamiento solar de agua.

La demanda total se consideró en 500 litros por día, para lo que se utilizaron  $8\text{m}^2$  de colector solar, es decir, dos sistemas de 315 litros cada uno y una inversión de \$8,000 dólares. El ahorro de energía se traduce en  $5,600\text{kWh/año}$ .

El sistema contribuye a cubrir aproximadamente de dos terceras partes a  $\frac{3}{4}$  partes de la demanda de agua caliente. Esto es para tener un balance entre la energía excedente en verano y la insuficiente energía solar en invierno. Dado que el restaurante consume mayormente la cantidad de agua durante la noche hace necesario el almacenamiento de agua caliente, que en consecuencia la eficiencia del sistema disminuye en comparación de una demanda continua durante el día. El costo de calentamiento solar es de aproximadamente  $17\text{c/kWh}$ , lo que parece hacer infactible la aplicación en comparación del uso de gas o electricidad para calentar el agua bajo el esquema de precios actuales [5].

#### *Caso de un hotel.*

El hotel cuenta con 100 habitaciones, se clasifica como un hotel de tres estrellas con un promedio de dos ocupantes por nivel de ocupancia. El hotel tiene una ocupancia de 80%, y la demanda de agua es de 4,800 litros por día. El área de colector solar requerida se estima en  $80\text{m}^2$ , para los cuales es necesaria una inversión de \$56,000.

Las aplicaciones de uso de agua caliente del hotel se dan durante todo el día, así que el tamaño del sistema cubre prácticamente el 100% de la demanda durante los días de verano, y una contribución significativa durante el uso matinal de agua caliente.

El costo de calentamiento solar se estima en  $12\text{c/kWh}$ , lo cual es comparable con el costo de utilizar gas o electricidad para el calentamiento de agua [5].

## 1.2 TECNOLOGIAS.

### Tecnología de calentadores solares de agua.

El mercado para el calentamiento solar de agua puede clasificarse basado en el fin de uso de la aplicación de la tecnología. El servicio de agua caliente y calentamiento de agua para albercas son las aplicaciones más comunes. Dentro de los servicios de agua caliente tenemos el de uso doméstico, procesos en edificios comerciales, instituciones públicas e industria [6]. Algunos ejemplos de ello son los edificios de apartamentos, escuelas, centros de salud, hospitales, oficinas, restaurantes, hoteles, autos lavados, lavanderías, principalmente.

Los calentadores solares de agua tienen tres funciones básicas (Fig. 1.3):

- I. **Recolección:** captura la radiación solar y la captura el sistema colector.
- II. **Transferencia:** la circulación de un fluido de transferencia que se almacena en un tanque.
- III. **Almacenamiento:** el agua caliente es almacenada hasta que se necesita posteriormente, ya sea en un depósito en el cuarto de máquinas o sobre el techo.

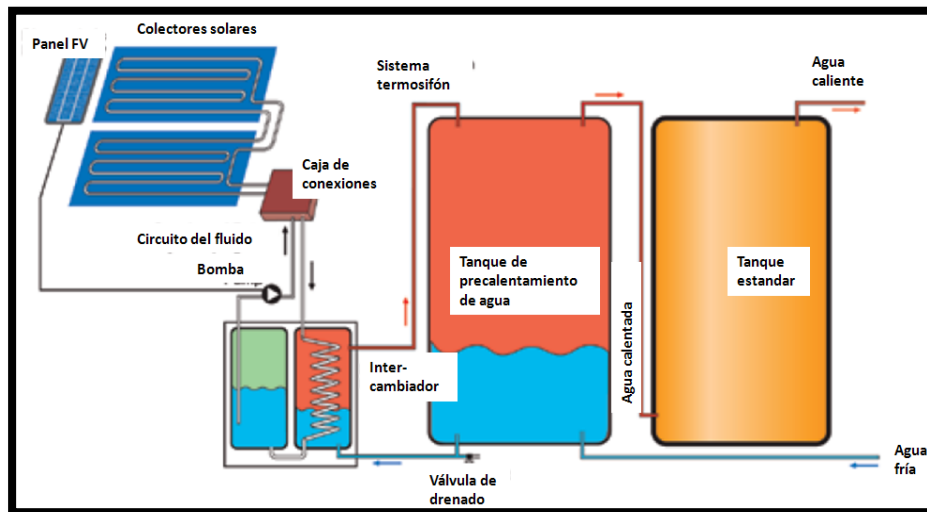


Figura 1.3. Diagrama de un sistema de calentamiento solar de agua con bombeo e intercambiador de calor.

Fuente: solar water heating Project analysis, Retscreen, minister of natural resources Canada 2001-2004.

Los equipos más comunes de uso para calentamiento de agua son los sistemas colectores de placa plana sin cubierta (figura 1.4). Por lo regular carecen de una cubierta, están hechos regularmente por polímero de color negro, son de diseño simple y cuentan con pérdidas térmicas debido al ambiente se incrementan rápidamente en lugares con mucho viento. Se utilizan preferentemente para calentamiento de albercas, acuicultivo, y otros procesos de baja temperatura.

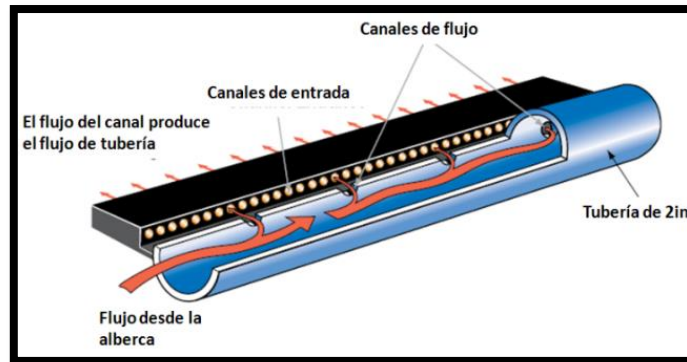


Figura 1.4. Colector plano sin cubierta para aplicaciones de baja temperatura.

Fuente: solar water heating Project analysis, Retscreen, minister of natural resources Canada 2001-2004.

Los colectores de placa plana con cubierta, una placa absorbente se coloca entre una cubierta y un panel aislante. Mucha de la energía solar es retenida debido a la cubierta (figura 1.5). Se utilizan principalmente para obtener temperaturas moderadas de aplicación doméstica, para calefacción, para albercas y procesos de calentamiento.

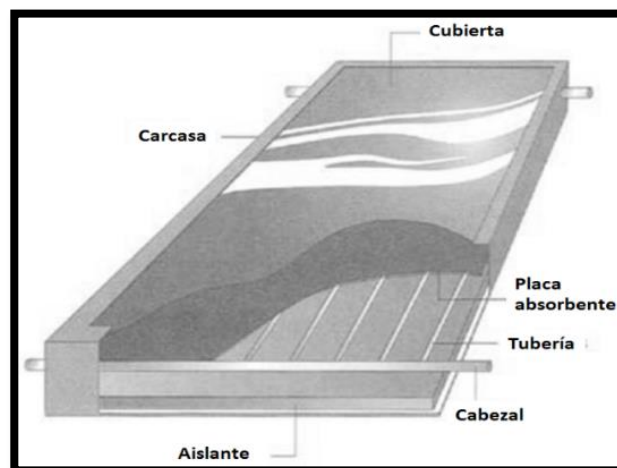


Figura 1.5. Colector plano con cubierta para aplicaciones de temperatura moderada.

Fuente: solar water heating Project analysis, Retscreen, minister of natural resources Canada 2001-2004.

Los colectores de tubos evacuados, tienen un absorbente con envolvente selectivo en tubos sellados al vacío (figura 1.6). Debido a su diseño las pérdidas de la energía solar capturada hacia el ambiente son mínimas. Estos colectores son adecuados para aplicaciones entre moderada y alta temperatura como lo son las domesticas, de calefacción y procesos típicos de 60-80°C.

Los sistemas de tubos evacuados pueden ser abiertos o presurizados, dependiendo de la aplicación cada uno cuenta con peculiaridades. El primero utiliza un tubo evacuado abierto (ver figura 1.7a), es decir, el agua llena el interior del tubo evacuado y es calentada internamente por el sol. E flujo de agua se da por termosifón, de manera que permite evitar costos de tubería de cobre, por lo tanto sus aplicaciones se encaminan al calentamiento de albercas.

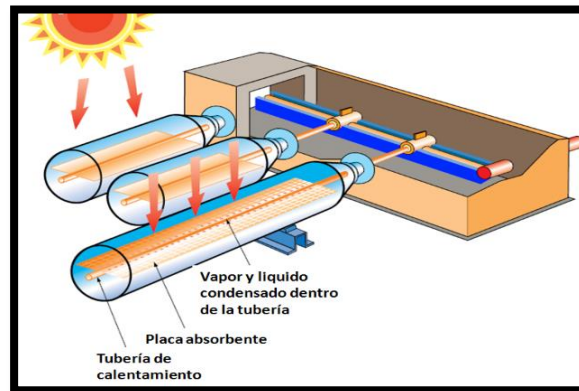


Figura 1.6. Colector de tubos evacuados.

Fuente: solar water heating Project analysis, Retscreen, minister of natural resources Canada 2001-2004.

En el segundo tipo de tubos evacuados las aplicaciones se incrementan (figura 1.7b). El principio es similar al primero, sin embargo en este el agua no entra físicamente dentro del tubo evacuado. En su lugar, una tubería de cobre se inserta dentro del tubo evacuado, de manera que esta conduzca el calor eficientemente. El interior de la tubería de cobre contiene agua en un vacío, de tal modo que hierve a menos de 30°C.

El vapor llega al bulbo condensador que transfiere el calor al fluido que está en contacto con él. Las temperaturas que puede alcanzar son superiores a los 200°C. Entre sus aplicaciones están la de generar agua caliente, para radiadores (calefacción) y suelo radiante [7].

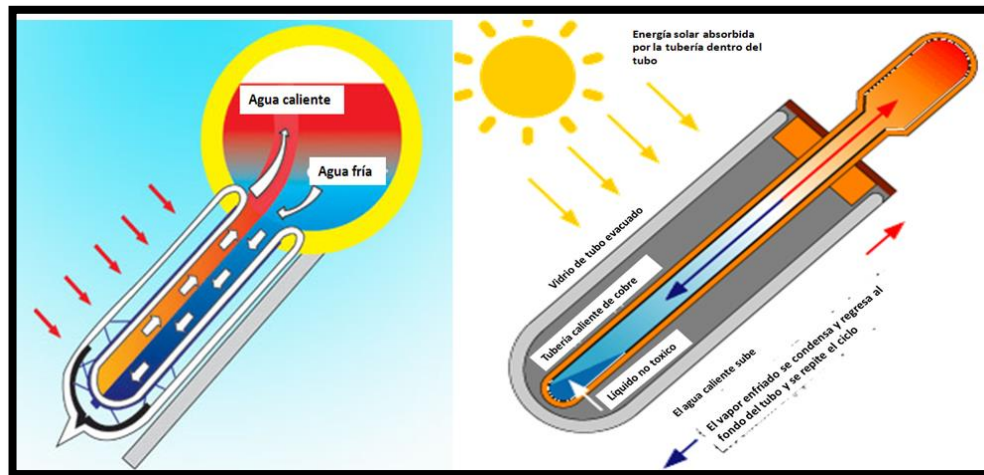


Figura 1.7a Tubos evacuados abiertos. Figura 1.7b. Tubos evacuados cerrados.

Fuente: [www.solartubs.com](http://www.solartubs.com)

Los anteriores sistemas de calentamiento solar son adecuados para la mayoría de los casos y necesidades del área residencial y comercial, sin embargo en el sector industrial se requieren sistemas más peculiares que permitan brindar energía térmica de calidad y adecuada para los procesos, así como el volumen necesario.

Los concentradores solares son equipos adecuados para alcanzar temperaturas elevadas necesarias para generar vapor, calentar fluidos, desalinización, calefacción de procesos, tratamiento de productos alimentarios, entre otros. Los cilindros parabólicos satisfacen las necesidades de calentamiento para temperaturas aproximadas de hasta 100°C.

En la figura 1.8 se muestra el esquema de un sistema con cilindros parabólicos capaz de suministrar de un 50% a un 70% de demanda de agua caliente de hoteles, hospitales, etc. [8].

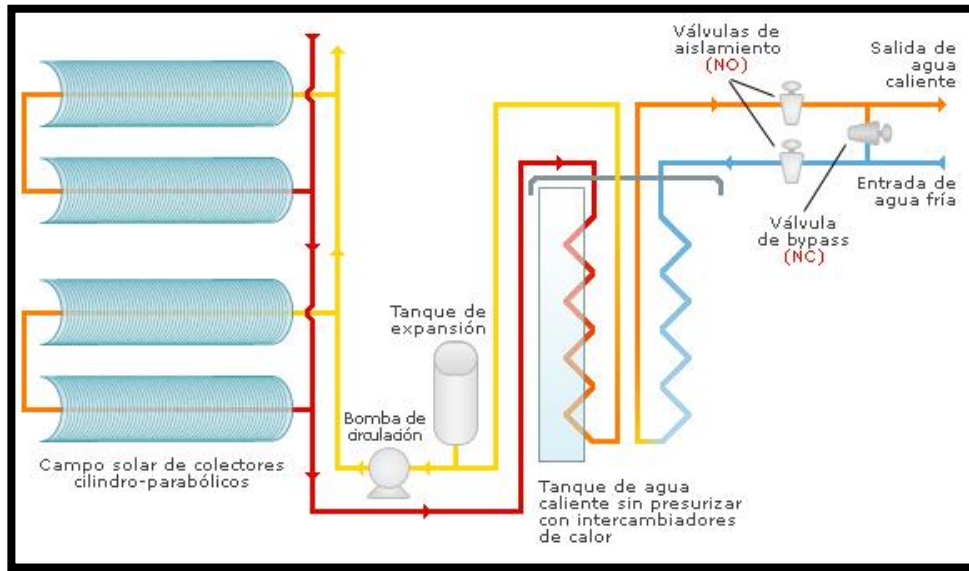


Figura 1.8. Cilindros parabólicos para agua caliente en la industria.

Fuente: [www.abengosolar.es](http://www.abengosolar.es) Abengo a solar, S.A., 2008.

El uso de calentamiento solar en la industria considera varios criterios de evaluación de una alternativa de este tipo; la continuidad de la demanda, la temperatura de trabajo, las condiciones climáticas y el tamaño del sistema. La energía solar térmica se puede clasificar por el rango de temperatura que puede alcanzar el sistema [6], como se describe en la tabla 1.5:

Tabla 1.5. Clasificación de energía solar térmica por temperaturas obtenidas.

Fuente: Energías renovables, Tomas Perales Benito, 2005.

De baja temperatura	Corresponde a las instalaciones cuyo fluido no alcanza una temperatura superior a los 90°C. Se utiliza en el sector residencial y hotelero, para obtener agua caliente y calefacción.
De media temperatura	Estos sistemas se emplean en procesos industriales, para proporcionar temperaturas de entre 80 y 250°C.
De alta temperatura	También corresponde a las aplicaciones industriales de generación de vapor para electricidad o similar, donde se requiere una temperatura mayor a los 250°C.

Esta serie de antecedentes o casos de estudio previos, marcan la pauta para definir consideraciones y aspectos a tomar en cuenta en el presente trabajo, ya que sirvieron para observar que la gama de áreas de aplicación de los calentadores solares es muy amplia, que van desde residencial hasta usos industriales, además se observa que la tecnología está disponible en el mercado y que es muy variable en cuanto diseño y materiales.

Dado que el trabajo se valida con información de datos medidos, se limita el diseño del modelado de la simulación a la tecnología de colectores de placa plana, puesto que no se tiene la oportunidad de monitorear todas las tecnologías operando en campo.



## **CAPITULO II: CONTEXTO.**

### **Introducción.**

Baja California es el estado de la República Mexicana situado al Noroeste, sus principales ciudades Mexicali la capital, Tijuana y Ensenada, estas últimas situadas en la zona de la costa oeste del estado. La capital cuenta con un clima desértico, por lo que las temperaturas van de frío a calor extremos.

En tanto Tijuana se caracteriza por ser una ciudad industrial con clima mediterráneo y colindante con el estado de California en Estados Unidos. Ensenada por otra parte más al sur de Tijuana, cuenta con clima también mediterráneo, pero con actividades comerciales enfocadas al turismo y a la pesca.

## 2.1 ANALISIS DE VARIABLES

### Recurso solar en Mexicali, Ensenada y Tijuana.

Debido a las características particulares de localización de las ciudades principales del estado de Baja California, se pueden denotar algunas diferencias en cuanto al comportamiento del recurso solar del que disponen. El comportamiento de la radiación solar se muestra en las figuras 2.0 y 2.1 para las ciudades mencionadas y para la temporada de invierno y verano.

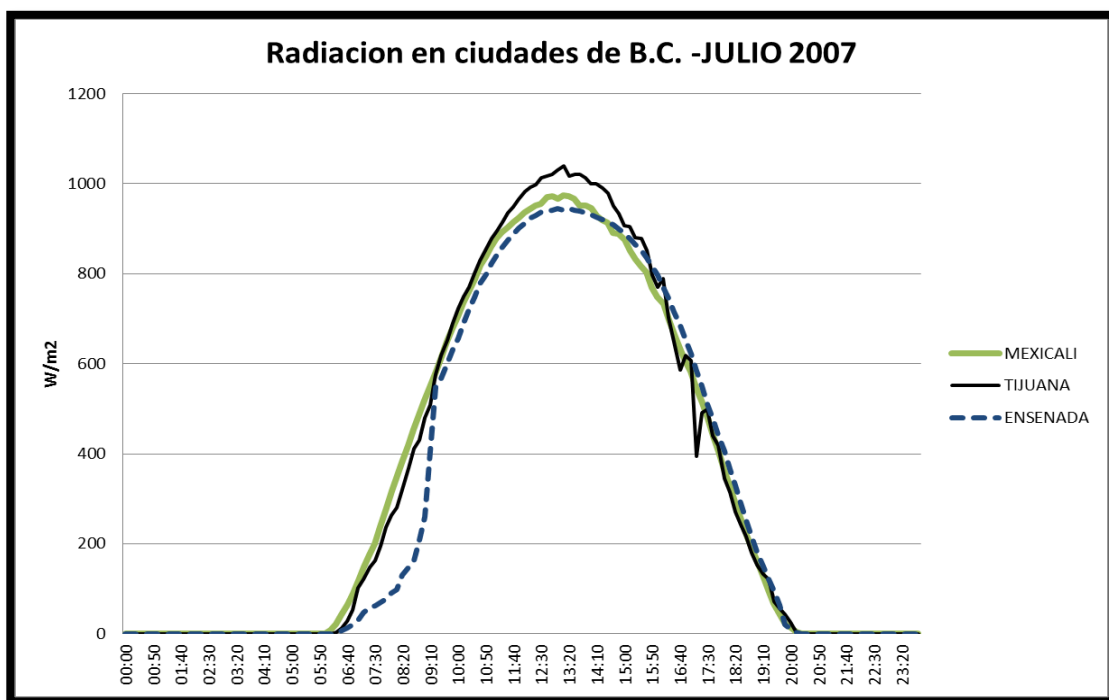


Figura 2.0. Radiación solar para cada ciudad en un día típico de Julio.

Fuente: Este estudio con datos de estaciones meteorológicas de CNA.

En esta figura 2.0, se observa que la radiación en general para las 3 ciudades se comporta muy similar con muy poco margen de diferencia en valores promedio, sobresale un poco Tijuana considerando que tanto Mexicali y Ensenada tienen un efecto de la claridad del cielo, para el caso de Mexicali relacionándose al polvo y contaminación del aire, mientras que Ensenada es atribuible al efecto de nubosidad como se ve al inicio del día donde la curva de radiación tiene un inicio peculiar, asumiendo este efecto a la neblina y humedad del aire que se genera en la costa.

Aparentemente en la figura 2.1 siguiente, que corresponde al mes de enero, existe un comportamiento no uniforme en la curva de radiación solar, atribuido a la época de lluvia que predomina en Tijuana y Ensenada, y en menor medida afecta Mexicali. Se observa además, que la radiación máxima es aproximadamente de  $650\text{W/m}^2$  y en el caso de Mexicali claramente inferior a los  $600\text{W/m}^2$ .

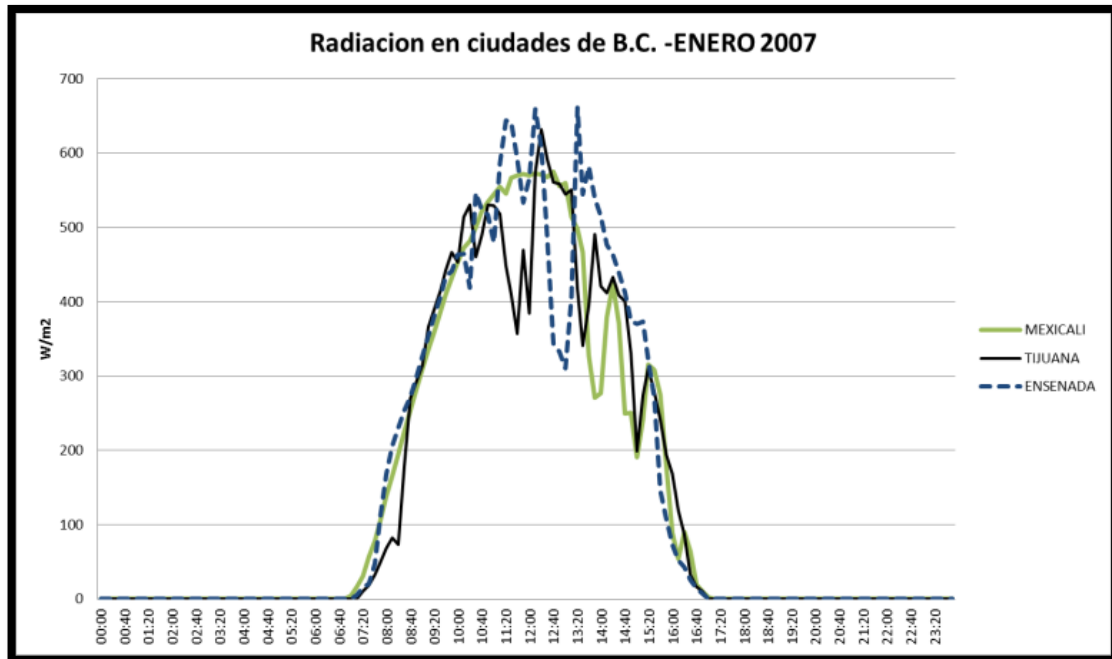


Figura 2.1. Radiación solar para cada ciudad en un día típico de Enero.

Fuente: Este estudio con datos de estaciones meteorológicas de CNA.

En tanto, la temperatura ambiental durante un mismo día se comporta drásticamente para cada ciudad en estos mismos meses extremos, como se observa en las gráficas 2.2. y 2.3, que corresponden a un día típico de julio y enero.

Es claro que la ciudad que presenta un comportamiento más extremo en el rango de temperaturas es Mexicali, alcanzando máximos por arriba de los  $45^{\circ}\text{C}$  durante verano y por debajo de los  $10^{\circ}\text{C}$  en el mes de Enero. Tijuana es una ciudad que presenta un comportamiento uniforme en sus temperaturas y Ensenada apenas varía levemente en las temperaturas más bajas del mes de Enero. Esto permite establecer que cada ciudad obedece a una demanda de energía térmica diferente en el tiempo y en cantidad. Siendo Mexicali una ciudad con demanda de agua caliente mayormente en invierno, mientras que Tijuana y Ensenada presentan condiciones de demanda durante todo el año.

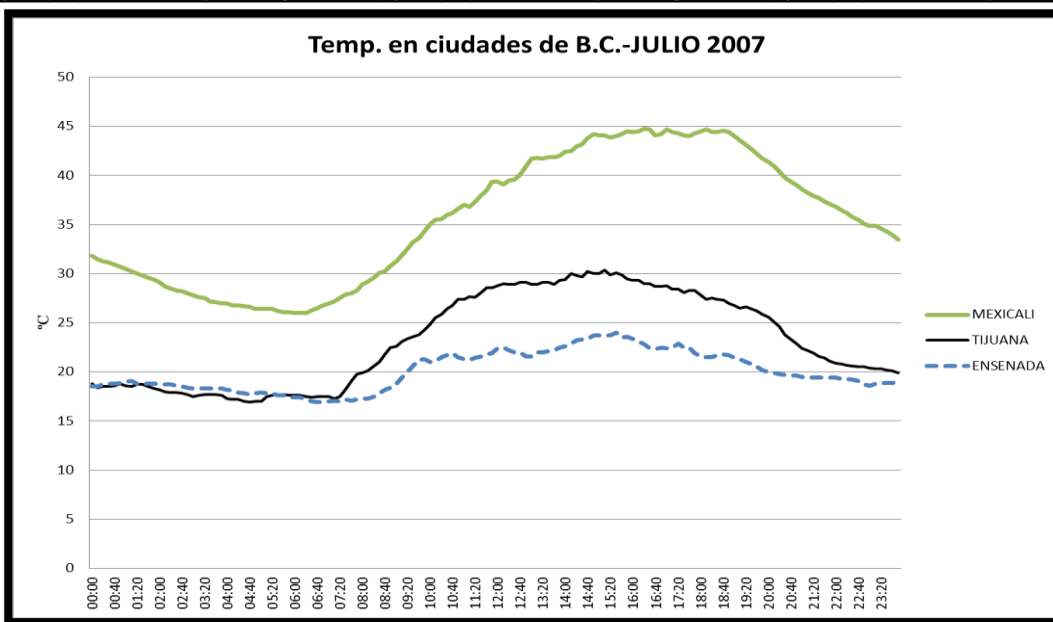


Figura 2.2. Temperatura ambiente para cada ciudad en un día típico de julio. Fuente: Este estudio con datos de estaciones meteorológicas de CNA.

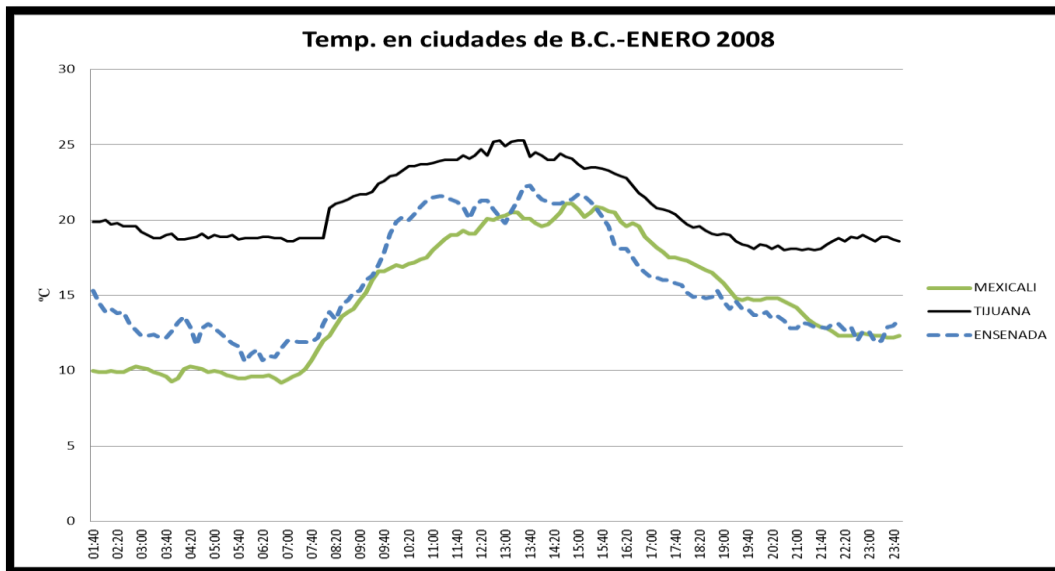


Figura 2.3. Temperatura ambiente para cada ciudad en un día típico de enero. Fuente: Este estudio con datos de estaciones meteorológicas de CNA.

Como se muestra en la figura 2.4, se observa el promedio anual de radiación mensual para cada ciudad. Se destaca que al ser promedios de un solo año permiten resaltar el comportamiento de la radiación solar promedio mensual, donde se reflejan en invierno (Enero y Diciembre) la poca variación en los valores de esta variable, sin embargo de Mayo a Agosto, se amplía una diferencia que aunque Tijuana tiene cielo más claro, también tiene nublados intermitentes o parciales, mientras

que Mexicali prácticamente no presenta nublados y a pesar de tener un cielo menos claro presenta valor promedio superiores a las otras ciudades.

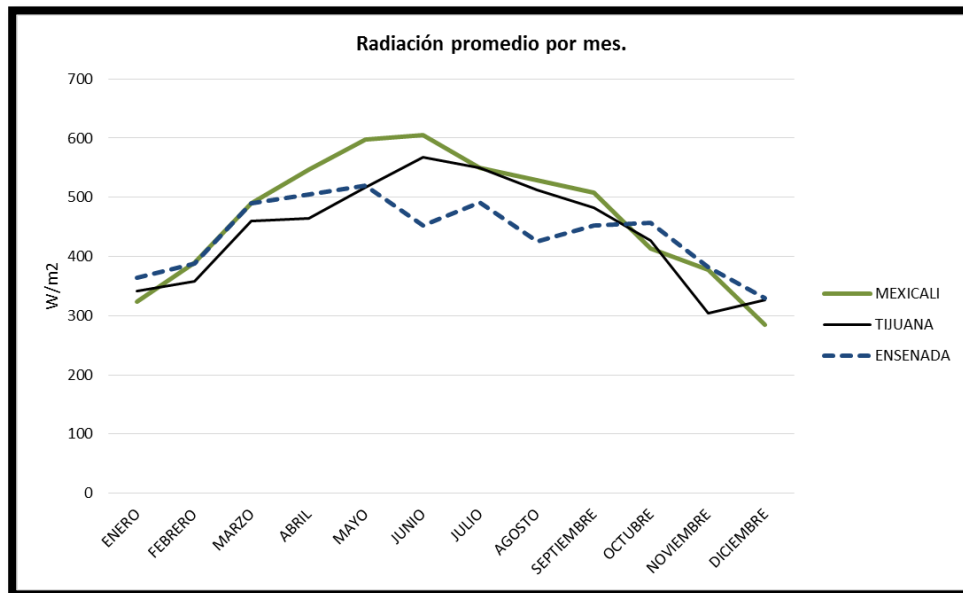


Figura 2.4. Promedio de radiación mensual para las ciudades de B.C. Fuente: Este estudio con datos de estaciones meteorológicas de CNA.

Para que una tecnología pueda ser desarrollada y después implementada, deben suceder dos cosas, existir **una necesidad** y **ser aceptada** por quienes la necesitan.

En este punto se plantean las diferentes áreas donde el uso de calentadores solares poseen un alto potencial de implementación, tanto por la relevancia que presentan para satisfacer una necesidad, como para el usuario que le resulta de interés obtener un medio de calentamiento de menor costo.

## **2.2 AREAS DE USO POTENCIAL.**

### **Mercado de la tecnología de calentadores solares.**

El sector hotelero en México juega un papel muy importante en la economía de algunas ciudades, sin mencionar que brindan un servicio indispensable. En el país existen 13,057 hoteles con cerca de 516 mil habitaciones, por lo que la inversión en el uso de energías renovables representa una oportunidad para aplicaciones termosolares.

Los hoteles clasificados como de tres estrellas o más tienen un consumo excesivo de energía térmica y tienen un potencial de ahorro que supera el 70%, aunado a ello su factura energética representa cerca del 20% de los costos operativos de los hoteles.

La oportunidad de calentadores solares de agua (CSA) se estima en un potencial de Energía Térmica Reemplazada de 2,388 millones de MJ/año, equivalentes a 416 mil barriles de petróleo. El potencial de área de CSA es de 559 mil metros cuadrados [9].

Lo anterior aunado a actividades del sector restaurantero, lavanderías y limpiadurías, además del sector servicios como hospitales, evidencian una amplia necesidad de suministro de agua caliente, indispensable en los procesos que se llevan a cabo en cada uno de los anteriores. En Baja California, por lo tanto, como se muestra en la figura 2.5, el comercio representa una parte significativa de las actividades económicas del estado.

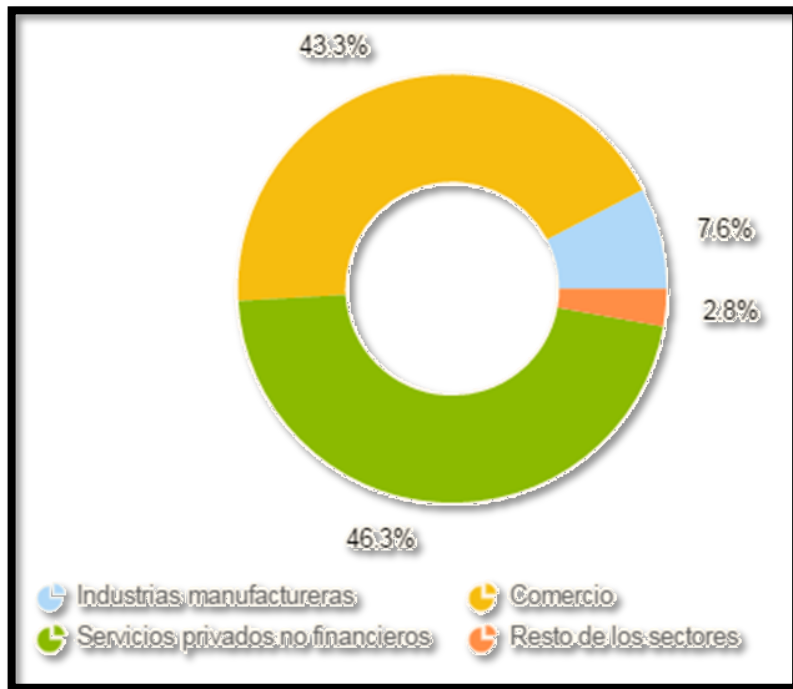


Figura 2.5. Estructura sectorial en Baja California.

Fuente: Censo comercial de INEGI 2016.

La información de este capítulo permite no solo conocer el contexto general del área espacial de interés, es decir las características de las ciudades principales de B.C., si no también identificar peculiaridades que son relevantes para simplificar el modelo de simulación. Ya que cada ciudad presenta un comportamiento diferente en la temperatura ambiente, la cual es un referente para establecer épocas de demanda de agua caliente, y en lo que a la radiación solar se refiere, permite comprender la diferencia entre el comportamiento de los datos promedio mensual de los datos horarios de un día normal para cada ciudad. Es decir, gracias a lo anterior se asume que Tijuana y Ensenada tienen un potencial de uso mayor respecto al año, ya que su temperatura ambiente es propicia para la demanda de agua caliente, mientras que en Mexicali se limita a solo los meses invernales.



## **CAPITULO III. METODOLOGÍA.**

### **Introducción.**

En la presente metodología, se propone una forma diferente de estimar la ganancia de energía térmica por parte de los sistemas colectores de agua caliente, explícitamente de los modelos de placa plana. Normalmente o de forma común, las herramientas de cálculo utilizan valores promedio de las variables de temperatura y radiación, ya sean teóricas o medidas de estaciones relativamente próximas al área de estudio. A la vez, se presentan resultados en términos de energía captada en valores anualizados o mensuales. Para fines de una mejor alternativa en la toma de decisiones, esta metodología propuesta, permite presentar la ganancia de energía en valores horarios de un día típico mensual, permitiéndole al usuario buscar las condiciones que optimicen la instalación de calentamiento solar acorde a sus horarios de mayor demanda y meses de mayor uso.

La ganancia energética no siempre coincide con la demanda del usuario, en algunos casos esto se vuelve relevante puesto que se tiene que almacenar la energía captada, lo que conlleva un gasto mayor y desaprovechamiento de energía.

### 3.0 METODOLOGÍA.

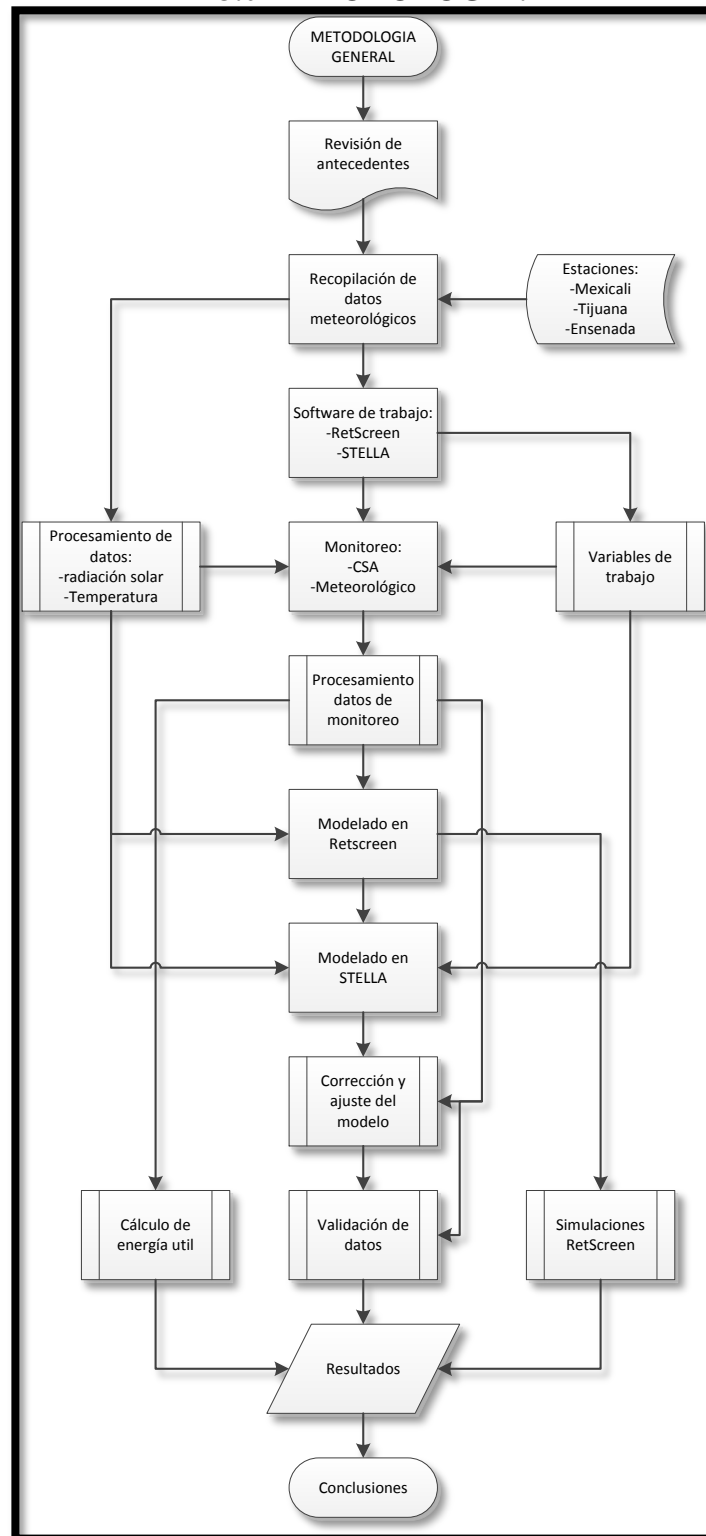


Figura 3.0. Metodología general de trabajo. Fuente: elaboración propia.

### 3.1 DESCRIPCION METODOLOGICA.

La mayoría de las herramientas programáticas utilizadas para simular y estimar la producción de energía o la captación de los calentadores solares de placa plana, están diseñadas bajo una serie de criterios y consideraciones que resultan poco adecuados en algunos casos. El uso de datos promedio por mes o por año, consumo promedio o factor de uso, entre otros son factores que en algunos casos es conveniente analizar.

En este trabajo se propone metodología (ver figura 3.0) para optimizar el dimensionamiento e instalación de los calentadores solares de agua de placa plana, considerando que el uso de agua caliente obedece a diferentes comportamientos de demanda y de uso a lo largo del día, además del uso estacional.

**Primero.** Se realizó una selección de las fuentes de información de datos meteorológicos, obteniendo datos de las estaciones correspondientes a Ensenada, Tijuana y Mexicali. Esta información consistió en las mediciones tomadas a intervalos de 10 minutos para ser procesados de forma horaria y afinar el comportamiento de un calentador solar de agua para los días típicos de cada mes.

**Segundo.** Selección de un programa comercial y de uso común para comparar la metodología que implementa, las fuentes de información que utiliza y los modelos de cálculo en los que basa sus análisis. En este caso en base a su disponibilidad de acceso, popularidad de uso y entorno amigable, RetScreen fue el programa seleccionado (Fig. 3.1).



Figura 3.1. RetScreen para calentamiento solar de agua, versión SWH3. Fuente: <http://www.nrcan.gc.ca/>

**Tercero.** El análisis de las variables requeridas para realizar el dimensionamiento de un sistema de calentadores solares de agua y aquellas requeridas para estimar la cantidad de energía obtenida por aporte solar.

**Cuarto.** El monitoreo de un par de calentadores solares de agua de placa plana, conforma la parte experimental del trabajo, ya que se instrumentaron y tomaron lecturas a intervalos de 5 minutos a fin de analizar la información de manera precisa. Se monitorearon las variables de entrada y salida de agua del calentador solar de agua (CSA) y la temperatura del agua dentro del termotanque, de igual manera se monitoreo la hora y el volumen de agua caliente que el usuario retiro del tanque. Se utilizó también, la temperatura a la salida del calentador de paso, como referencia para dos variables: primero verificar la hora en que se realizó el consumo de agua caliente y segundo verificar la temperatura ambiente respecto a los datos de las estaciones meteorológicas.

Adicionalmente, se incorporó al monitoreo la medición de las variables meteorológicas en sitio, mediante el uso de una estación meteorológica portátil, a fin de obtener datos simultáneos y cercanos a los CSA.

**Quinto.** El análisis y procesamiento de la información de las estaciones meteorológicas de Ensenada, Tijuana y Mexicali del año de 2009, a fin de obtener los datos promedio por hora mensuales, promedios diarios, de la variable de radiación y temperatura.

Sexto. Procesamiento de los datos de monitoreo para determinar la cantidad de energía captada por el CSA, energía utilizada por el usuario, el horario de uso frecuente del usuario y la radiación incidente sobre el CSA.

**Séptimo.** Modelado de la simulación en Retscreen para cada una de las tres ciudades de interés: Ensenada, Tijuana y Mexicali. Utilizando la información meteorológica de las estaciones correspondientes a cada ciudad.

**Octavo.** Modelado en el simulador STELLA (versión 9.0.3, fig. 3.2), utilizando como base de análisis el día típico mensual, los cuales se seleccionaron de los datos de monitoreo de Enero de 2012 a junio de 2012, ya que resultan representativos de los meses de invierno y verano.



Figura 3.2. Programa para modelado de programas de simulación.

Fuente: ise systems 2010.

**Noveno.** Ajuste y corrección del modelo de simulación en STELLA, debido a que se programó con base de datos horarios, es necesario verificar y ajustar la información de los resultados de la variable de salida en la simulación; cantidad de energía captada por el CSA cada hora, utilizando como referencia los valores de esta variable en el monitoreo del CSA.

**Decimo.** Validar y verificar la información obtenida de la simulación realizada en el modelo en STELLA y comparar este resultado con el obtenido en RetScreen bajo las mismas condiciones, permite establecer las diferencias entre los valores obtenidos.

Para los datos obtenidos de las simulaciones y comparaciones realizadas entre las herramientas de RetScreen y STELLA, se determina el porcentaje de variación existente y se explica el comportamiento de los resultados. Se emplea la variable de energía captada para realizar el análisis comparativo y presentación de resultados.

**Onceavo.** Procesamiento, análisis e interpretación de la información en términos comunes comparables, dado que lo que se busca es determinar la cantidad de energía obtenida por el sistema de CSA, la unidad de comparación en común se define por kWh. En los datos medidos se calcula la energía obtenida y la energía útil que queda almacenada en el

termotanque, en RetScreen el resultado está dado en unidades de MWh anuales de energía térmica obtenida por el sistema, y en el Modelo de Simulación en kWh promedio por día.

Es importante tener en cuenta que la información de entrada en la herramienta de simulación de referencia es básicamente la misma de la que se parte para generar el modelo en STELLA, pero no así los términos en que se presentan los resultados, por ello la flexibilidad de la metodología permite presentar los resultados de manera comparable entre ambas herramientas. Básicamente el programa RETScreen emplea el modelo matemático de Duffie-Beckman (1991) [10] y las bases de datos de la página de la NASA (<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>) para el cálculo teórico, que si bien en términos globales es muy aproximado, la presentación de energía total anual no facilita toma de decisiones particulares para optimización entre captación de energía y utilización.

Finalmente la metodología considera el uso del día típico mensual, es decir, a partir de los días que conforman cada mes se identifican aquellos que presentan un comportamiento similar y predominante en el mes respectivo, tomando de este grupo un día entre las fechas del 12 al 21 de cada mes. Este se realiza para cada mes de cada ciudad y de los datos históricos de años disponibles de monitoreo de estaciones meteorológicas de CNA.



## **CAPITULO IV. FUNDAMENTO.**

### **Introducción.**

El diseño y dimensionamiento de un sistema de colectores solares, se basa de manera general en dos tipos de instalación; el sistema forzado (con bombeo) y el sistema por circulación natural (termosifón). Para ello, el criterio de uso de un sistema de bombeo se basa en la cantidad de colectores y posición del termotanque, lo que básicamente se reduce al uso de circulación forzada para proyectos comerciales e industriales.

## 4.1 TIPOS DE SISTEMAS DE CSA.

### Configuración con sistema de bombeo.

Un sistema de circulación forzada de calentamiento solar de agua implica la utilización de una bomba, de manera que este tipo de arreglo permite colocar el depósito de agua (termotanque) en cualquier punto respecto a la posición vertical del sistema de colectores, es decir, el tanque puede estar en un punto menos elevado que el colector. Colocar un sistema de bombeo permite conservar un flujo continuo a través del colector y optimizar su funcionamiento, aunque a la vez conlleva un consumo de energía adicional para la bomba [6].

El sistema de circulación forzada es requerido para sistemas grandes donde existen arreglos en serie y paralelo de los mismos colectores y varias ramas en las entradas y salidas. Por ende, un sistema de calentamiento solar en sector comercial deberá ser mediante circulación forzada (fig. 4.0).

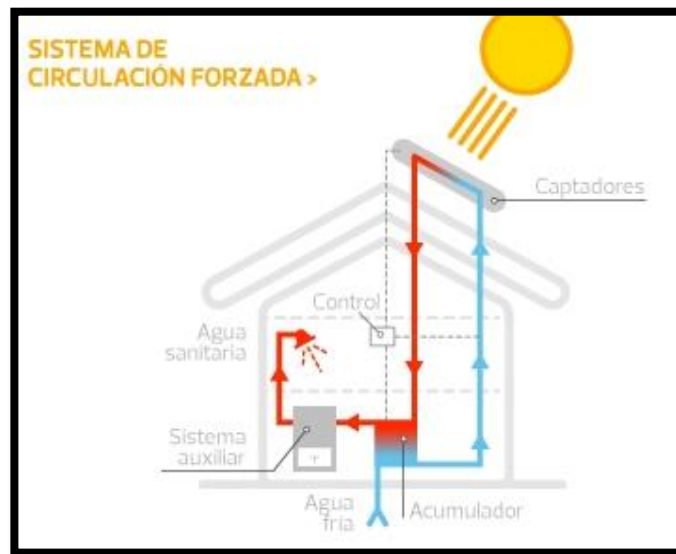


Figura 4.0. Instalación con sistema de circulación forzada.

Fuente: <https://renovamos.org/>

### Configuración con sistema termosifón.

En lo que al arreglo de calentamiento por termosifón se refiere (fig. 4.1), se tiene que en la instalación el termotanque tiene que estar por arriba de la altura del punto más alto del colector solar, es decir, el colector debe estar por debajo del termotanque. Esto permite que el fluido calentado circule naturalmente al ser calentado dentro del colector hacia el termotanque (efecto termosifón). Este tipo de instalación básicamente reduce su aplicación al sector residencial, tanto por el volumen demandado como por la capacidad requerida [6].

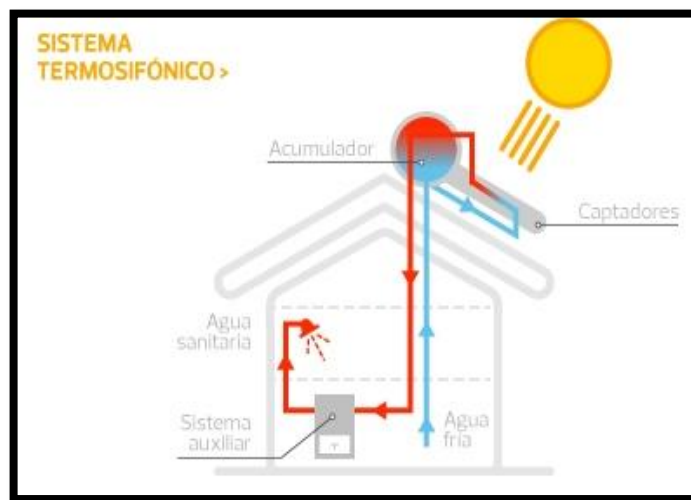


Figura 4.1. Instalación con sistema de circulación natural.

Fuente: <https://renovamos.org/>

## 4.2 CALCULO DE ENERGIA.

### Variables necesarias para cálculo.

Normalmente el modelo matemático para el cálculo teórico de la energía útil captada por un sistema de calentamiento solar [6,10], está dado como sigue:

$$Q_{\text{útil}} = m C_p (T_e - T_s) \quad \text{ec.4.0}$$

Donde:

Q<sub>útil</sub>: es la cantidad de energía captada por el colector solar

m: es el flujo de agua que pasa por el colector

Cp: es la capacidad calorífica del fluido de trabajo (agua)

Te: temperatura de entrada del termotanque o de salida del colector

Ts: temperatura de salida del termotanque o de entrada del colector

Además, para calcular la eficiencia del mismo [6,10], se tiene:

$$\eta_c = Q_{\text{útil}} / (H_t * A_t) \quad \text{ec.4.1}$$

Donde:

$\eta_c$  : es la eficiencia dada por la relación del calor aprovechado con respecto a la radiación solar incidente.

Ht: radiación solar

At: área total de captación del colector

Considerando lo anterior, para la modelación se toma en cuenta el valor de radiación solar incidente sobre el área total de captación del colector, tomando en cuenta el valor de la radiación solar en intervalos de 10 minutos como los muestra la estación meteorológica, además se considera el ajuste del área de captación la cual varía en función de la posición relativa del sol con el ángulo de incidencia, lo anterior se refiere al modelo de radiación incidente en plano inclinado propuesto por Duffie y Beckman [10].

Con base a las ecuaciones de este capítulo, se calcula la ganancia de energía captada por el colector, utilizando los datos de monitoreo de temperatura, específicamente la temperatura de entrada y salida del colector, además de la temperatura interior del termotanque. Se realiza el cálculo por cada intervalo de medición (5 minutos) y se obtiene a partir de estos la energía por cada hora (12

mediciones). Con lo anterior se puede formular el modelo principal de la función de ganancia de energía para un día típico, entendiéndose este último como el día que representa los días que se repiten con mayor frecuencia en un mes dado.



## **CAPITULO V: DESARROLLO.**

### **Introducción.**

En el presente capítulo se describe y detalla cada proceso realizado para la obtención, manejo y procesamiento de la información. Primero se obtuvieron, analizaron y procesaron datos meteorológicos de Tijuana, Ensenada y Mexicali. Como segundo paso, se seleccionaron los modelos de calentadores de placa plana certificados por la Solar Rating and Certification Corporation (SRCC) de EU. El tercer punto consiste en el monitoreo de los CSA, instrumentación y la adquisición de la información. Finalmente la información de la estación meteorológica instalada en el sitio de monitoreo de los CSA.

## 5.1 REGION DE ESTUDIO.

Baja California es un estado cuya población se encuentra focalizada en sus tres principales ciudades; Ensenada que es una ciudad portuaria situada en la costa del Pacífico y que por ende las actividades que ahí se realizan están relacionadas al turismo y a la pesca, Tijuana por otra parte es un ciudad próxima a la costa del Pacífico situada al norte del estado y colindante con Estados Unidos, lo que la hace una ciudad con gran desarrollo industrial, comercial y turístico, finalmente Mexicali se localiza al noreste del estado y colindante también con la frontera estadounidense (fig.5.0), lo que la hace una ciudad con desarrollo industrial y comercial [11].

Las características particulares de localización de cada una, hace relevante las consideraciones para la implementación de CSA, ya que cada ciudad presenta condiciones que deben ser tomadas en cuenta para una correcta instalación de los sistemas de calentamiento solar de agua y el dimensionamiento correcto de estos mismos.



Figura 5.0. Principales ciudades de Baja California.

Fuente: <https://es.pinterest.com>

## 5.2 DATOS METEOROLÓGICOS.

La información meteorológica fue tomada de las estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CNA) localizadas en las ciudades de interés de Mexicali, Tijuana y Ensenada. Se tomaron en cuenta los datos históricos de años anteriores para obtener un comportamiento promedio con la menor variación posible.

Las bases de datos están en intervalos de medición para cada 10 minutos, por lo que se generó un programa de procesamiento de datos para realizar correcciones de lecturas fuera de rango, obtener promedios horarios, diarios, mensuales y anuales (fig. 5.1).



Figura 5.1. Procesamiento de datos meteorológicos.

Fuente: Elaboración propia.

La información fue procesada de todos los datos del año 2009, de lo cual se obtuvo el promedio de datos de radiación y temperatura ambiente [12]. En el caso de la radiación solar diaria se empleó el siguiente criterio:

$$\text{Rad} = \sum I_{(i)} / n \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde:

Rad= radiación promedio por día en  $\text{W/m}^2$

$\sum I_{(i)}$ = sumatoria de las mediciones de radiación tomadas.

(i)= hora de medición tomada en el intervalo de medición para la radiación.

n= número de datos medidos para el día analizado, durante las horas de sol.

Es decir, se calculó el promedio tomando como referencia las horas en que hay radiación solar y no las 24 hrs que dura el día (ver fig. 5.2). Los datos fueron procesados y filtrados ya que se solicitó la información de las lecturas brutas de las estaciones de CNA, las cuales en algunos casos contienen errores o valores fuera de rango, falta de datos y desfase de horarios, por lo que fue rectificada tal información.

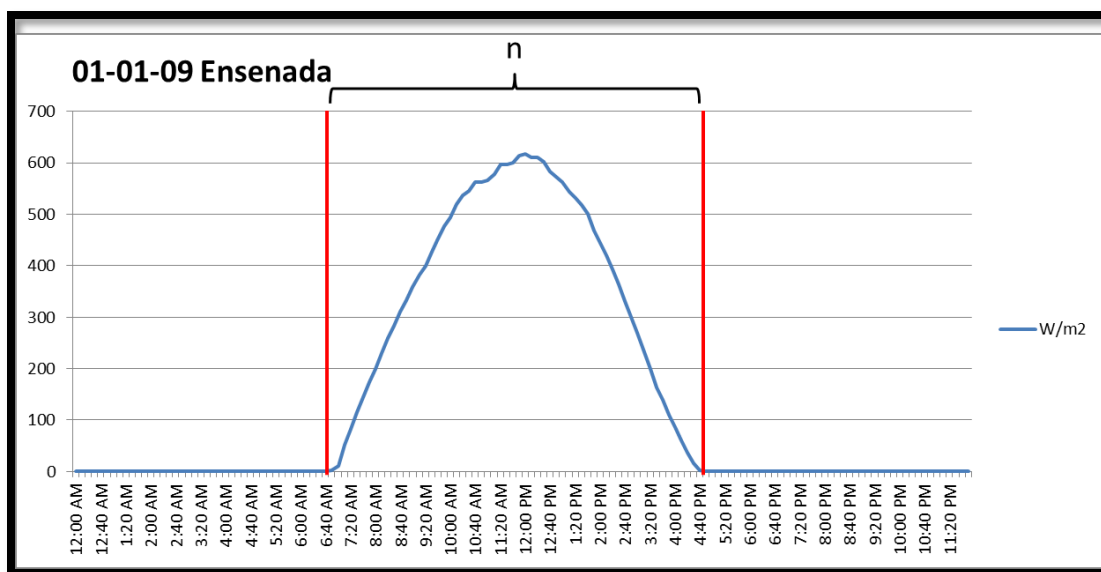


Figura 5.2. Comportamiento de las horas solar, o día solar de Ensenada en Enero.

Fuente: Elaboración propia, con datos de CNA (2009).

En la figura 5.2, también se observa que los intervalos de medición que manejan las estaciones automáticas de CNA son cada 10 minutos, lo que brinda gran exactitud de los datos y de sus variaciones en el transcurso de un día.

De esta manera se procesaron los datos de las ciudades de Mexicali, Tijuana y Ensenada, obteniendo las tablas resumen de los comportamientos promedio de las variables de temperatura y radiación principalmente.

Tabla 5.0. Ejemplo de tabla resumen de datos procesados por día, mes y año.

Fuente: Elaboración propia con datos de CNA (2009).

PROMEDIO												
MES	DIA1	DIA2	DIA3	DIA4	DIA5	DIA6	DIA27	DIA28	DIA29	DIA30	DIA31	PROMEDIO POR MES
ENERO	363	276	112	388	387	371	333	437	440	466	453	364.35
FEBRERO	443	468	425	462	378	157	400	517	0	0	0	388.71
MARZO	519	472	334	488	477	489	555	575	561	526	556	489.67
ABRIL	512	276	366	570	593	594	386	508	587	561	# DIV/0	504.86
MAYO	316	499	564	558	566	579	528	190	285	559	452	519.49
JUNIO	453	355	436	429	506	479	567	473	142	384	0	451.97
JULIO	338	378	450	574	579	478	445	446	587	440	435	491.68
AGOSTO	385	453	554	440	478	471	440	481	281	497	415	425.46
SEPTIEMBRE	523	518	540	536	500	549	380	390	353	414	0	453.07
OCTUBRE	524	311	531	492	517	513	322	# DIV/0	453	430	454	457.70
NOVIEMBRE	462	453	447	420	399	243	386	194	308	396	0	382.83
DICIEMBRE	375	383	431	# DIV/0	# DIV/0	# DIV/0	337	327	367	332	369	329.05

Del procesamiento anterior se trabajaron los resultados para obtener el promedio mensual de todo el año obteniendo los datos requeridos para poder realizar la modelación en RetScreen, ya que este programa funciona con los promedios mensuales de radiación que obtiene ya sea del usuario o de la base de datos de NASA. Un ejemplo de los promedios obtenidos de la estación comparados contra los que facilita NASA [13], para Ensenada se denotan variaciones que van desde prácticamente 0% de variación hasta el 15% en octubre y 13% en noviembre (ver fig. 5.3).

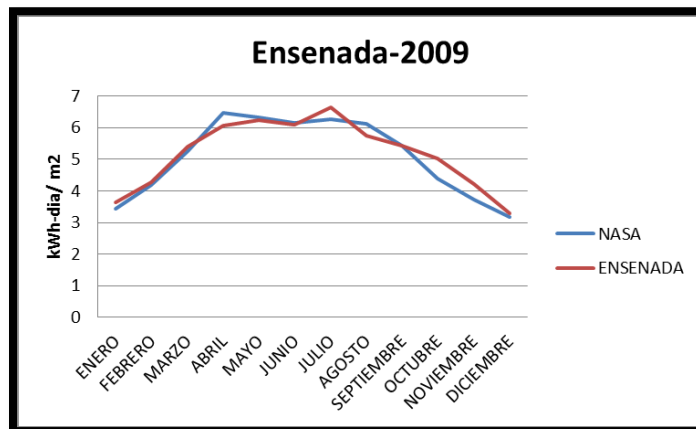


Figura 5.3. Comparación de promedios de radiación solar NASA-Estación Local.

Fuente: Elaboración propia, datos CNA y NASA (2009).

El análisis anterior permite además de establecer la diferencia entre la calidad y precisión de la información que se maneja por los programas comerciales, también contribuye a determinar las variaciones de los datos que se dan de manera particular en las locaciones de proyectos de calentamiento solar de agua. Al igual que para Ensenada se realizaron los análisis correspondientes para Tijuana y Mexicali, a fin de obtener la información que alimenta el modelo en STELLA.

### **5.3 DATOS TÉCNICOS DE COLECTORES.**

La tecnología con mayor utilización en el campo del calentamiento solar de agua, tanto en aplicaciones residenciales como en comerciales, resulta ser la tecnología de captadores solares de placa plana y tubos evacuados. Sabiendo de antemano que existe una gran diversidad de marcas y modelos de calentadores solares en el mercado nacional e internacional, se optó por emplear la información disponible sobre las características técnicas de los equipos.

Para establecer las características generales de los colectores solares en el mercado actual, se empleó la base de datos de certificación de calentadores solares de agua de Estados Unidos. Este directorio (fig. 5.4) enlista colectores de placa plana categorizándolos en colectores con cubierta y sin cubierta, y de tubos evacuados.



Figura 5.4. Directorio de sistemas de calentamiento solar de agua certificados por el Solar Rating And Certification Corporation. Fuente: <http://www.solar-rating.org/>

Se tomaron las características técnicas de área de captación, energía captada por unidad de área y flujo de fluido de trabajo por unidad de área. Esto permitió comparar los cálculos teóricos respecto a los resultados dados por las pruebas de SRCC, en específico para los colectores de placa plana con cubierta [14].

#### 5.4 INSTRUMENTACIÓN EXPERIMENTAL.

Para tener datos reales de referencia para validar el modelo de simulación, fue necesario obtener datos reales del comportamiento de la tecnología de colectores de placa plana, por ello se instrumentaron dos colectores de placa plana de  $2\text{m}^2$  de área de captación, orientados al sur y con un ángulo de inclinación de  $25^\circ$ . En la figura 5.5 se observan los puntos de medición de la variable de temperatura. Las temperaturas se tomaron a intervalos de 5 minutos con sensores termopar tipo K, situados todos dentro de las tuberías y termotanque del sistema (fig. 5.5).

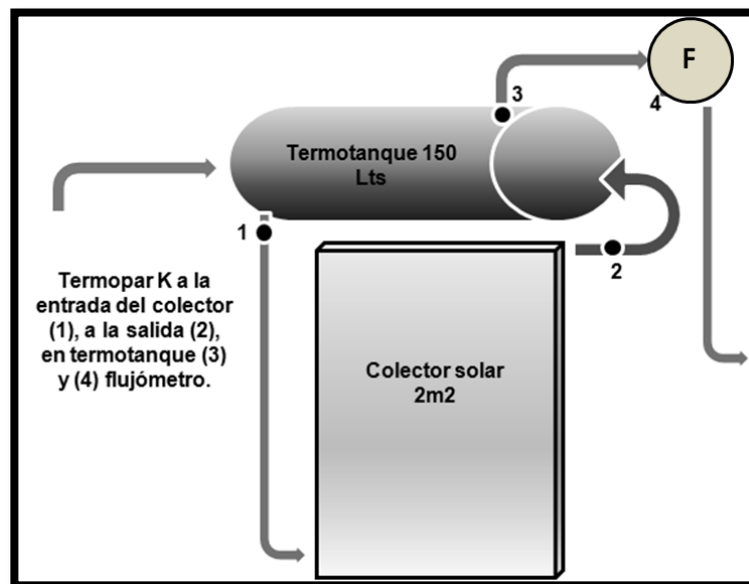


Figura 5.5. Puntos para medición de temperaturas en el calentador solar de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Los puntos señalados como 1,2 y 3 se consideraron como los más relevantes para determinar los incrementos de temperatura logrados por el colector y la velocidad de cambio de temperatura dentro del tanque de almacenamiento, lo cual permite calcular la ganancia real de energía útil.

En la siguiente figura 5.6 se muestra la instalación del calentador solar de placa plana ya sobre el techo de una de las viviendas empleadas para el monitoreo de los equipos, y los puntos donde se colocaron los sensores de medición de temperaturas con los termopares tipo K. En estas instalaciones las tuberías son mangueras flexibles de diámetro interno de 1in, sin material aislante a su alrededor, solo la tubería de salida a servicio tiene aislamiento.



Figura 5.6. Calentador solar de agua instalado en residencia de Mexicali.

Fuente: Elaboración propia.

Se empleó un sistema de adquisición de datos para grabar las mediciones de los termopares, para este caso se utilizó el data logger LOGICBUS (fig. 5.7) con 8 canales y memoria SD de almacenamiento, programado con intervalos de medición cada 5 minutos, principalmente para observar detalles de los cambios de temperatura registrados y el cálculo de la energía captada en periodos de cada 5 y 10 minutos para el análisis.

Los termopares se colocaron uno dentro del termotanque insertado por la válvula de alivio, uno más dentro de la manguera a la salida del colector, y el tercero dentro de la manguera de entrada del colector.



Figura 5.7. Sistema de adquisición de datos LogicBus, y termopar en válvula.

Fuente: Elaboración propia.

Para la inserción del termopar dentro del termotanque, se perforo la tubería correspondiente a la válvula de purgado de aire en la parte superior del tanque. A fin de tener un ingreso al nivel superior del agua almacenada dentro del tanque.

Para los termopares dentro de las mangueras (fig. 5.8), se adaptó un tornillo hueco, principalmente para garantizar una entrada firme a la tubería y una sujeción segura del sensor, la cual soporto la presión del sistema.

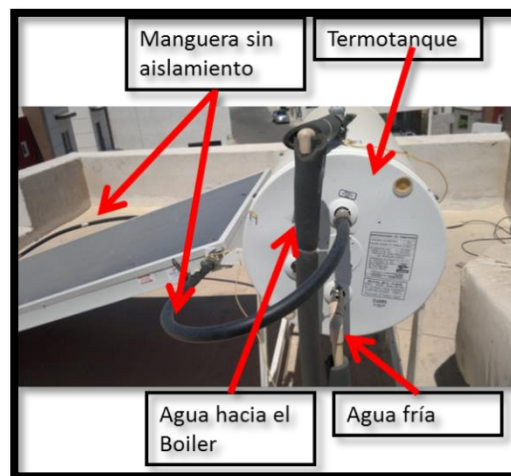


Figura 5.8. Vista de la instrumentación del calentador solar de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Para evitar ruido en la señal de los sensores por algún tipo de corriente eléctrica parasitaria por el contacto directo del sensor con el agua, se recubrieron los sensores con una resina que permitiera aislar el termopar del contacto directo con el agua y seguir registrando la temperatura del fluido, además esto permitió evitar que el agua se infiltrara por el material envolvente del cable de termopar, ya que a causa de la presión del sistema y la red de suministro de agua, el agua invadía el material protector del cable produciendo fugas. Con la resina se eliminó este problema y se conservó la integridad y funcionalidad del sensor (ver fig. 5.9).

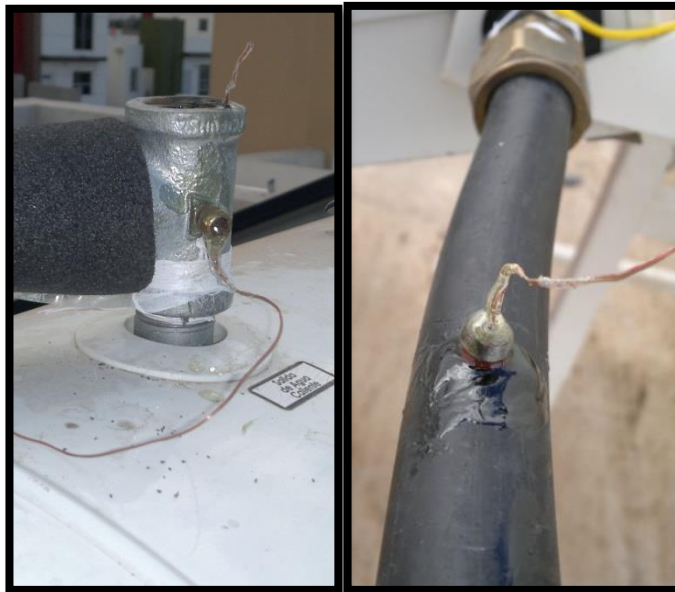


Figura 5.9. Vista de sensor con protección de resina para evitar su deterioro y lecturas erróneas.

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el volumen de agua extraída del termotanque, se utilizó un flujómetro totalizador con registro de hora de activación y lectura de volumen de agua totalizado. Esto permite determinar la cantidad de energía obtenida del termotanque en relación con el volumen y temperatura del agua caliente y el agua fría que la reemplaza en el tanque.

El flujómetro totalizador es un T-minol 130, el cual cuenta con un totalizador análogo y con un registro de señal de inicio y término de activación que guarda de manera digital en un sistema de registro conectado al flujómetro (ver fig. 5.10).



Figura 5.10. Flujómetro totalizador con pantalla análoga y cable de registro de activación digital.

Fuente: Elaboración propia.

Con base a los datos del flujómetro se determina el volumen de agua extraída del tanque y el periodo en el cual fue extraída del mismo. En conjunto con los sensores de temperatura se puede calcular la cantidad de energía removida del termostanque durante los periodos registrados.

Para llevar a cabo el monitoreo de las variables meteorológicas, se utilizó una estación portátil la cual se instaló en el fraccionamiento donde se instalaron los calentadores solares (ver fig. 5.11).

La estación es de la marca DAVIS modelo Vantage Pro Plus2, la cual cuenta con sensores de radiación solar, humedad, temperatura ambiente, precipitación y velocidad de viento, además de presión atmosférica. La estación fue colocada a una altura de 6m sobre el nivel del piso, se programó con intervalos de medición cada 10 minutos, esto con el objetivo de analizar y validar las variables de temperatura ambiente y radiación solar.



Figura 5.11. Estación meteorológica con monitoreo remoto.

Fuente: Elaboración propia.

La estación cuenta con un monitor de adquisición de datos remoto, lo que permite guardar la información de un periodo considerable de tiempo y analizar las variaciones en los datos del colector solar debidas a condiciones atmosféricas en periodos de tiempos relativamente cortos y localizados particularmente en la zona.

De manera general, esta sección permite tener claro el método de trabajo que se siguió, además de las consideraciones que se toman en cuenta para la obtención de los datos, y el objetivo de cada uno, que es básicamente información para construir el modelo en STELLA y validar la información. Es importante tomar en cuenta que el periodo de monitoreo continuo ininterrumpido fue de Enero a Junio de 2012, destacando que en Junio se redujo el área de captación del CSA a la mitad para reducir exceso de temperatura y evaporación dentro del sistema.



## **CAPITULO VI: MONITOREO.**

### **Introducción.**

Esta sección explica a detalle el principio de cálculo de la energía neta utilizable que se almacena en el termostanque, que a diferencia de la energía bruta captada por el colector, permite determinar la eficiencia de todo el sistema y no solo del colector (CSA). Además, se explican algunos comportamientos peculiares y muy específicos que se observan en las temperaturas medidas durante la operación normal del sistema CSA. También, se puntualizan las razones de medición de algunos puntos adicionales, que permiten determinar otros aspectos del comportamiento del sistema de calentamiento solar.

## 6.1 ENERGÍA EN EL CSA.

### Cálculo de la energía obtenida del sistema de calentamiento solar.

De los datos obtenidos del monitoreo continuo de los meses de Enero a Junio de 2012, se procesó la información del calentador solar y del termotanque, analizando la información de cada día a fin de calcular la cantidad de energía colectada por cada día, es decir, se determinó el incremento de temperatura que alcanzó el volumen de agua y el equivalente en energía requerida para lograr este incremento, obteniendo así la energía real almacenada por el sistema.

En la figura 6.0 se observan las variables de referencia para el cálculo de energía útil obtenida por el CSA.

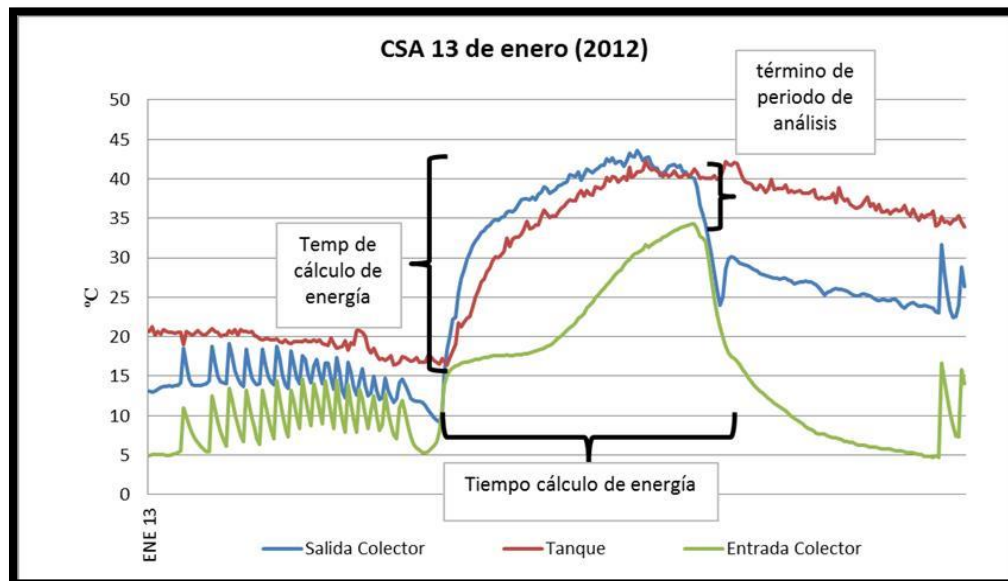


Figura 6.0. Datos de referencia para cálculo de energía útil captada.

Fuente: elaboración propia.

Para los cálculos de energía almacenada o ganada en el tanque se partió de lo siguiente:

$$Q=m*C_p(T_f-T_o) \quad \text{Ec. 6.0}$$

Donde:

$Q$ = energía útil

$m$ = masa

$C_p$ = calor específico del agua

$T_f$ = temperatura final o de salida

$T_o$ = temperatura de entrada o inicial [10].

Para ello se realizó el cálculo afinado en cada intervalo de medición para obtener un dato más preciso por cada día. Por cada lectura cada 5 minutos se obtuvo la ganancia de energía en el termotanque en función de su incremento de temperatura.

Mediante el totalizador de flujo se calculó la cantidad de agua retirada del termotanque y el horario durante el cual se realiza el consumo típico del usuario residencial. Obteniendo comportamientos particulares de cada usuario con respecto al consumo de agua caliente. Lo que permite además estimar la cantidad de energía retirada del termotanque en función del volumen de agua caliente consumido por el usuario. En la siguiente figura 6.2 se observa el comportamiento de los datos.

Donde el calentador de paso indica el momento en el que se utiliza agua caliente y el tiempo aproximado de uso. De igual manera la temperatura dentro del tanque permite determinar la variación en la energía que esta almacenada.

También la temperatura de entrada y salida del CSA permite estimar la energía obtenida dentro del colector y la temperatura del estrato inferior del tanque, esto ayuda a determinar

la temperatura promedio del agua dentro del tanque considerando su estratificación, como se observa en la figura 6.1, un ejemplo de estratificación de temperatura del agua en un depósito o termotanque donde se observan las fases inicial después del arranque del sistema de calentamiento, el proceso intermedio de estratos y el final donde se estabiliza la estratificación.

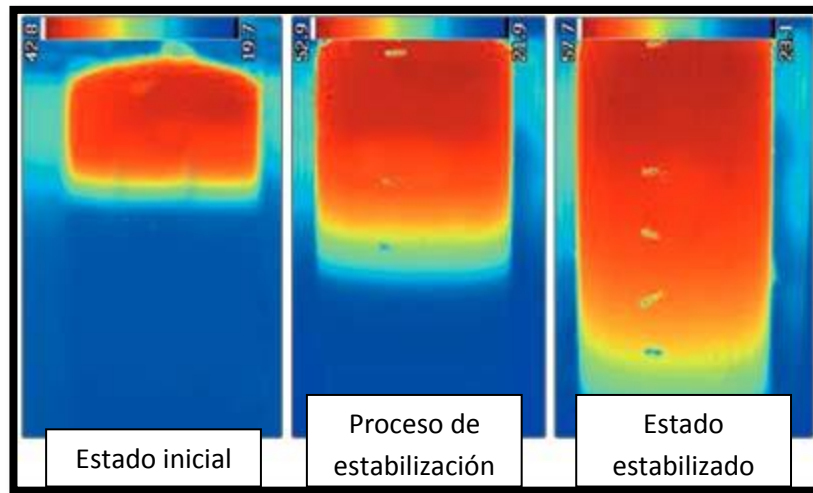


Figura 6.1. Estratificación de agua en un termotanque desde el arranque del sistema.

Fuente: Rossato group, <http://en.rossatogroup.com>

En la figura 6.2 se observa en la parte inferior las lecturas tomadas de la variable de volumen de agua caliente consumida, empatando en el tiempo con las mediciones de temperaturas del calentados solar, de esta manera se puede saber con precisión la cantidad de agua que sale del tanque y la temperatura a la que esta salió para servicio.

Este mismo procedimiento se realizó para una serie de días seleccionados como días típicos de cada mes, para considerarlos como representativos con base al criterio de recurrencia o predominancia de comportamiento, tanto del sistema como de las variables meteorológicas.

En el caso de la figura 6.2, el día 07 de abril de 2012 corresponde a un sábado, es decir, el comportamiento de consumo de agua caliente es el que se presenta en fines de semana para el usuario en particular.

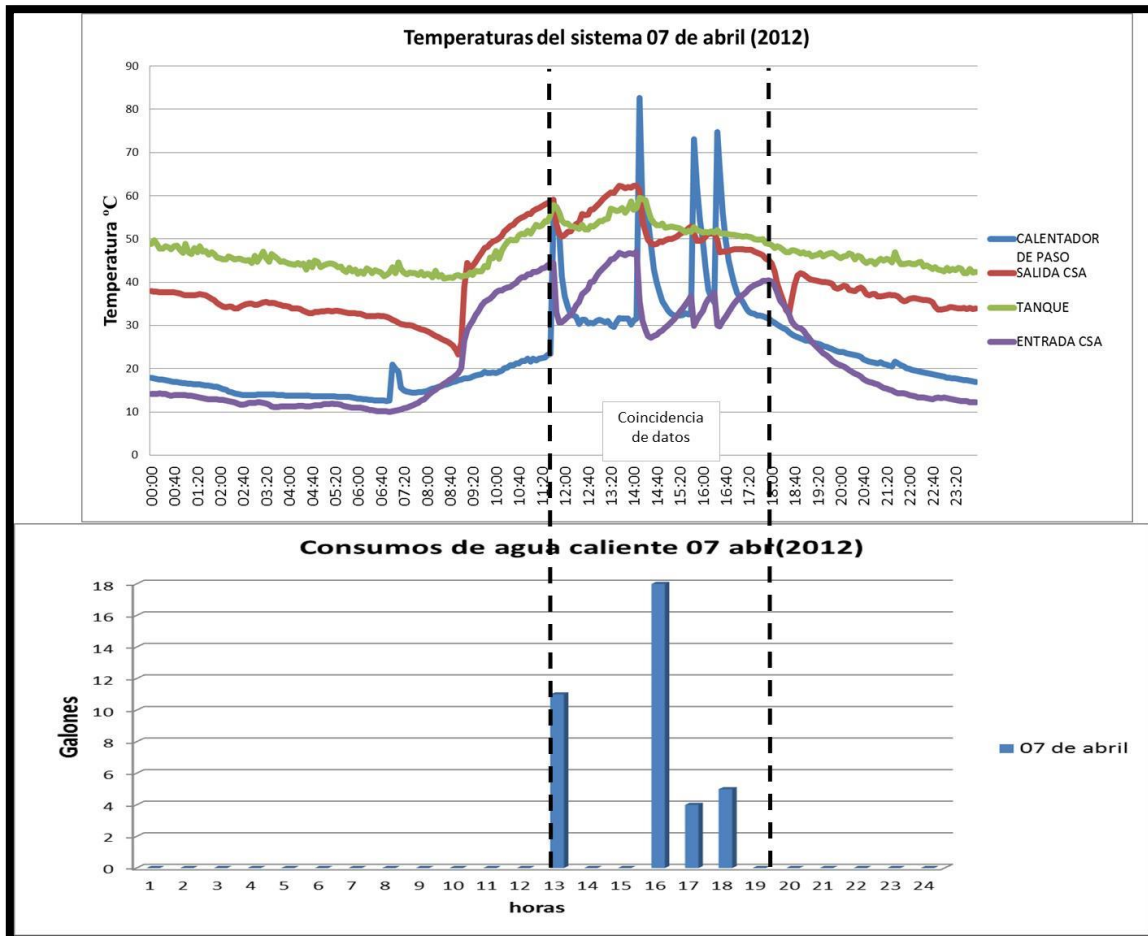


Figura 6.2. Comparativo de consumo de agua caliente y relación directa con temperaturas del CSA.

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente figura 6.3, se observa el uso de agua caliente entre semana durante las mañanas y tardes, así como el efecto de estancamiento en el calentador solar.

El 16 de enero de 2012, corresponde al lunes, lo que representaría un día normal entre semana, resaltándose los puntos de consumo de agua caliente, los cuales a diferencia de la figura 6.2 presenta un comportamiento de uso al inicio y final del día.

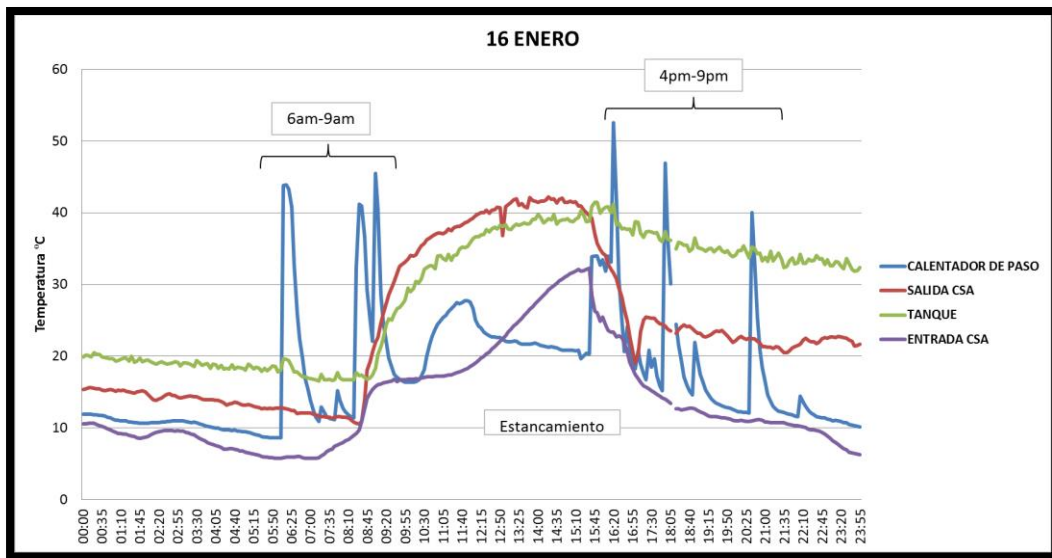


Figura 6.3. Comparativo de horario de consumo de agua caliente y relación directa con temperaturas del CSA.

Fuente: elaboración propia.

Las observaciones realizadas en la información del monitoreo del comportamiento del calentador solar de agua, permiten establecer que los usos y costumbres del usuario del sistema son relevantes, ya que la instalación del CSA fue realizada por el proveedor para optimizar su desempeño en el año. Sin embargo, recordando del Capítulo II la gráfica 2.3 Temperatura ambiente para un día del mes de Enero, se puede establecer que la mayor demanda de agua caliente es durante los meses invernales, y prácticamente despreciable o nula en verano. Lo anterior conlleva a concluir que la instalación del sistema aunque fue optimizado para un mejor desempeño en el año, no fue optimizado para la época de mayor demanda.



## **CAPITULO VII: MODELADO EN STELLA.**

### **Introducción.**

Esta sección describe los datos, variables y valores utilizados para construir el modelo de simulación en STELLA, el cual se basa en la información de la radiación solar, temperatura ambiente y energía útil para cada uno de los días típicos seleccionados para determinar la función de ganancia de energía horaria.

Se presentan los datos correspondientes a las mediciones de las fechas asignadas como días típicos, señalando que para el caso del mes de Junio se realizó una reducción en el área de captación del colector de un 50%, debido a un incremento superior a los 80°C a la salida del CSA, lo que implicaba un riesgo para el usuario, para el sistema y posible evaporación del agua sobrecalentada, debido principalmente al casi nulo consumo de agua caliente en esa época del año.

## 7.1 CONSTRUCCION DEL MODELO.

Para construir el Modelo de simulación para CSA en STELLA, se emplearon los resultados del análisis de información de monitoreo de calentadores solares localizados en Mexicali, cuyos datos se tomaron como referencia de enero a junio de 2012. Del monitoreo continuo de este periodo se seleccionaron días típicos representativos de cada mes, considerando lo siguiente:

- i. Comportamiento normal de la temperatura ambiente medida por las estaciones locales y la estación DAVIS.
- ii. Mínima extracción de agua del termotanque en el periodo del día solar, y por ende mínimo de entrada de agua de la red al ciclo durante el periodo mencionado.
- iii. Coincidencia de los dos anteriores, datos completos y comportamiento representativo de un día típico del mes correspondiente.

De lo anteriores se tiene que la figura 7.0 muestra el comportamiento de la temperatura ambiente para las fechas de los días típicos seleccionados, correspondientes al 13 de enero, 14 de febrero, 16 de marzo, 16 de abril, 17 de mayo y 13 de junio de 2012.

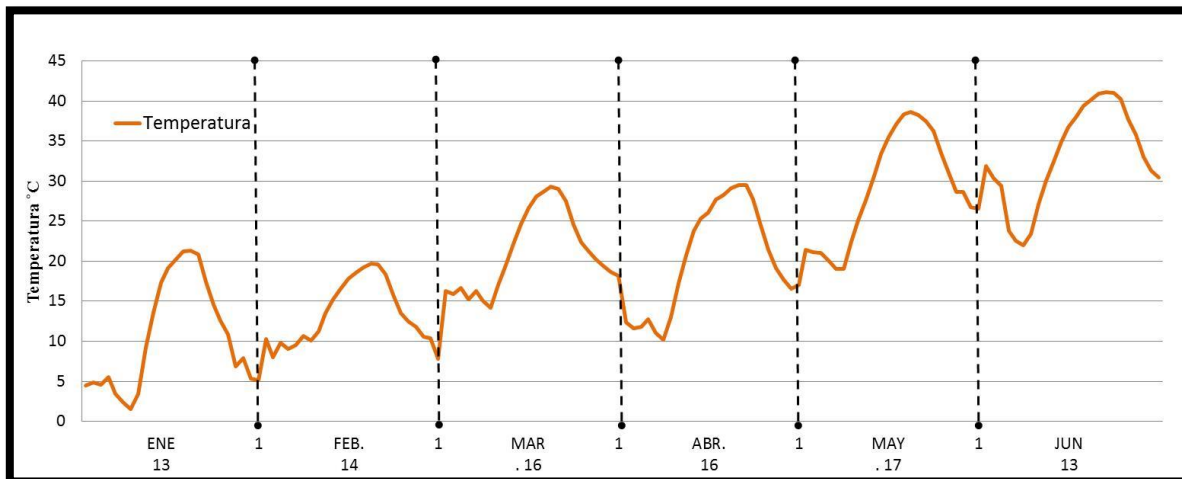


Figura 7.0. Comportamiento de la temperatura ambiente de días típicos seleccionados.

Fuente: elaboración propia, datos de estación DAVIS y estación aeropuerto Mexicali (2012).

De los datos monitoreados en el CSA durante los días típicos seleccionados se muestra en la figura 7.1, donde se observa un comportamiento sin cambios en la temperatura debidos a extracción de agua caliente del termotanque y por ende tampoco de entrada de agua de la red de suministro, manteniendo el sistema prácticamente en un ciclo cerrado de recirculación del agua contenida en el termotanque durante todo el día solar.

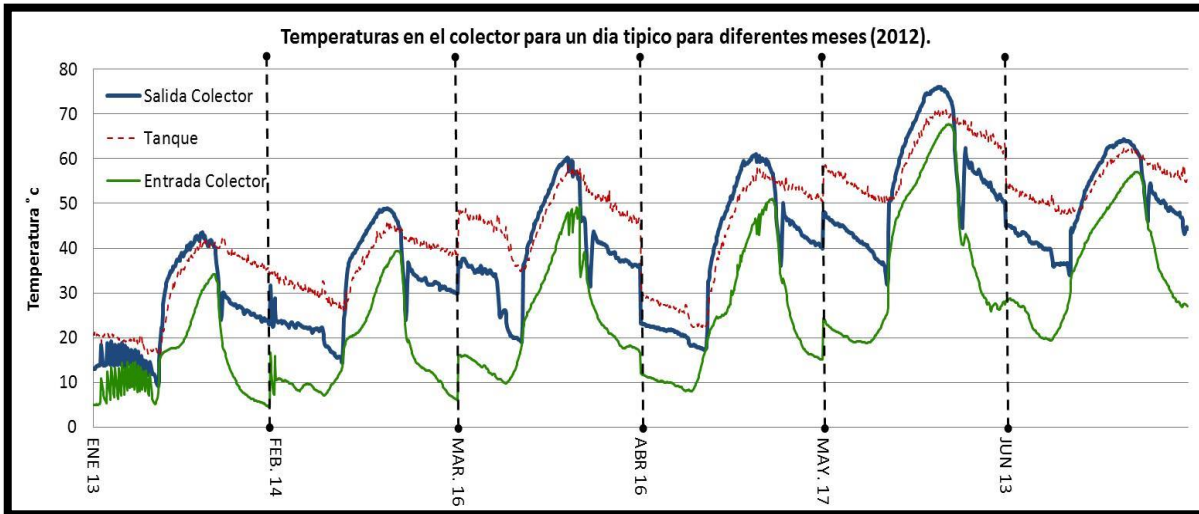


Figura 7.1. Comportamiento en el sistema de CSA de los días típicos seleccionados.

Fuente: elaboración propia.

Se destaca que en junio la curva de temperaturas disminuye ya que el colector fue cubierto para evitar un incremento de temperatura del fluido de manera riesgosa para el usuario, y evitar posibles quemaduras por agua caliente. De igual modo se emplearon los datos de radiación solar correspondiente a estos mismos días típicos como se observa en la figura 7.2, destacando el incremento de la curva de radiación solar correspondiente a cada mes.

Partiendo de los días típicos seleccionados y los datos de monitoreo, se determinó para cada uno la función de energía útil almacenada para la cual semejan los demás días del resto del mes correspondiente.

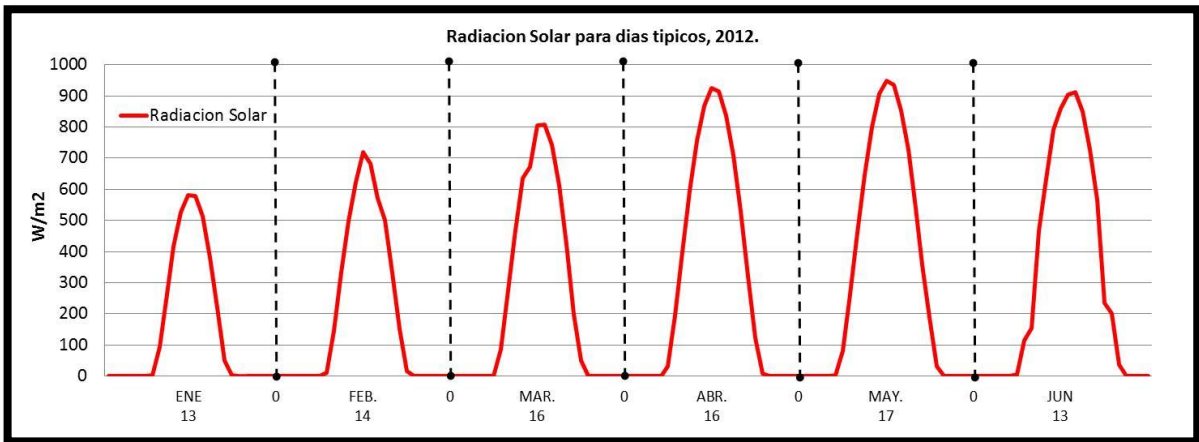


Figura 7.2. Curva de radiación solar de los días típicos seleccionados.

Fuente: elaboración propia.

La función es horaria, por lo que obedece a un comportamiento partiendo de la hora de salida del sol hasta la puesta de sol, esta misma función se generó con los datos medidos cada cinco minutos para un mejor ajuste.

En la figura 7.3 se muestran las funciones correspondientes a cada día típico señalado y a partir de las cuales el modelo de STELLA se programó para los demás cálculos.

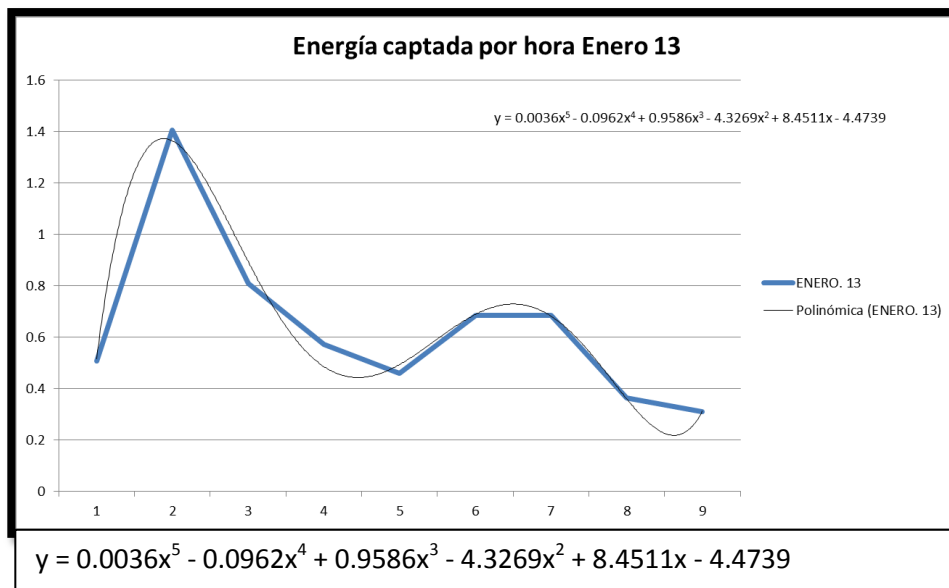


Figura 7.3. Funciones de ajuste de energía útil para día típico de Enero.

Fuente: elaboración propia.

De igual modo se realizó la función de ajuste para los demás días típicos seleccionados de Enero a Junio, en la siguiente figura 7.4 se observa el comportamiento para el colector cubierto a la mitad.

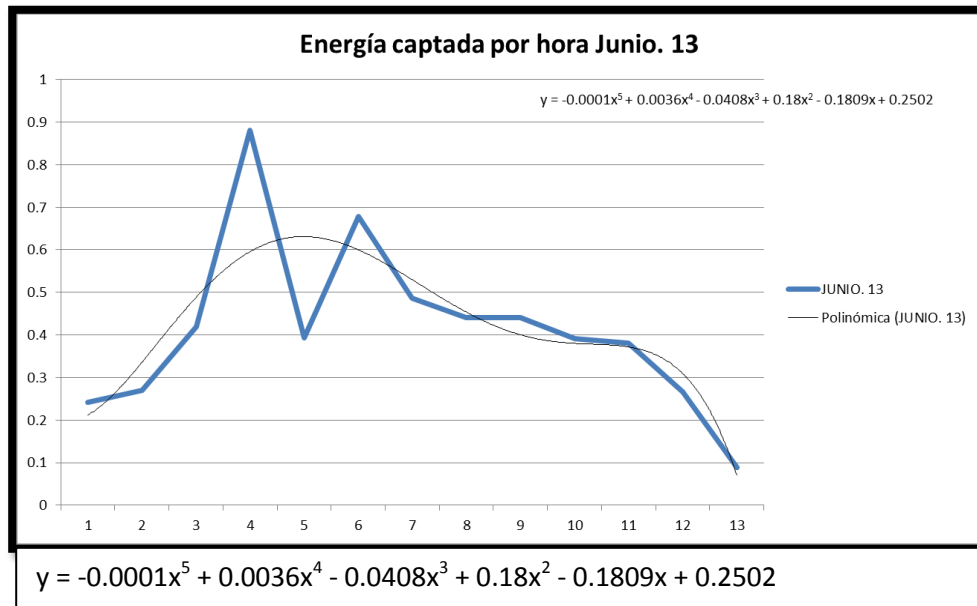


Figura 7.4. Funciones de ajuste de energía útil para día típico de Junio.

Fuente: elaboración propia.

Las peculiaridades de las funciones de ajuste o de las ganancias de energía útil del colector, se deben a que al inicio del ciclo de calentamiento se eleva drásticamente la temperatura del fluido y posteriormente adquiere una estabilidad, de igual modo al final del ciclo de observa otra variación debida nuevamente al cambio de temperatura del fluido, es decir, en la mañana entra fluido más frío que a medio día y en la tarde también entra fluido relativamente más frío al colector.

Se empleó como función base de trabajo el modelo de HOTTEL para radiación incidente, ya que ofrece un buen ajuste a los datos medidos de las estaciones como se observa en la figura 7.5, con una diferencia despreciable respecto a los monitoreados de las estaciones de CNA y DAVIS.

Así, la función representa durante el periodo de radiación del día típico de cada mes, los valores de radiación en el plano considerado para el cálculo y en conjunto con la función de energía útil aprovechada se tiene una relación para cada hora del día típico señalado.

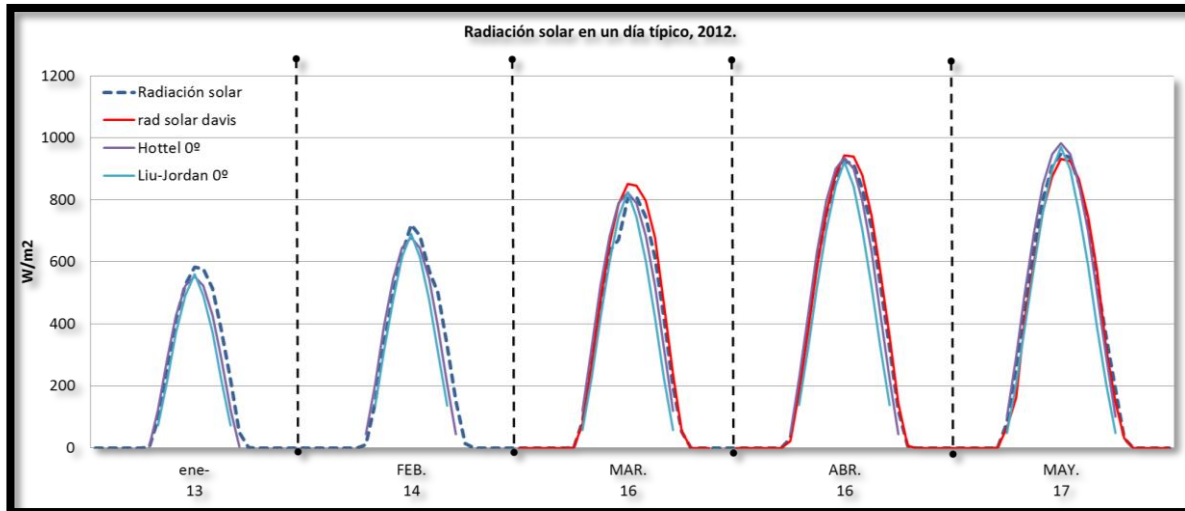


Figura 7.5 Comparativo entre modelos de radiación y datos medidos de las estaciones de CNA y DAVIS.

Fuente: elaboración propia, CNA 2012.

Modelo de HOTTEL (1976).

Para el cálculo teórico de la radiación incidente se tiene:

$$G_b = G_{sc} (r_0 a_0^* + r_1 a_1^* e^{-r_1 k^1 / \cos \theta_z}) \quad \text{Ec.7.0}$$

Dónde:

**G<sub>sc</sub>**, es la constante solar

**r<sub>1</sub>**, es el valor dado para el tipo de clima

**a<sub>0</sub>**, **a<sub>1</sub>** y **k**, son valores dados con relación a la elevación del lugar y la visibilidad [15].

En tanto que  $\cos \theta_z$  (ángulo cenital), está dado por la ecuación de factor geométrico:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega_h \quad \text{Ec.7.1}$$

Donde:

$\delta$ , refiere a la declinación del lugar,

$\phi$ , refiere la latitud del lugar,

$w$ , es el ángulo horario.

Así se tiene por ejemplo en la fig. 7.6 el comportamiento esperado teórico de la radiación para Mexicali en tres planos con ángulo de inclinación diferente y orientado al sur solar.

En la figura 7.6 se observa también que la cantidad de horas de radiación varían, claramente Junio con mayor número de horas de radiación, además considerando que para el caso donde se realizó el monitoreo el ángulo de inclinación del calentador solar no es el más adecuado puesto que la mayor demanda de energía térmica se requiere de Octubre a Marzo, a lo que en la figura el gráfico inferior muestra que un ángulo de inclinación mayor es mejor para la captación de radiación solar.

En tanto, si se deseara optimizar el ángulo de inclinación para los meses de Junio o Julio se observa en el gráfico superior que prácticamente la inclinación puede ser de cero grados o  $25^\circ$ , siendo en ambos casos una buena incidencia de radiación solar.

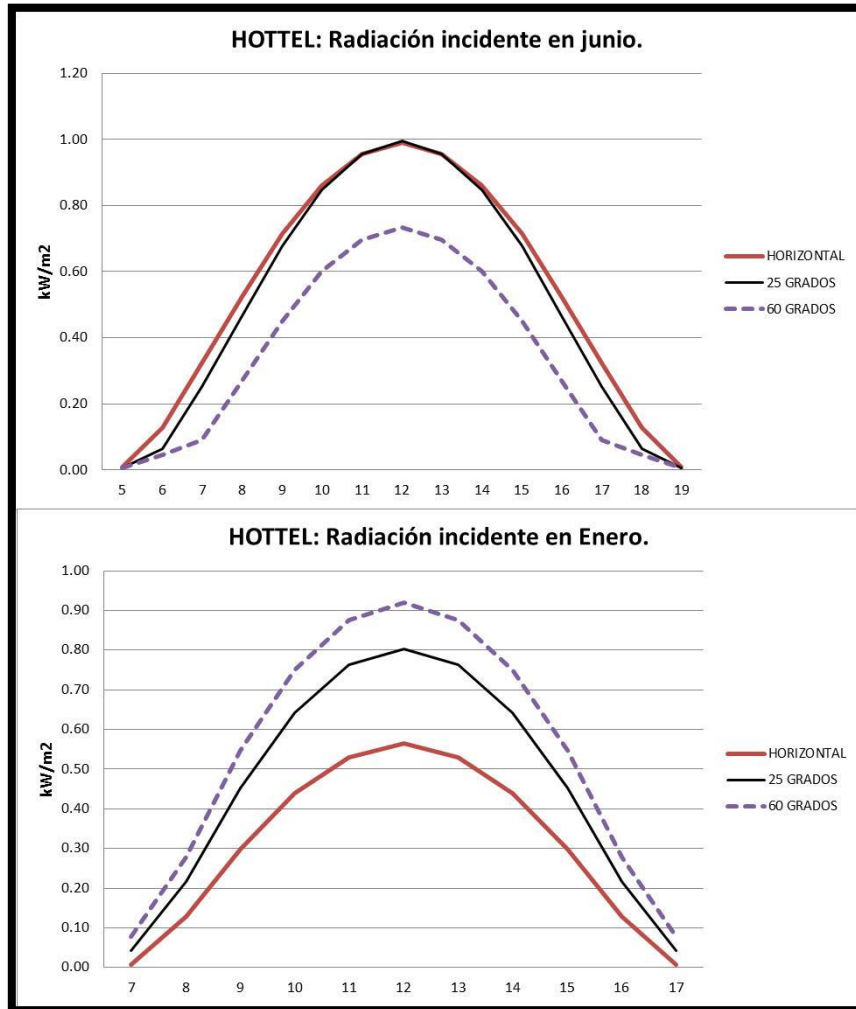


Figura 7.6. Modelo de Hottel aplicado a dos meses Junio y Enero.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de Mexicali se obtuvo el comportamiento de todo el año conforme al modelo de HOTTEL para radiación solar incidente sobre plano horizontal e inclinado (ver figura 7.7).

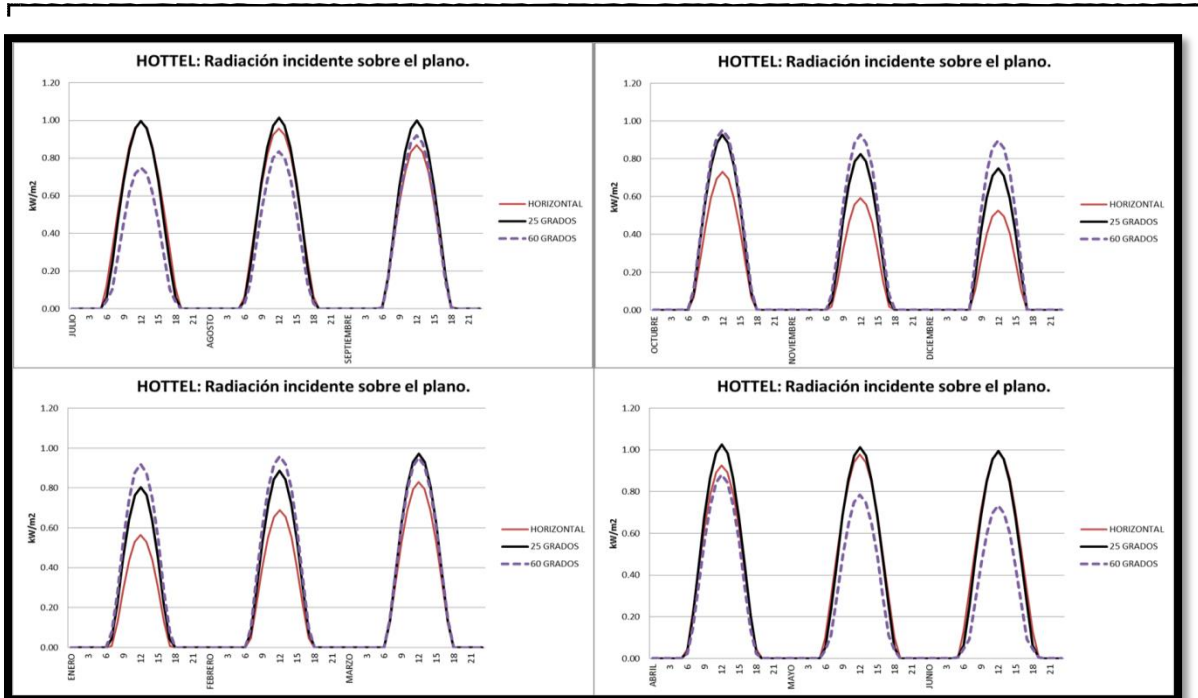


Figura 7.7 Radiación solar incidente en diferentes planos para Mexicali, modelo de Hottel.

Fuente: Elaboración Propia.

El mismo proceso se aplicó para calcular la radiación solar incidente tanto de Tijuana como de Ensenada, como se muestra en las figuras 7.8 y 7.9.

Tanto en la figura 7.8 y 7.9 la semejanza entre los datos es prácticamente imperceptible, ya que como se mencionó anteriormente, la radiación de las tres ciudades es en teoría muy similar. Las diferencias se observan en los datos que se obtuvieron de las estaciones meteorológicas, los cuales difieren de los datos teóricos de Hottel, pero no de manera significativa.

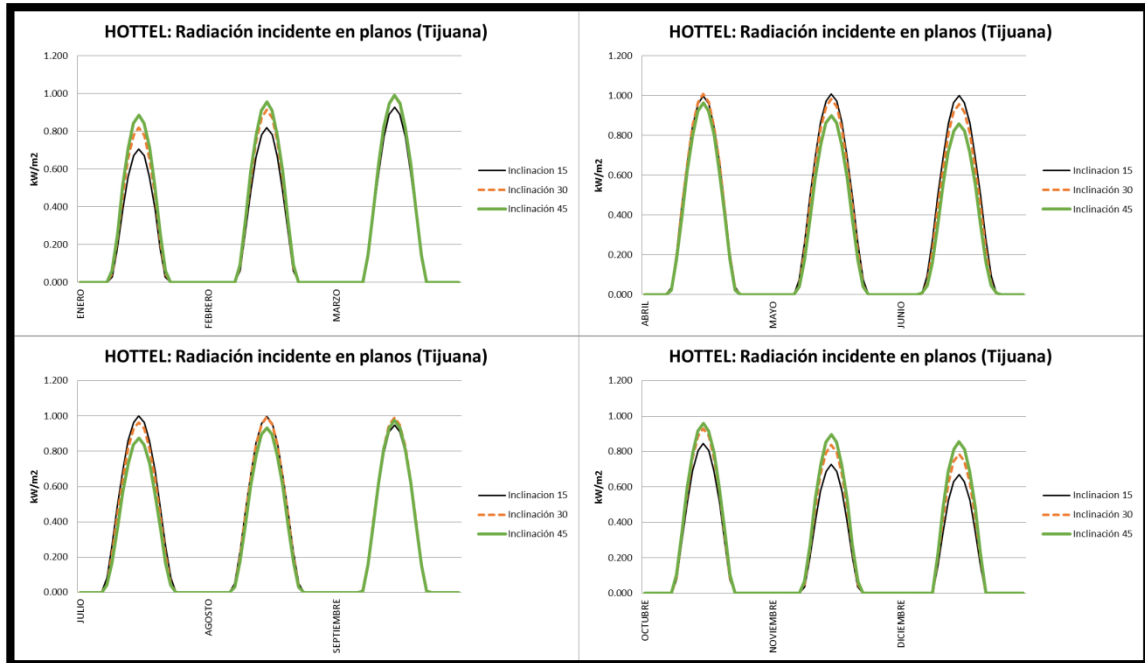


Figura 7.8 Radiación solar incidente en diferentes planos para Tijuana, modelo de Hottel.

Fuente: Elaboración Propia.

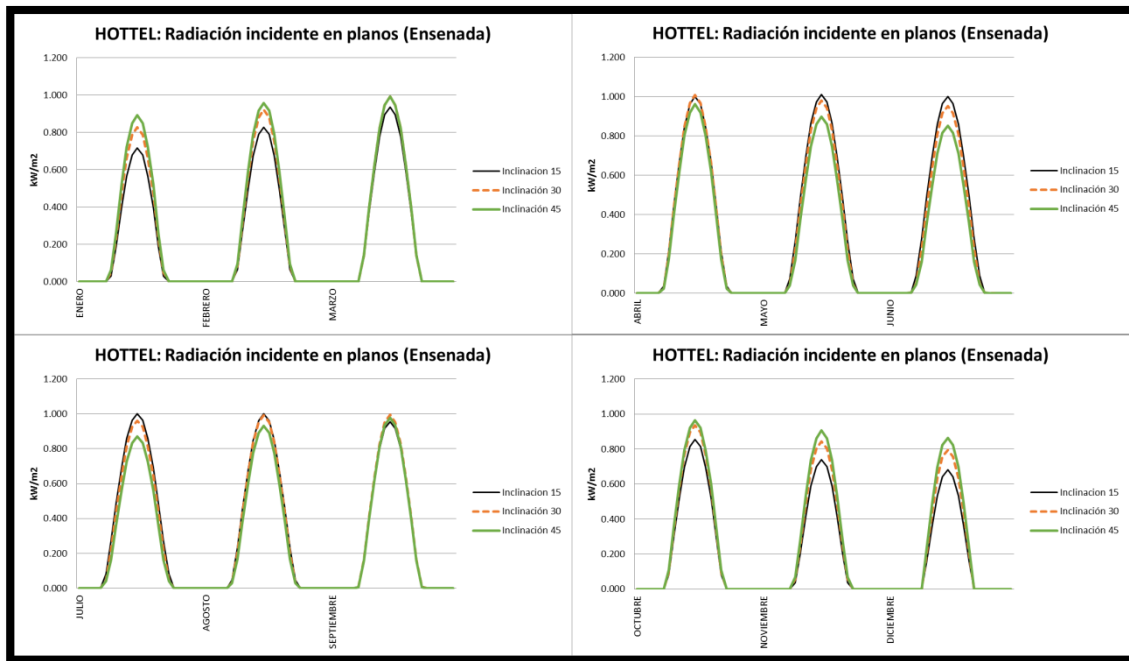


Figura 7.9 Radiación solar incidente en diferentes planos para Ensenada, modelo de Hottel.

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente quedo el modelado programado en un submodelo correspondiente a cada Ciudad, mes, inclinación y orientación. Quedando el modelo como se muestra en las figuras 7.10 y 7.11.

En la figura 7.10 se observa el submodelo para Mexicali en el mes de Enero con inclinación a 15 grados y angulo azimut de orientación a cero grados (sur).

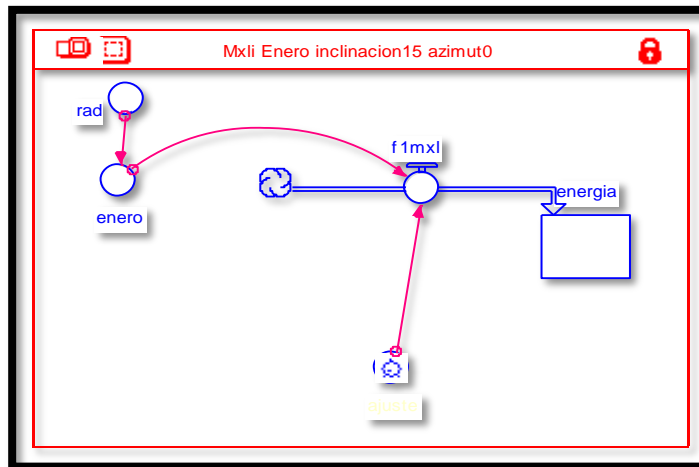


Figura 7.10. Submodelo STELLA para CSA de Mexicali en Enero con inclinación a 15 grados y azimut a 0 grados. Fuente: Elaboración propia.

En tanto en la figura 7.11, se observa el control de ajuste para la función de ganancia de energía del mes correspondiente, el cual permite modificar la función en un rango de 15%, y también se observa el cuadro de energía útil total colectada para ese día típico así como el comportamiento gráfico horario.

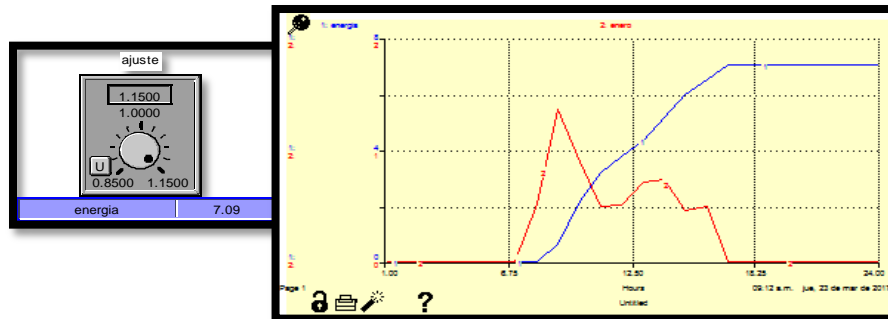


Figura 7.11. Controles del Submodelo STELLA para CSA y gráfico de comportamiento horario y energía acumulada. Fuente: Elaboración propia.



## **CAPITULO VIII: RESULTADOS.**

### **Introducción.**

En el presente capítulo se muestran algunos de los resultados obtenidos del Modelo de STELLA para CSA, el cual es comparado contra el programa libre de RETScreen el cual fue diseñado para el dimensionamiento de sistemas de calentamiento solar de agua, específicamente para tecnología de placa plana.

Las variables para determinar la energía útil que capta un calentador solar de agua (CSA), no solo depende de las condiciones meteorológicas, también hay que considerar que la orientación e inclinación de los CSA juegan un papel relevante. En esta sección se muestra como tanto la inclinación como la orientación afectan la ganancia de energía, y para el caso de este trabajo en las ciudades de Baja California.

## 8.1 ANALISIS DE RESULTADOS.

Los resultados que se presentan son algunos gráficos de ganancia de energía útil por parte del CSA de placa plana de circulación natural, los cuales muestran el comparativo entre los resultados del Modelo de Simulación de STELLA para CSA y los medidos de algunos días seleccionados al azar. En la tabla 8.0, se observan los resultados tanto del programa STELLA como de RETScreen, comparados contra los medidos de 4 días tomados al azar de diferentes meses.

Tabla 8.0. Comparativo de energía útil simulada y medida.

Fuente: Elaboración propia.

Energía Util				
MES	RETScreen	STELLA	MEDIDA	FECHA
<b>FEBRERO</b>	4.33	6.07	3.07	feb-07
<b>MARZO</b>	6.33	7.3	6.78	mar-22
<b>ABRIL</b>	6.33	8.3	7.48	abr-27
<b>MAYO</b>	6.66	7.38	8.8	may-04

En tanto, la figura 8.0 permite observar que el valor medido es inferior a lo simulado, siendo esto a causa de que esa fecha en particular se presentaron nublados frecuentes, lo que afecto en gran medida la ganancia de energía útil esperada.

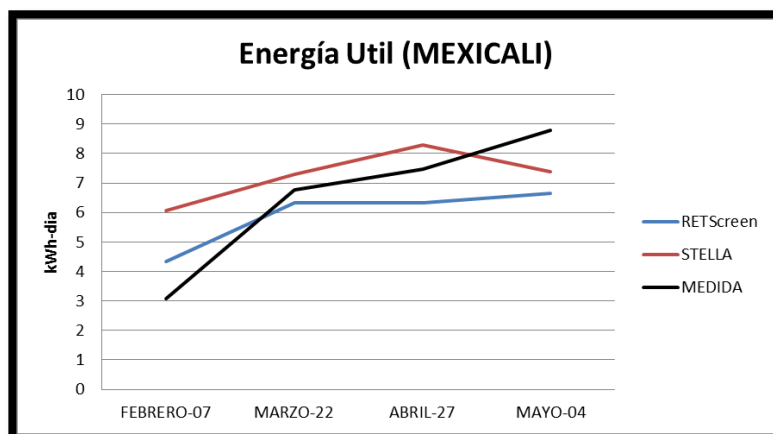


Figura 8.0. Comparativo entre simulaciones y datos medidos de energía útil.

Fuente: Elaboración propia.

De las propias simulaciones en el Modelo STELLA para CSA se muestran las siguientes figuras:

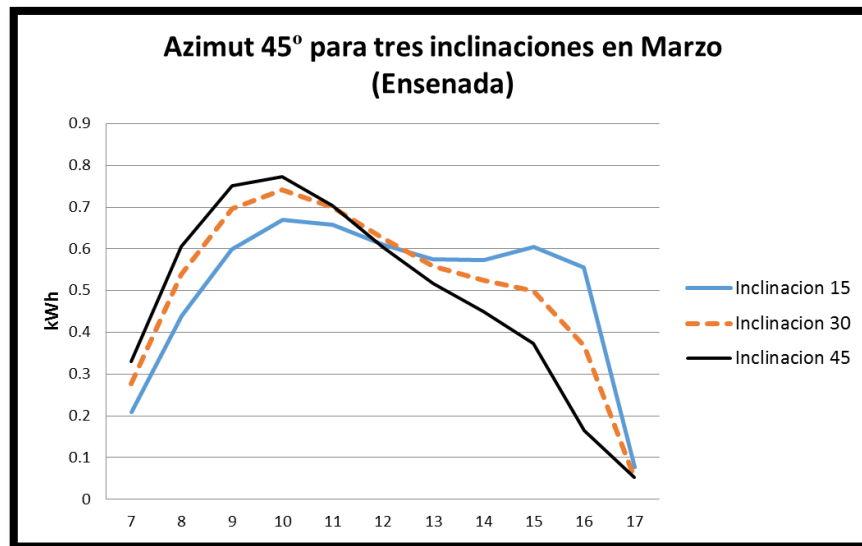


Figura 8.1. STELLA para Ensenada en orientación de 45 grados sureste.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8.1, se observa como la orientación y la inclinación producen diferentes ganancias de energía útil hora por hora, denotándose que la inclinación a 15 grados es más uniforme y la inclinación a 45 grados tiene un aumento súbito al inicio, este último debido a la baja altura del sol lo que requiere mayor inclinación del CSA.

En la figura 8.2, el comportamiento de ganancia de energía útil es bastante similar para las tres inclinaciones calculadas, esto debido a que el CSA se encuentra orientado al sur. La inclinación óptima para este mes es de 25 grados, por ello es que la inclinación de 15 y 30 grados son similares puesto que se encuentran en cada extremo del punto máximo u óptimo de ganancia útil. Por ende, la inclinación de 45 grados se aleja del punto máximo siendo menor la ganancia de energía útil.

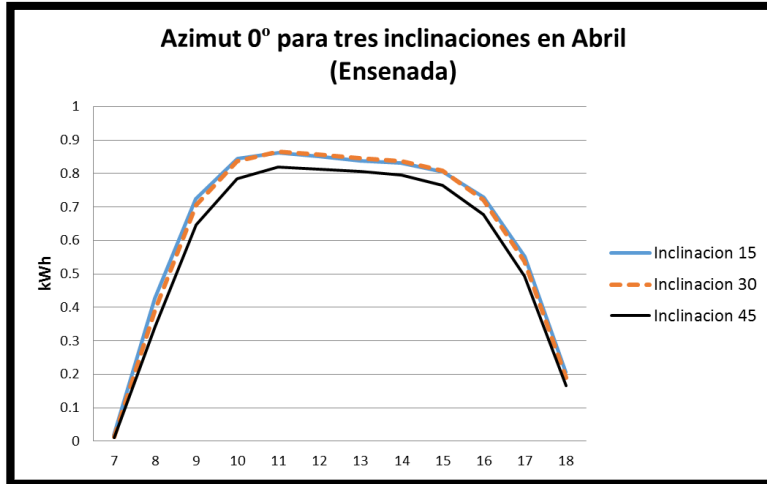


Figura 8.2. STELLA para Ensenada en orientación al sur.

Fuente: Elaboración propia.

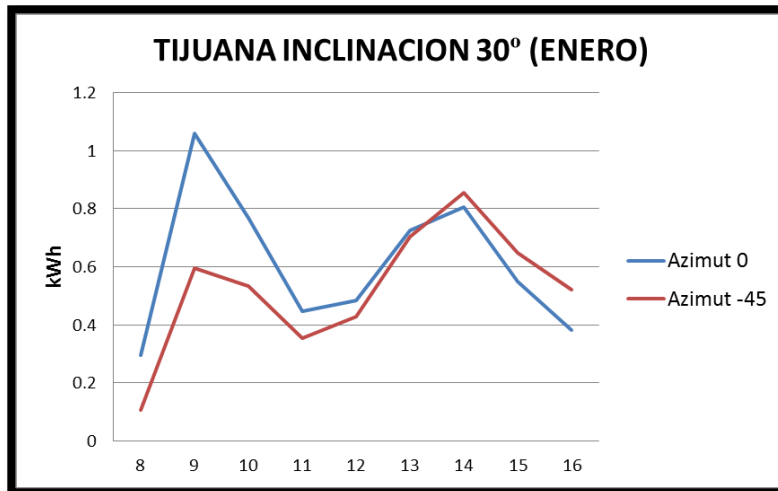


Figura 8.3. STELLA para Tijuana con diferentes orientaciones.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 8.3, muestra el comportamiento de la simulación en STELLA para CSA, en este caso para la ciudad de Tijuana y considerando una inclinación fija pero dos orientaciones diferentes. Analizando lo anterior para el mes de Enero, se observa que la ganancia de energía cuando el CSA está orientado al sur es más elevada al inicio del día, lo que es normal y esperado, mientras que cuando el CSA se orienta al suroeste a 45 grados del sur, se observa que la energía útil en las primeras horas es menor que en las últimas horas del

día, siendo lo esperado en un sistema orientado de esta manera e inclinado a 30 grados para el mes de Enero.

En la figura 8.4, correspondiente al mes de Mayo para la ciudad de Ensenada, se observa un comportamiento similar considerando que la inclinación es de 15 grados, esto debido a que al ser una inclinación relativamente pequeña las variaciones de orientación se vuelven poco relevantes. Es decir, entre menor sea la inclinación del CSA, la orientación del mismo será menos relevante en la ganancia de energía útil. Mientras que cuanto mayor sea el ángulo de inclinación del CSA, mayor será el efecto de la orientación del sistema colector. Lo anterior debido a que una superficie con mayor inclinación produce mayor sombreado, en tanto que una superficie menos inclinada reduce su efecto de sombra.

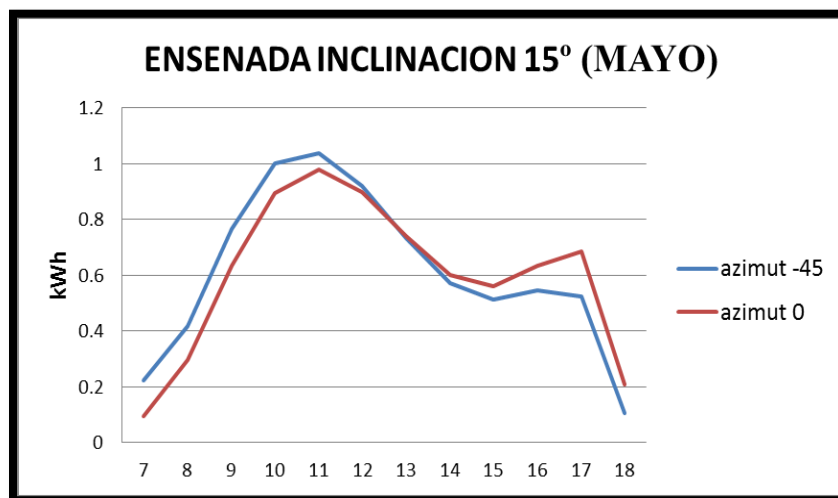


Figura 8.4. STELLA para Ensenada con diferentes orientaciones.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 8.0, se muestran los valores de energía útil captada por día para los meses de Enero y Mayo, empleando en cada caso los simuladores de RETScreen y STELLA para CSA. Se denota que en cada caso se presentan los valores correspondientes a las combinaciones de tres orientaciones y de tres inclinaciones.

Tabla 8.1. Energía útil por día de las diferentes ciudades para tres orientaciones y tres inclinaciones.

Fuente: Elaboración propia.

SIMULACION RETSCREEN										
kWh por día, para diferentes ciudades, orientaciones e inclinaciones del CSA.										
INCLINACION		AZIMUT 0			AZIMUT 45			AZIMUT -45		
		MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA	MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA	MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA
ENERO	15°	3.70	4.00	4.00	3.33	3.67	3.70	3.33	3.67	3.70
	30°	4.33	4.67	4.67	3.67	4.33	4.33	3.67	4.33	4.33
	45°	4.67	5.00	5.00	4.00	4.33	4.33	4.00	4.33	4.33
MAYO	15°	6.67	5.67	5.67	6.67	5.67	5.67	6.67	5.67	5.67
	30°	6.33	5.33	5.33	6.67	5.33	5.33	6.67	5.33	5.33
	45°	5.67	4.67	4.67	6.33	5.00	5.00	6.33	5.00	5.00
SIMULACION MODELO STELLA PARA CSA										
kWh por día, para diferentes ciudades, orientaciones e inclinaciones del CSA.										
INCLINACION		AZIMUT 0			AZIMUT 45			AZIMUT -45		
		MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA	MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA	MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA
ENERO	15°	4.63	4.65	4.75	4.31	4.34	4.44	4.23	4.26	4.35
	30°	5.48	5.51	5.61	4.89	4.91	5.00	4.72	4.75	4.83
	45°	6.03	6.06	6.15	5.18	5.22	5.30	4.94	4.98	5.06
MAYO	15°	5.69	5.70	5.70	6.17	6.17	6.17	7.36	7.36	7.36
	30°	5.38	5.39	5.37	6.30	6.30	6.28	6.68	6.68	6.66
	45°	4.82	4.82	4.78	6.08	6.08	6.05	5.91	5.90	5.88

Se destaca que según los datos de energía útil dados por RETScreen, los valores resultan inferiores a los generados por el Modelo de STELLA para CSA, debido a que el programa de RETScreen está diseñado para subestimar las eficiencias de los CSA, y por ende sobredimensionar las instalaciones con mayor área de captación.



## **CAPITULO IX. DISCUSION DE RESULTADOS.**

### **Introducción.**

Esta sección comprende una discusión de los resultados obtenidos, tanto del modelo de STELLA para CSA que se desarrolló como de la metodología empleada para construir, validar e integrar el modelo de simulación. Se muestran las gráficas y tablas de comportamiento para las tres ciudades (Mexicali, Tijuana y Ensenada) y para diferentes orientaciones e inclinaciones.

El modelo correlaciona básicamente las variables de radiación solar, orientación e inclinación a nivel horario, a fin de establecer el comportamiento del CSA que como se demuestra en los resultados, la ganancia de energía útil es sensible a la variación de la inclinación del colector y de su orientación. Además se demuestra que las eficiencias obtenidas a partir de la simulación del modelo STELLA para CSA se encuentran dentro del rango reportado para esta tecnología que oscila entre 40% y 80% dependiendo de condiciones de instalación y diseño del modelo de colector.

## 9.1 DISCUSION DE RESULTADOS.

En los resultados de la sección anterior, se muestran algunos comportamientos dadas las condiciones particulares de simulación empleando el Modelo STELLA para CSA, en el cual se destaca la relevancia de la orientación e inclinación del CSA para determinar de manera más precisa no solo la cantidad de energía útil captada, sino además la cantidad captada hora por hora en función de la combinación de las características de orientación y de inclinación. En la tabla 8.1, se observan variaciones significativas de los valores que arrojan ambos simuladores, RETScreen y STELLA para CSA, por ello en la siguiente tabla 9.0 se señala la variación entre resultados.

Tabla 9.0. Variación de los datos de Energía útil entre RETScreen y STELLA para CSA.

Fuente: Elaboración propia.

% DE VARIACION ENTRE RETSCREEN Y STELLA										
INCLINACION		AZIMUT 0			AZIMUT 45			AZIMUT -45		
		MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA	MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA	MEXICALI	TIJUANA	ENSENADA
ENERO	15°	0.20	0.14	0.16	0.23	0.16	0.17	0.21	0.14	0.15
	30°	0.21	0.15	0.17	0.25	0.12	0.13	0.22	0.09	0.10
	45°	0.23	0.17	0.19	0.23	0.17	0.18	0.19	0.13	0.14
MAYO	15°	0.17	0.01	0.01	0.08	0.08	0.08	0.09	0.23	0.23
	30°	0.18	0.01	0.01	0.06	0.15	0.15	0.00	0.20	0.20
	45°	0.18	0.03	0.02	0.04	0.18	0.17	0.07	0.15	0.15

Por lo tanto, en la tabla 9.0, se observa que la variación entre RETScreen y STELLA en algunos casos es prácticamente despreciable, pero en otros supera el 20% de diferencia con respecto a lo simulado por STELLA, siendo los puntos con mayor variación la ciudad de Mexicali con sus tres orientaciones para Enero, Tijuana y Ensenada ambas con variación alta en orientación de 45 grados al suroeste durante Mayo.

En el caso de Mexicali, se entiende que RETScreen subestima la ganancia de energía debido a que los datos de radiación que emplea de las base de datos de NASA, no

representan los niveles de radiación que en realidad se tienen, además de que en el mes de Enero las variaciones en los cálculos se vuelven relevantes por la poca cantidad de energía disponible. En tanto que para Tijuana y Ensenada en el mes de Mayo, la orientación a 45 grados al (suroeste) varía significativamente alrededor del 20% debido a la misma razón de los datos de radiación solar disponible y condiciones de claridad de cielo.

Considerando los valores mostrados en la Tabla 8.0, cabe señalar que los días No típicos presentan condiciones que se diferencian claramente del modelo de día típico. En el caso del Modelo STELLA para CSA, no se simulan los 365 días del año, solamente se simula el comportamiento esperado de un colector solar de placa plana de sistema de flujo por termosifón para un día típico de cada mes, dejando fuera el comportamiento de este en un día No típico, los cuales pueden llegar a tener hasta 50% de variación respecto al día considerado como típico.

Básicamente aunque los resultados del Modelo STELLA para CSA son muy aproximados respecto a los datos de referencia validados resultado del monitoreo de campo en Mexicali, aún falta validar los resultados para las ciudades de Tijuana y Ensenada. Sin embargo, considerando los valores de las tablas 8.1 y 9.0, se puede esperar que los datos resulten muy aproximados a los que se pudieran tener en la realidad.

En la figura 9.0, del comparativo de ciudades, se puede diferenciar claramente el comportamiento que tiene hora por hora un CSA respecto a la ganancia de energía útil, relacionando en cada caso el comportamiento de los datos con la orientación y la inclinación del CSA. Para Tijuana se observa poca ganancia siendo esto pertinente, ya que en Enero la altura solar es menor y por ende si se tiene poca inclinación menor es la

ganancia de energía, además de orientarse al sur por lo que se tiene una curva centrada. Para Ensenada que también se orienta al sur, pero se inclina 45 grados, la ganancia es regular ya que en Mayo se requiere una menor inclinación. Finalmente, Mexicali presenta una ganancia elevada al inicio del día debido a que su inclinación es buena para el mes de Enero y más aún si se orienta al sureste (45°), aprovecha mejor las primeras horas del día.

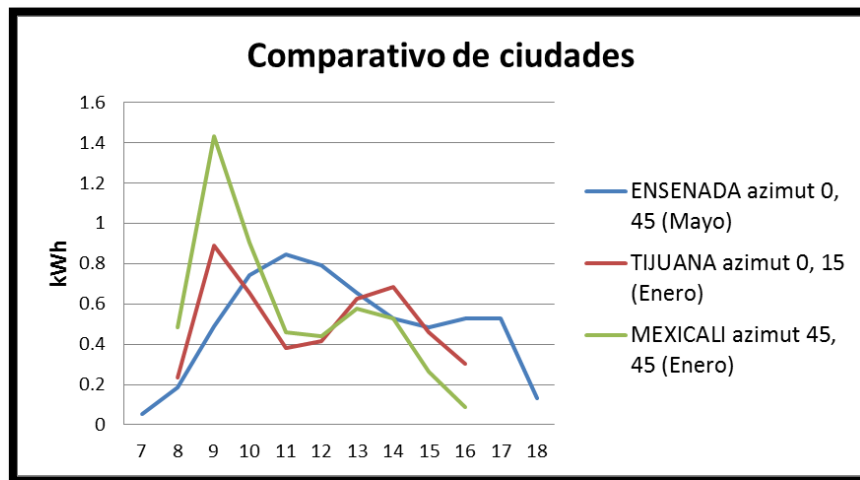


Figura 9.0. Comparativo de STELLA para tres ciudades (ciudad, orientación, inclinación).

Fuente: Elaboración propia.

Respecto de la metodología empleada, el uso de los datos meteorológicos de las estaciones locales de cada ciudad, permite una aproximación mayor del modelo de STELLA con el comportamiento real del CSA. Ya que ningún programa de dimensionamiento detalla la ganancia de energía a nivel horario, y ninguno permite observar el comportamiento del CSA, la metodología empleada garantiza simplicidad en el cálculo una vez que se han generado las funciones de comportamiento para cada ciudad y para cada mes, haciendo que esta sea replicable y confiable en cualquier otro lugar siempre y cuando se cuenten con los datos de estaciones meteorológicas locales para contar con la mayor precisión en la

información. Debido a que la información de las bases de datos meteorológicas debe procesarse a nivel horario, se puede asumir que es la parte más tardada de la metodología.

Así pues, la metodología además de permitir calcular la energía útil que puede ser captada, permite estimar la eficiencia del CSA como se observa en la tabla 9.1.

Tabla 9.1. Energía útil, energía disponible y eficiencia del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

<b>ENERGIA UTIL Y DISPONIBLE, MEXICALI inclinacion 25°, orientacion sur 0°</b>			
<b>kWh/m2-día</b>	<b>STELLA</b>	<b>HOTTEL</b>	<b>EFICIENCIA</b>
<b>ENERO</b>	3.08	5.03	61.23%
<b>FEBRERO</b>	3.035	5.81	52.24%
<b>MARZO</b>	3.65	6.71	54.40%
<b>ABRIL</b>	4.15	7.44	55.78%
<b>MAYO</b>	3.69	7.57	48.75%
<b>JUNIO</b>	3.665	7.53	48.67%
<b>JULIO</b>	3.65	7.52	48.54%
<b>AGOSTO</b>	3.5	7.46	46.92%
<b>SEPTIEMBRE</b>	3.45	7.05	48.94%
<b>OCTUBRE</b>	3.34	6.2	53.87%
<b>NOVIEMBRE</b>	3.155	5.24	60.21%
<b>DICIEMBRE</b>	3.035	4.55	66.70%

En la figura 9.1, se tiene representada la eficiencia del CSA en función de la energía solar disponible en el plano inclinado para los 12 meses del año, cuyo comportamiento es el esperado para Mexicali con eficiencia promedio anual de 54%, ya que se tiene que a menor temperatura del agua mayor velocidad de remoción de energía en el CSA. Los colectores presentan eficiencias que van del 20% al 80% [16], siendo el promedio de 60% para la mayoría de los colectores, dado esto se observa que el sistema mantiene su eficiencia dentro del rango y del promedio reportado por los fabricantes de colectores de placa plana [17].



Figura 9.1. Eficiencia del CSA dado para Mexicali con orientación sur e inclinación de 25 grados.

Fuente: Elaboración propia



## **CAPITULO X. CONCLUSIONES.**

En función de los resultados obtenidos y discutidos en las secciones previas, respecto al Modelo STELLA para CSA, queda establecido que es un modelo funcional con capacidad de representar el comportamiento de los sistemas de calentamiento de agua solares para las ciudades de Mexicali, Tijuana y Ensenada, con un grado de variación respecto a los datos medidos menor al 10%. La herramienta desarrollada es funcional y flexible, considerando que el usuario puede visualizar el comportamiento esperado de una instalación para CSA y tomar la decisión de la opción más adecuada de acuerdo al comportamiento y horario de uso de agua caliente. Básicamente, el Modelo STELLA para CSA es una herramienta para toma de decisiones que incorpora condiciones de instalación y de uso para optimización del desempeño del sistema.

En cuanto la variación de los resultados comparados contra el RETScreen, se observan variaciones hasta del 23% en cuanto a la energía útil por día en aproximadamente el 20% de los datos. Esta herramienta fue diseñada bajo supuestos que no aplican en todos los casos, también emplea datos de la NASA que varían respecto a los reales de estaciones locales y que se basa solo en modelos teóricos para estimar la energía útil, por lo cual hay que revisar los supuestos y criterios para determinar si aplican al caso específico que se está

analizando. Esto permite al Modelo de STELLA para CSA tener ventajas, ya que emplea información local y precisa, además de la función que correlaciona de manera horaria las variables de inclinación y orientación, dando mayor detalle y precisión del resultado.

Además, el Modelo STELLA para CSA presenta resultados dentro de lo esperado en cuanto a eficiencias del sistema (energía útil respecto a la disponible), es decir, la eficiencia anual promedio del sistema de CSA es de 54% para el caso de Mexicali, lo cual es un valor aceptado para esta tecnología.

Finalmente, se puede concluir que el Modelo STELLA para CSA resulta confiable con variaciones para días típico hasta el 15% menos de lo esperado, el modelo representa el comportamiento particular de cada día típico de forma coherente en su representación horaria, la metodología permite correlacionar las variables relevantes en una función simple permitiendo ser un modelo adaptable a cualquier región, y la herramienta cuenta con ventajas visibles que permiten mejorar el dimensionamiento de los sistemas de CSA y mejorar las condiciones de instalaciones de estos mismos.



## BIBLIOGRAFIA

- 1) INEGI, (2014). Censo Económico por municipio, 2014. México.  
<http://www.inegi.org.mx>
- 2) INEGI, (2012). Censo y conteo de población y vivienda por municipio, 2012.  
México. <http://www.inegi.org.mx>
- 3) Business Plan Berkeley Solar Initiative (2008). Octubre 2008.  
<http://www.ci.berkeley.ca.us>
- 4) Astvatsatryan, G. (1999). Stella modeling for energy and water consumption.  
Tesis de maestría. Universidad LUMES, Lund, Suiza.  
[http://www.lumes.lu.se/sites/lumes.lu.se/files/astvatsatryan\\_gohar.pdf](http://www.lumes.lu.se/sites/lumes.lu.se/files/astvatsatryan_gohar.pdf)
- 5) Kerr, S., White, B. (2002). Renewable Energy and the Efficient Implementation  
of New Zealand's Current and Potential Future Greenhouse Gas Commitments.  
Nueva Zelanda. <http://motu.nz/assets/Documents/our-work/environment-and-resources/emission-mitigation/emissions-trading/Renewable-Energy-and-the-Efficient-Implementation-of-New-Zealands-Current-and-Potential-Future-Greenhouse-Gas-Commitments.pdf>

- 6) Perales, Tomas (2008). Instalaciones de Paneles Solares Térmicos. 3ra edición, Editorial Alfaomega.
- 7) Guevara Vásquez Sixto, (2003). Teoría para el Diseño de Calentadores de Agua. Lima, Perú.
- 8) Hipotecaria nacional, (2007). Estudio de mercado de vivienda en: Baja California 2007.
- 9) Instalaciones Fotovoltaicas. IKARUS, Solarsysteme. [www.ikarus-solar.de](http://www.ikarus-solar.de)
- 10) Duffie, J., Beckman, W. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes. 3a edición, Editorial Wiley.
- 11) Gobierno de B.C., (2012). Portal de Gobierno del Estado de Baja California: Nuestros municipios. Tomado en Mayo de 2011. [http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro\\_estado/municipios](http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios)
- 12) Comisión Nacional del Agua (CNA), (2001-2010). Datos de estaciones automáticas de Tijuana, Ensenada y Mexicali. Colima Sanchez Manuel Esgardo; Ortega Murrillo Fausto Ernesto (2011).
- 13) Atmospheric science data center (2009). Surface meteorology and solar energy. <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>
- 14) Solar Rating and Certification Corporation (SRCC), (2012). OG-100 Collector certifications (flat plate, tubular, ICS, thermosiphon, concentrating). The industry standard ICC-SRCC.
- 15) Hottel, H. C. (1976). A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. Solar Energy.

- 16) Fabrisolia S.L.U. (2014). Curvas de rendimiento para colectores solar de placa plana. Solar technology from Barcelona. Barcelona, España.  
<http://fabrisolia.com/aplicaciones-sector-terciario/paneles-solares>
- 17) Confederación de Consumidores y Usuarios, (2012). Energía solar térmica: Proyecto RES & DISSEMINATION. European comisión DG tren.  
<http://cecu.es/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/3%20solar%20termica.htm>



### **EXPERIENCIA Y RECOMENDACIONES.**

Sobre la experiencia adquirida, el realizar el proceso de instrumentación, monitoreo y procesamiento de datos de los colectores de referencia para validación, fue lo que contribuyó de manera importante a la comprensión del trabajo realizado, ya que me permitió realizar observaciones sobre el comportamiento detallado del sistema de calentamiento solar de agua.

También, el nivel de detalle de la información obtenida marcó la pauta para determinar las causas de comportamientos peculiares en los datos medidos, ejemplo de ello los picos y valles de temperatura en los puntos de entrada y salida del colector durante la noche para ciertos meses específicos, lo cual se debió a que el sistema de anticongelamiento abría a temperaturas arriba del punto de congelación del agua, lo que producía pérdidas de agua caliente y desperdicio de agua.

Algunos otros puntos al respecto fue la observación de la inclinación dada al colector instalado, el cual al ser de 25 grados con orientación al sur no optimizaba el desempeño del colector para los meses de mayor demanda o críticos, es decir, la inclinación de 25 grados esta optimizada para el mes de abril y marzo, no para diciembre y enero que son los meses más fríos en Mexicali.

Además, otros aspectos que se vuelven relevantes como el aislamiento en las tuberías, efectos de sombreado y patrones de uso de agua caliente por parte de los usuarios, los cuales a pesar de habitar en el mismo fraccionamiento cada uno presentaba consumos muy diferentes y patrones de uso muy particulares.

Dada la experiencia del trabajo de campo y comparando lo real y medido contra la información teórica que comúnmente se emplea para la realización de proyectos, aprendí que existen aspectos particulares de cada caso en los cuales se vuelve relevante tanto para sacar el mayor provecho a la tecnología como para proveer en el momento en que se necesita, es decir, la coincidencia entre la demanda de energía y la disponibilidad de esta.

Sobre las recomendaciones acerca del trabajo realizado, la recomendación es emplear la metodología desarrollada sin dejar de validar el comportamiento de un sistema de calentamiento solar en el sitio de estudio, ya que esto brinda mayor precisión a los resultados de la simulación. Sobre el modelo de simulación, se recomienda que se complemente para orientaciones también de 90 y -90 grados, es decir, para la condición de orientar el CSA ya sea al Este o al Oeste.

El modelo de STELLA para CSA al estar programado en un ambiente flexible y gráfico, facilita la incorporación de nuevos cálculos y de presentación de resultados, por ello se recomienda mejorar el modelo ampliándolo para sistemas con circulación forzada, tubos evacuados y concentración de cilindro parabólico, a fin de que brinde diversidad tecnológica en los análisis y resultados.

Finalmente, sobre las instalaciones de calentadores solares de agua, se debe considerar por parte de los instaladores y las empresas dedicadas a la realización de proyectos de calentamiento solar, que las condiciones de instalación en cuanto a orientación del equipo, inclinación del colector, el aislamiento de tuberías y las distancias entre termotanque y

punto de uso, tienen un impacto significativo en lo que respecta a las pérdidas de energía en un sistema de calentamiento solar de agua.

El asumir que siempre se busca optimizar la instalación para mejorar el desempeño promedio anual de la instalación termosolar está equivocado, en lugar de ello el criterio debe ser en función de los mayores ahorros de energía en relación con la mejor captación de energía y periodos críticos de consumo, lo cual está dado por el caso único y particular del usuario.