

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

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



**“TERMOECONOMÍA APLICADA AL USO DE ENERGÍA SOLAR EN  
VIVIENDAS”**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:  
RENÉ DEL GADO RENDÓN**

**DIRECTOR  
DR. HÉCTOR ENRIQUE CAMPBELL RAMÍREZ**

**Mexicali, B. C.**

**Agosto de 2009.**

## **Índice.**

## Índice General.

	Pág.
Índice de tablas.	4
Índice de figuras.	10
Resumen.	12
Capítulo 1. Introducción y planteamiento del problema.	21
Capítulo 2. Tecnología Termosolar y Fotovoltaica.	26
Capítulo 3. Metodologías y Herramientas.	42
Capítulo 4. Trabajo de campo y Trabajo experimental.	53
Capítulo 5. Trabajo de simulación.	66
Simulación térmica (CSA).	68
Simulación fotovoltaica (CFV).	74
Capítulo 6. Resultados obtenidos.	85
Resultados de simulación térmica (CSA).	86
Resultados de simulación fotovoltaica (CFV).	88
Capítulo 7. Análisis y discusión de resultados.	92
Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones.	111
Nomenclatura y unidades.	123
Glosario.	126
Bibliografía.	130

## Índice de tablas.

	Pág.
Tabla 2.1:	
Pendiente del colector para tener incidencia normal sobre su superficie al mediodía solar el día 15 de cada mes, en diferentes latitudes de la República Mexicana._____	35
Tabla 2.2:	
Clasificación de celdas FV por tipo de célula_____	36
Tabla 2.3:	
Inclinación recomendada mensual para CSA y CFV_____	40
Tabla 4.1:	
Clasificación de la vivienda en Mexicali por rango de ingresos_____	55
Tabla 4.2:	
Clasificación por valor de la vivienda_____	56
Tabla 4.3:	
Capacidad del tanque o boiler recomendada por número de usuarios_____	57
Tabla 5.1:	
Consideraciones realizadas por el SSCA_____	69
Tabla 5.2	
Datos de entrada relevantes en el dimensionamiento del CSA_____	70
Tabla 5.3:	
Datos de entrada complementarios para CSA_____	70

	Pág.
Tabla 5.4:	
Recurso solar, condiciones ambientales y uso de agua caliente mensuales	71
Tabla 5.5:	
Consideraciones para los cuatro escenarios_____	71
Tabla 5.6:	
Escenarios programados en el campo de modelo de energía_____	72
Tabla 5.7:	
Escenarios planteados en el campo de análisis de costos_____	72
Tabla 5.8:	
Escenarios propuestos en el campo de análisis financiero_____	73
Tabla 5.9:	
Costos del sistema CSA para los escenarios analizados_____	73
Tabla 5.10:	
Datos de demanda y de gas LP para los escenarios de CSA en STELLA._____	74
Tabla 5.11:	
Consideraciones para los escenarios propuestos._____	75
Tabla 5.12:	
Índice de claridad y radiación disponible mensual._____	75
Tabla 5.13:	
Demanda mínima horaria mensual._____	76
Tabla 5.14:	
Información de escenarios en el campo de CFV._____	77

	Pág.
Tabla 5.15:	
Información de baterías para cada escenario en HOMER. _____	77
Tabla 5.16:	
Información del convertidor para cada escenario en HOMER. _____	78
Tabla 5.17:	
Tarifas aplicadas a los diferentes escenarios analizados. _____	79
Tabla 5.18:	
Consideraciones para escenarios de RETScreen-PV. _____	79
Tabla 5.19:	
Condiciones ambientales para escenarios planteados. _____	80
Tabla 5.20:	
Datos de modelo de energía para escenarios propuestos. _____	80
Tabla 5.21:	
Datos para el análisis de costos de los escenarios propuestos. _____	81
Tabla 5.22:	
Información alimentada en el campo de análisis financiero en los escenarios correspondientes. _____	81
Tabla 5.23:	
Recurso solar disponible para análisis CFV en STELLA. _____	82
Tabla 5.24:	
Costos y capacidades de equipo analizados para el sistema CFV en STELLA. _____	83

	Pág.
Tabla 5.25:	
Tarifas de la red eléctrica presupuestas para al análisis y precio de venta de energía renovable._____	83
Tabla 5.26:	
Subsidios propuestos para los escenarios de CFV en STELLA._____	83
Tabla 5.27:	
Datos para el escenario que contempla CSA y CFV._____	84
Tabla 6.1:	
Resumen de resultados para las simulaciones realizadas en SSCA. Escenarios 1-4._____	86
Tabla 6.2:	
Resumen de resultados para las simulaciones realizadas en SSCA. Escenarios 5-9._____	87
Tabla 6.3:	
Resumen de resultados para los cuatro escenarios de CSA en RETScreen._____	88
Tabla 6.4:	
Resumen de resultados para CSA en STELLA._____	88
Tabla 6.5:	
Resumen de resultados para escenarios de CFV analizados en HOMER._____	89
Tabla 6.6:	
Resumen de resultados para escenarios de CFV en RETScreen-PV._____	90

	Pág.
Tabla 6.7:	
Resumen de resultados para CFV en STELLA. _____	90
Tabla 7.1:	
Tipos de factores aplicados a las metodologías para CSA. _____	94
Tabla 7.2:	
Escenarios en SSCA, factores de servicio. _____	95
Tabla 7.3:	
Resultados para los escenarios representativos de SSCA para CSA. _____	96
Tabla 7.4:	
Factores relevantes para la metodología de RETScreen-SWH. _____	97
Tabla 7.5:	
Resumen de resultados para los escenarios analizados por RETScreen-SWH. _____	97
Tabla 7.6:	
Factores relevantes planteados en STELLA-CSA. _____	98
Tabla 7.7:	
Resumen de resultados correspondientes a los escenarios analizados en STELLA para CSA. _____	99
Tabla 7.8:	
Factores aplicados a las metodologías para CFV. _____	100
Tabla 7.9:	
Información de escenarios para CFV en HOMER empleando un costo elevado. ____	102

	Pág.
Tabla 7.10:	
Información de escenarios para CFV en HOMER empleando un costo bajo._____	102
Tabla 7.11:	
Tarifas y precios de electricidad de escenarios analizados en HOMER para CFV. _	103
Tabla 7.12:	
Resumen de resultados de los escenarios en HOMER para CFV. _____	104
Tabla 7.13:	
Información sobre escenarios planteados en RETScreen-PV para CFV. _____	105
Tabla 7.14:	
Resumen de resultados para escenarios analizados en RETScreen-PV para CFV. ___	106
Tabla 7.15:	
Escenarios CFV analizados en el simulador de STELLA. _____	108
Tabla 7.16:	
Resumen de resultados de escenarios para CFV analizados en STELLA. _____	108
Tabla 7.17:	
Información para el escenario mixto (CSA-CFV) para análisis en STELLA. _____	110
Tabla 7.18:	
Resumen de resultados para el escenario mixto (CSA-CFV) en STELLA. _____	110
Tabla 8.1:	
Ventajas y desventajas de las metodologías analizadas. _____	117

## Índice de figuras.

	Pág.
Figura 1.1:	
Emisiones de bióxido de carbono en las viviendas mexicanas. _____	23
Figura 2.1:	
Partes de un calentador solar de agua (CSA). _____	28
Figura 2.2:	
Ejemplo de un ángulo de declinación de 20 grados. _____	30
Figura 2.3:	
Ángulo de inclinación del CSA respecto a la horizontal. _____	31
Figura 2.4:	
Ciclo de calentamiento de agua CSA-Boiler. _____	32
Figura 2.5:	
Diagrama de Balance de Energía. _____	33
Figura 2.6:	
Funcionamiento del arreglo fotovoltaico (CFV). _____	38
Figura 3.1:	
Metodología para el análisis del uso de tecnología solar en la vivienda. _____	45
Figura 4.1:	
Características que permiten caracterizar la vivienda. _____	54
Figura 4.2:	
Instrumentación para monitoreo de la vivienda. _____	60

	Pág.
Figura 4.3:	
Diagrama de funcionamiento de los sistemas de prueba CSA, CFV y contenedor._	63

## **Resumen.**

La situación actual en Baja California en cuanto a la creciente demanda de energía, los altos costos relacionados al consumo energético en el sector residencial y las perspectivas estimadas para los próximos años en la ciudad de Mexicali, tienen repercusiones directas en la calidad de vida de las personas y por consecuencia en la distribución de sus ingresos. El sector vivienda de interés social ocupa la mayor proporción de desarrollo de la vivienda, en consecuencia es la porción mayormente afectada en la ciudad de Mexicali. Por ende, en este trabajo se plantea y analiza la viabilidad de la alternativa del uso de energía solar en la vivienda.

El objetivo principal de este trabajo consistió en desarrollar una metodología sistémica con un enfoque termoeconómico, basada en la adaptación e integración de modelos y técnicas existentes para establecer las condiciones y escenarios para los cuales se logre la factibilidad de uso de energía solar a pequeña escala en el sector residencial de Mexicali, Baja California

Las hipótesis propuestas sobre el uso de tecnología solar en la vivienda de interés social se resumen en que : a) Desde un enfoque termoeconómico existen las condiciones para crear escenarios donde es factible el uso de tecnología solar en la vivienda de interés social en Mexicali, Baja California, b) La tecnología solar para uso residencial es accesible económicamente para el usuario y es capaz de cubrir parte de la demanda energética de manera significativa en la vivienda, y c) Los beneficios generados del uso masivo de tecnología solar en las viviendas de Mexicali impacta de manera importante en la reducción de emisiones y costos de generación de las energías convencionales (electricidad y gas LP).

Cada uno de los capítulos de este trabajo documenta y describe el trabajo realizado para lograr el objetivo propuesto. El primer y el segundo capítulo definen el uso de tecnología solar en la vivienda de interés social en Mexicali para generación de energía eléctrica y de

energía térmica con el enfoque de termoeconomía, además de contemplar a la vivienda como un mercado en crecimiento que conlleva una creciente demanda de energía para el sector residencial. Se consideran como alternativas de solución el empleo de celdas fotovoltaicas (CFV) y calentadores solares de agua (CSA).

Para poder aplicar un enfoque termoeconómico es necesario definir claramente el sistema de estudio y después desagregar sus componentes para poder establecer su interrelación. En este trabajo se define la metodología para uso de sistemas solares en la vivienda, se identifican los tres elementos principales que lo componen (tecnología solar, vivienda y el enfoque de termoeconomía) y finalmente se identifican los factores relevantes (energético, económico y ambiental) y su interrelación en base a la termoeconomía.

La finalidad de la metodología es presentar resultados de análisis de escenarios varios, a partir de los cuales se concluyen las condiciones favorables, las restricciones de uso, el campo de aplicación o para los casos que su implementación es válida y definir las variables mediante las cuales se miden los beneficios generados del uso de calentadores solares de agua (CSA) y celdas fotovoltaicas (CFV).

En los capítulos tres y cuatro, se describe la selección y desarrollo de herramientas como paquetes de cómputo para análisis técnico-financiero de equipo solar, diseño de modelos de simulación, análisis de encuestas de energía y egresos, pruebas experimentales con equipo solar y monitoreo de viviendas de interés social.

Los capítulos cinco y seis comprenden la tercera etapa donde se aplicaron las herramientas para obtener resultados que permitieron ajustar los modelos empleados para los cálculos técnicos, financieros, de energía, y generar las conclusiones definiendo los escenarios donde el uso de equipo solar es viable en los aspectos energéticos, económicos y ambientales.

La parte final del trabajo comprendida en los capítulos siete y ocho, contempla la discusión de los resultados obtenidos, la identificación de las diversas causas que provocan la variación entre resultados, las conclusiones finales que establecen la viabilidad de empleo de calentadores solares de agua dados ciertos escenarios y la identificación de los factores que restringen principalmente en el aspecto económico el uso de sistemas fotovoltaicos de baja capacidad en la vivienda de interés social.

El trabajo realizado demuestra que el enfoque termoeconómico facilita el estudio sistémico de los elementos que conforman el análisis, así como adaptar y adoptar una metodología integral. Esta última, es una de las principales aportaciones, ya que establece la relación entre las variables o factores de tecnología solar, costos y características del usuario. Con este enfoque termoeconómico las ventajas de la metodología propuesta son: a) Establecer relaciones entre los elementos de interés mediante el uso de factores de energía, costos, ahorros (energéticos y económicos) y beneficios cuantificables o medibles, b) Incorporar el análisis técnico y financiero para el equipo solar (CSA o CFV) en base a las condiciones del usuario o de la vivienda, c) Obtener un diagnóstico sobre la factibilidad del uso de tecnología solar en la vivienda, d) Analizar los escenarios buscando opciones que no necesariamente implican el uso de tecnología de punta, que no buscan cubrir totalmente la demanda de la vivienda con el sistema solar y cuya prioridad no es configurar un sistema de alta eficiencia, e) Plantea los escenarios en que la tecnología solar se adapte al sistema convencional de la manera más sencilla, con la mínima inversión posible, utilizando una configuración híbrida entre tecnología solar y convencional para cubrir una parte de la demanda energética que a mediano y largo plazo sea significativa, y f) Los resultados facilitan la toma de decisiones sobre el uso adecuado y eficiente del recurso energético en la vivienda, mediante usos y costumbres que deben ser adoptados por los usuarios.

El estudio demuestra que existen estrategias y acciones para lograr la utilización de forma masiva en el sector residencial de Mexicali de calentadores solares de agua, particularmente en la vivienda de interés social. El uso de la tecnología solar para calentamiento de agua de uso doméstico es viable desde el punto de vista técnico y económico cubriendo de manera significativa parte de la demanda de agua caliente para viviendas que estén ocupadas por al menos cuatro usuarios, con un consumo promedio de 3 kg de gas LP por persona, con un ingreso mínimo de 2 a 5 SMD para viviendas de interés social y de 5 a 10 SMD para viviendas de nivel medio y una demanda diaria mínima de agua caliente promedio de 35 litros por persona.

En estas circunstancias es posible lograr un ahorro en consumo de gas LP de 48 kg mensuales por vivienda, y considerando que anualmente se construyen Mexicali 3680 viviendas nuevas de interés social y media con ingresos por hogar menores a 5 SMD y a 12 SMD, respectivamente, se dejarían de consumir mil toneladas métricas de gas LP cuyo subsidio redirigido a la adquisición de equipos de calentamiento de agua solar equivale a un millón de pesos anuales. Para un consumo de 288 kg de gas LP por vivienda para calentar agua en la temporada invernal se evitarían emitir 2500 ton/año de CO<sub>x</sub> en las viviendas nuevas, lo cual tiene un potencial en bonos de carbón de doscientos mil pesos anuales para apoyar las acciones. Para el mercado de calentadores solares considerando un equipo de 2 m<sup>2</sup> de área por vivienda hay un potencial de 7000 m<sup>2</sup>/año para cubrir la vivienda nueva de interés social y nivel medio en la ciudad de Mexicali. Se estima que un programa social para incluir al total de viviendas existentes con esta clasificación, tiene un potencial de multiplicar al menos 50 veces los valores anteriores.

Una vivienda de interés social requiere una inversión de \$11,000.00 para instalar el CSA y lograría un ahorro mensual de \$172.80 considerando una aportación solar de 80% con lo

cual se pagaría la inversión en 6 años considerando un consumo de gas LP uniforme durante los meses de invierno para un sistema que tiene una vida útil de 25 años. Para un programa de financiamiento se requiere un capital de \$39,600,000.00 para atender anualmente 3600 viviendas, por lo cual el monto financiado total a 10 años es de 396 millones. Para una vivienda con un costo de más de \$300,000.00 y menos de 1 millón de pesos financiada a 10 años implica un incremento en la mensualidad de \$91.7 pesos, considerando que un financiamiento de la vivienda equivale a pagos mensuales de \$2,000.00 pesos aproximadamente.

Por otra parte, el empleo de tecnología solar fotovoltaica no resulta viable económicamente para la vivienda de interés social en Mexicali, dado que la inversión y los costos implicados son demasiado elevados para ser cubiertos por el usuario aun incluyendo subsidios, apoyos y créditos. En ninguno de los escenarios de las situaciones posibles se encontró oportunidad para la tecnología fotovoltaica de baja generación con cualquiera de las metodologías utilizadas para los análisis de viabilidad técnica y financiera.

Refiriendo a las metodologías empleadas para el análisis de los escenarios propuestos, cada una presenta características particulares con ventajas, desventajas y opciones de mejora. Sin embargo, de las cuatro metodologías estudiadas, la opción más adecuada para la evaluación de proyectos que involucran la utilización de CSA y CFV en la vivienda es RETScreen tanto en su versión para calentamiento de agua (RETScreen-SWH) como para sistemas fotovoltaicos (RETScreen-PV), debido principalmente a que está diseñada específicamente para la evaluación técnico-financiera.

El modelo de simulación desarrollado en STELLA, simplifica el manejo de costos, la información técnica del equipo solar y detalla la información referente a la demanda y costos relacionados que definen las características de la vivienda y las necesidades reales del usua-

rio. Tiene la ventaja de estar programado de manera tal que permite reunir las bondades de las metodologías revisadas en un sólo modelo de análisis, es decir, cubre los aspectos técnicos, financieros, de costos y de demanda que maneja RETScreen incluidos de manera simplificada, también detalles adicionales de HOMER como el manejo de tarifas para la demanda eléctrica y detalle de la demanda por mes, y de SSSA la presentación de resultados en términos de ahorro energético, económico y de combustible. Por lo tanto se recomienda utilizar este modelo en los casos de análisis de proyectos que involucran el uso de cualquiera de los sistemas (CSA o CFV) y para casos donde se analiza el uso conjunto de los sistemas, siendo esta última opción la mayor ventaja de esta metodología desarrollada en STELLA.

La parte experimental de este trabajo se orientó a identificar las variables, métodos de medición adecuados y de instrumentación de los sistemas, además de observar las alternativas probables de instalación y de operación de cada sistema. Como resultado de esta parte se concluye que un sistema CSA de placa plana es capaz de operar adecuadamente bajo las condiciones ambientales predominantes en la temporada invernal en la ciudad de Mexicali. El sistema eleva la temperatura del agua al menos a 40<sup>0</sup>C (temperatura mínima de uso) y hasta 60<sup>0</sup>C, de modo que proporciona un fluido utilizable para las necesidades básicas de la vivienda y proporciona el volumen suficiente de agua caliente para cubrir el 80% de la demanda de cuatro personas (120-140 litros por día).

En los sistemas CFV, el equipo es susceptible a bajar su eficiencia en condiciones como nublados parciales o acumulación de polvo sobre la superficie fotovoltaica lo que provoca intermitencia en la generación de electricidad reduciendo la cantidad de energía aprovechada.

De las seis viviendas sujetas a monitoreo de consumo de agua caliente y consumo eléctrico, se obtuvo que el consumo promedio de gas LP por persona es de 2.6 kg por semana, menor que el promedio que se maneja de 3.0 kg de gas LP por persona por semana para calentadores (boiler) usados según los datos de CONAVI que considera un consumo mensual de 48 kg de gas LP por vivienda en el caso de calentadores en uso y 32 kg de gas LP al mes por vivienda para calentadores nuevos. La diferencia entre valores es poca y se debe a que las costumbres de los usuarios consisten básicamente en aprovechar el encendido del sistema (boiler) para utilizar la regadera. Se observó que las costumbres son relevantes en el uso y aprovechamiento de la energía térmica ya que las viviendas observadas consumen aproximadamente 30 litros del agua caliente contenida en el boiler, comparado con el valor de consumo promedio de agua caliente por usuario de 60 litros que proporciona CONAVI. Esto último se puede justificar considerando que el consumo de 60 litros se basa en el volumen de agua utilizada después del mezclado (agua caliente-agua fría) ya que el agua calentada por el sistema (boiler) se encuentra por encima de la temperatura de uso.

Los simuladores para sistemas CSA (SSCA y RETScreen-SWH) utilizan valores de consumo promedio, considerando que el usuario presenta un comportamiento de consumo independiente, ejemplo de ello es el valor de cantidad de agua caliente por persona de 60 litros por día que utiliza RETScreen-SWH y el valor mensual de 4 kg de gas LP por persona que emplea SSCA.

En las viviendas monitoreadas se observó que la demanda de electricidad por concepto de iluminación es susceptible de ser satisfecha mediante el uso de CFV de baja capacidad y focos ahorradores, sin embargo, su implementación involucra superar la barrera que implica el costo de la inversión inicial para el sistema.

Los simuladores HOMER y RETScreen-PV tienen características que permiten complementarse entre sí, por ende es necesario integrar sus ventajas en el modelo de simulación dinámica de STELLA para llevar a cabo análisis mucho más adecuados para los estudios de factibilidad de CSA y CFV en viviendas de interés social, que incluyan el factor de comportamiento de uso de la energía por parte de los usuarios dentro de los análisis técnico correspondiente.

Por todo lo anterior, se recomienda realizar un trabajo de campo a una muestra representativa de viviendas caracterizadas y debidamente instrumentadas para obtener datos de monitoreo que puedan extrapolarse a las viviendas con la caracterización dada. De este modo, la información recopilada puede ser validada y utilizada para evaluar y diagnosticar adecuadamente de manera confiable los proyectos de uso de tecnología solar en viviendas de interés social. El modelo de simulación dinámica en STELLA debe ser trabajado más a detalle de manera que involucre cálculos más precisos y manejo de información validada correspondiente al trabajo de monitoreo así como condiciones particulares del usuario.

## **Capitulo 1. Introducción y planteamiento del problema.**

La creciente población de la ciudad de Mexicali ha incrementado la demanda de viviendas, principalmente del tipo de interés social, por ende, la demanda de energía en el sector residencial aumenta en relación a ello. La energía más utilizada en la vivienda es la eléctrica y la térmica, que se obtienen primordialmente de combustibles fósiles en sus diversas formas. De estas, la térmica para el calentamiento de agua representa cerca del 30% de la energía demandada en la vivienda sólo después de la energía para cocción, y genera cerca del 25% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la vivienda, sólo por debajo de la energía utilizada por electrodomésticos y para cocción (Conavi, 2008).

Las tendencias del aumento en el costo de la energía convencional y las emisiones generadas de los combustibles, hacen necesario buscar alternativas viables que permitan producir energía limpia y satisfacer en forma significativa la demanda de este sector de la población. El campo de aplicación que tiene la tecnología solar es muy amplio y variado, sin embargo es de sumo interés distinguir el uso de la tecnología solar fotovoltaica y solar térmica (termosolar), primordialmente en el sector doméstico y más específicamente para la vivienda de tipo de interés social y de nivel medio que se localizan en la ciudad de Mexicali, Baja California, México. Las aplicaciones térmicas que se analizan son el calentamiento de agua por medio de calentadores solares de agua (CSA) y el calentamiento de agua mediante el uso de calentadores convencionales que utilizan como combustible gas LP principalmente. El CSA puede funcionar en conjunto con el sistema convencional de calentamiento de agua (boiler), es decir, la implementación de un sistema híbrido que provea energía térmica mayormente suministrada por el recurso solar. En México, las emisiones de bióxido de carbono en la vivienda mexicana por concepto de calentamiento de agua (Figura 1.1) ocupan un lugar significativo en cuanto a kg de CO<sub>2</sub> per cápita producidos (Conavi, 2008).

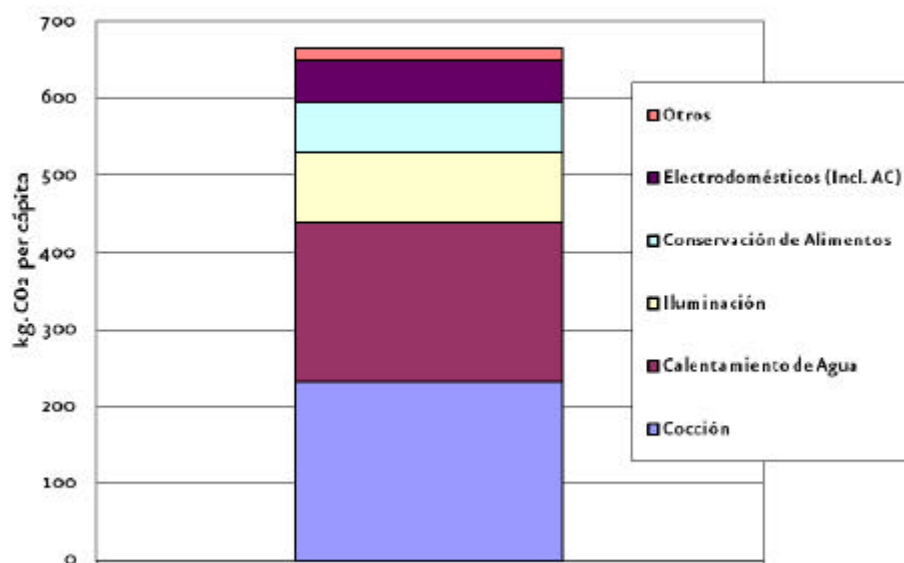


Figura 1.1. Emisiones de bióxido de carbono en las viviendas mexicanas.  
(Fuente: Estimaciones ENTE, S.C.).

En este estudio las aplicaciones eléctricas de interés, involucran el uso frecuente y de bajo consumo eléctrico en la vivienda, es decir, la implementación de un sistema fotovoltaico (CFV) capaz de suministrar energía eléctrica suficiente para cubrir significativamente parte de la demanda generada por iluminación y aparatos de bajo consumo eléctrico, pero que se utilizan con gran frecuencia en los hogares.

Como se muestra en la imagen de emisiones de bióxido de carbono en las viviendas mexicanas, la cantidad de CO<sub>2</sub> derivada del consumo de energía para iluminación es realmente importante (Figura 1.1). El sol, al ser una fuente intermitente de energía, requiere que cualquiera de los sistemas solares mencionados cuente con el respaldo de una fuente convencional de energía. Para la energía eléctrica es indispensable mantener la conexión a la red principal, mientras que para la energía térmica es recomendable mantener un respaldo de gas LP para el calentador de agua.

Sin embargo, para conocer los escenarios donde el empleo de sistemas CSA y CFV sea posible, dada la realidad actual, es necesario tener un enfoque de termoeconomía sobre los aspectos determinantes en la obtención de una conclusión de factibilidad del uso de tecnología solar en las viviendas de interés social de Mexicali.

Buscando lograr el objetivo de factibilidad de proyectos que implican el uso de tecnología solar en la vivienda, se utilizaron herramientas de simulación que permitieron utilizar la información correspondiente a las demandas de energía características de las viviendas de interés social.

### **Objetivos del trabajo.**

Desarrollar una metodología sistémica con un enfoque termoeconómico, basada en la adaptación e integración de modelos y técnicas existentes para establecer las condiciones y escenarios para los cuales se logre la factibilidad de uso de energía solar a pequeña escala en el sector doméstico de Mexicali, Baja California.

Donde la termoeconomía trata del diagnóstico, mejoramiento y optimización de sistemas considerando los costos monetarios y energéticos (Valero Capilla, Antonio, 1998). La termoeconomía aplicada en este trabajo actúa como el elemento mediador y de relación entre los factores técnicos, económicos y de los usuarios del sistema en cuestión. Por lo tanto, este enfoque de trabajo tiene como objetivo ayudar a determinar escenarios donde exista un equilibrio entre el costo, la energía y la calidad de vida del usuario de tecnología solar, dados dichos beneficios en términos de ahorros financieros, aprovechamiento de energía renovable y uso eficiente del recurso energético en la vivienda.

Por todo lo anterior se tienen las siguientes hipótesis sobre el uso de tecnología solar en la vivienda de interés social:

- Desde un enfoque termoeconómico existen las condiciones para crear escenarios donde el uso de tecnología solar en la vivienda de interés social en Mexicali, Baja California sea realizable.
- La tecnología solar para uso residencial es accesible económicamente para el usuario y es capaz de cubrir parte de la demanda energética de manera significativa en la vivienda.
- Los beneficios generados del uso masivo de tecnología solar en las viviendas de Mexicali impacta de manera importante en la reducción de emisiones y costos de generación de las energías convencionales (electricidad y gas LP).

## **Capitulo 2. Tecnología termosolar y fotovoltaica.**

El presente capítulo tiene el objetivo de proveer la información básica referente a las definiciones, características, funcionamiento y consideraciones relacionadas al concepto de tecnología solar térmica y solar fotovoltaica que permitan la comprensión de tales sistemas. Se incluyen la descripción de los sistemas de calentamiento solar de agua y sistema fotovoltaico, además se mencionan aquellas consideraciones que deben realizarse para poder llevar a cabo la instalación de los sistemas. Incluye también la descripción del funcionamiento y operación de los sistemas ya mencionados, de tal manera que se plantea una idea sencilla y clara de la manera en que estos funcionan.

### **Conceptos generales.**

Las tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar son muy variadas en complejidad, diseño, materiales, etc., sin embargo, todas ellas tienen un mismo objetivo, utilizar la radiación solar para dos fines principales, la obtención de energía térmica mediante sistemas CSA y generación de electricidad mediante sistemas CFV.

Los CSA son artefactos que captan energía solar y la convierten en energía útil en forma térmica mediante el calentamiento de un fluido ya sea para almacenar el fluido calentado en un contenedor o para el uso inmediato del fluido caliente. Un sistema de calentamiento tiene la función principal de calentar un fluido a temperaturas útiles entre  $40^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$ , para los diversos fines y aplicaciones. Algunos usos domésticos son: calentar agua para bañarse, para lavar ropa, para lavamanos y para lavar trastes.

La captación solar fotovoltaica o CFV, son equipos que transforman la radiación solar en energía eléctrica que es aprovechada por los equipos electrodomésticos. Algunos aparatos de bajo consumo eléctrico que pueden utilizar la energía obtenida son principalmente: radios, lámparas, focos, televisores, entre otros. Un sistema fotovoltaico tiene básicamente

cuatro funciones: transformar directa y eficientemente la energía solar, almacenar adecuadamente la energía producida, proveer adecuadamente la energía producida y utilizar eficientemente la energía producida.

### **Estructura y funcionamiento del calentador solar de agua (CSA).**

Un calentador solar de agua se compone de las siguientes partes (Figura 2.1):

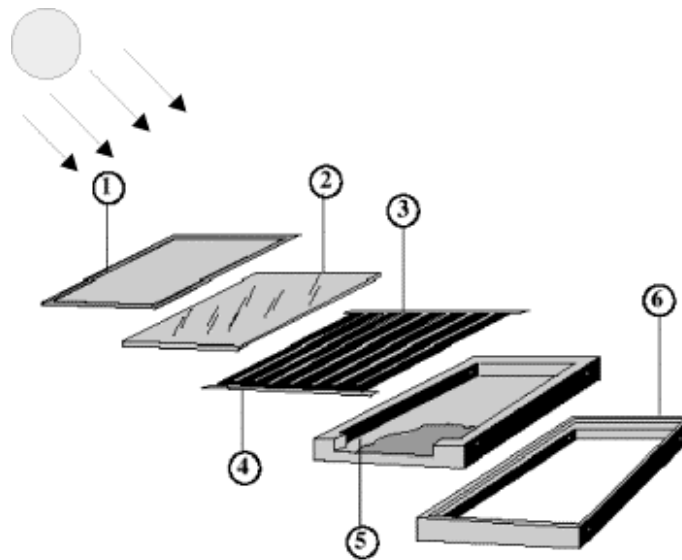


Figura 2.1. Partes de un calentador solar de agua (CSA).

Fuente: [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx)

1. Marco de la cubierta. Este además de sujetar la cubierta transparente, reduce la pérdida de aire caliente hacia el exterior. Por su función debe ser de materiales ligeros y manejables, como el aluminio.
2. Cubierta transparente. Es la cara superior del CSA donde incide la radiación solar, por lo que sus características de transmisibilidad y reflexión son importantes. Los materiales varían entre vidrio, vidrio templado y materiales selectivos.

3. Placa absorbente. Es el componente de absorción de la energía solar incidente sobre la superficie del CSA. Este se encarga de conducir la energía captada hasta los conductos por los que circula el fluido para elevar su temperatura. Posee una alta conductividad térmica que puede incrementarse mediante recubrimientos especiales. Los materiales de esta placa pueden ser de cobre, aleaciones cobre-aluminio o acero.
4. Conductos o tubería. Son los elementos que transportan el fluido de interés, y medio por el cual se mueve la energía removida de la placa absorbente. El arreglo y material de estos varía según el diseño, la temperatura del fluido que se desee obtener, la agresividad del fluido y las condiciones ambientales a que estará expuesto. Sus características principales son su conductividad térmica y el manejo de la presión del fluido. Los materiales principalmente utilizados son de cobre, acero y en pocas ocasiones PVC.
5. Material aislante. Este reduce significativamente las pérdidas de calor a través de las paredes laterales y del fondo de la carcasa del CSA. El tipo de material y espesor de este varía en cada diseño, además de ser ligero debe tener una baja conductividad térmica. Materiales como la espuma de poliuretano, la resina de melamina, fibra de vidrio y poliestireno, tienen dicha aplicación.
6. Carcasa. Es la estructura que soporta y contiene los componentes ya mencionados. Debe ser de un material ligero, resistente y manejable, además de procurar una conductividad térmica baja. El material más utilizado es el aluminio, sin embargo pueden usarse también el acero galvanizado y la madera, aunque estos últimos sean poco recomendados.

La instalación y orientación del calentador solar de agua (CSA) debe realizarse por al menos dos personas, aun si son profesionales. Cada producto de calentamiento solar de agua cuenta con un manual y una guía de usuario, en estos se describen los pasos a realizar para llevar a cabo una instalación confiable del equipo, además de indicaciones para su operación óptima y segura. Los pasos a seguir se resumen básicamente en quince pasos fundamentales a seguir (Anexo 1), pasos que conforman la preparación para el trabajo de instalación, la realización de la instalación y puesta en funcionamiento del sistema.

La orientación del CSA dependerá del hemisferio donde se realiza la instalación del sistema. En una instalación al norte del ecuador el CSA debe mirar al sur geográfico, mientras que para una instalación al sur del ecuador el CSA debe mirar al norte geográfico.

Mediante el uso de una brújula se determina el norte magnético, para determinar el norte geográfico, se corrige la posición con la declinación del lugar (Figura 2.2).

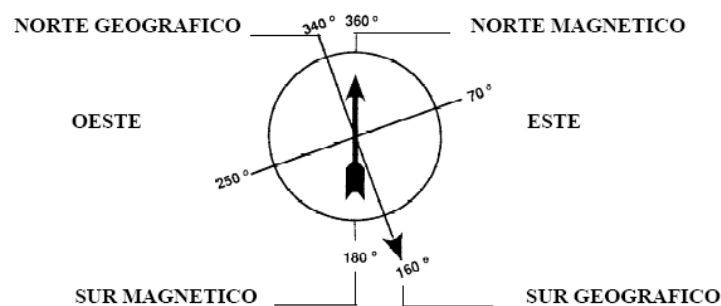


Figura 2.2. Ejemplo de un ángulo de declinación de 20 grados.  
Fuente: [www.solartronic.com](http://www.solartronic.com)

Otra manera sencilla para determinar el norte geográfico, es plantando una estaca y observar la longitud de la sombra proyectada, cuando esta se reduce al mínimo se ha alcanzado el medio día solar para esa estación del año. La dirección de la sombra y la posición del sol indican la dirección norte-sur geográfico.

El ángulo de inclinación del CSA (Figura 2.3) determina el ángulo de incidencia de la radiación solar que este recibirá, y por ende la cantidad de energía solar que aprovecha. Un ángulo perpendicular entre el plano de la superficie del CSA y el sol es el recomendado para una mejor captación. Algunos criterios para seleccionar un lugar adecuado para la instalación del CSA, así como también algunos tipos de anclaje y soporte para el equipo, deben considerarse para maximizar el aprovechamiento del recurso solar (Anexo 2).

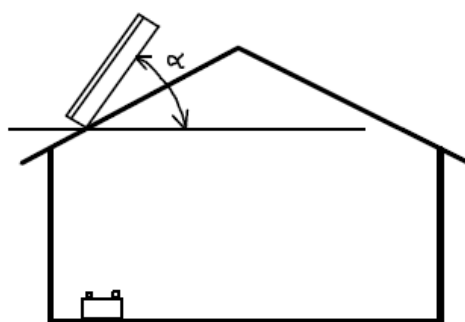


Figura 2.3. Ángulo de inclinación del CSA respecto a la horizontal.  
Fuente: [www.solartronic.com](http://www.solartronic.com)

El funcionamiento de un CSA es relativamente simple, el calentador solar de agua aprovecha el efecto invernadero que se genera cuando atrapa la energía solar incidente sobre su cara transparente, lo que produce un calentamiento en el interior del CSA. Al calentarse el interior la placa absorbente alcanza el mayor incremento de temperatura y al estar en contacto directo con el conducto por el que circula el fluido este remueve la energía térmica de la placa absorbente, cuando se presenta un gradiente de temperaturas, siempre que sea mayor en la placa absorbente y menor en el fluido. El fluido ya calentado sale del CSA a un depósito o contenedor en el cual se almacena el fluido caliente o bien se realiza un intercambio de calor o se envía directamente a su destino de uso final. El mismo fluido se mantiene circulando por el CSA y el contenedor hasta lograr la temperatura deseada dentro del

contenedor, hasta lograr la máxima temperatura esperada o hasta que la temperatura del fluido a la salida del CSA sea inferior a la del fluido dentro del contenedor (Figura 2.4).

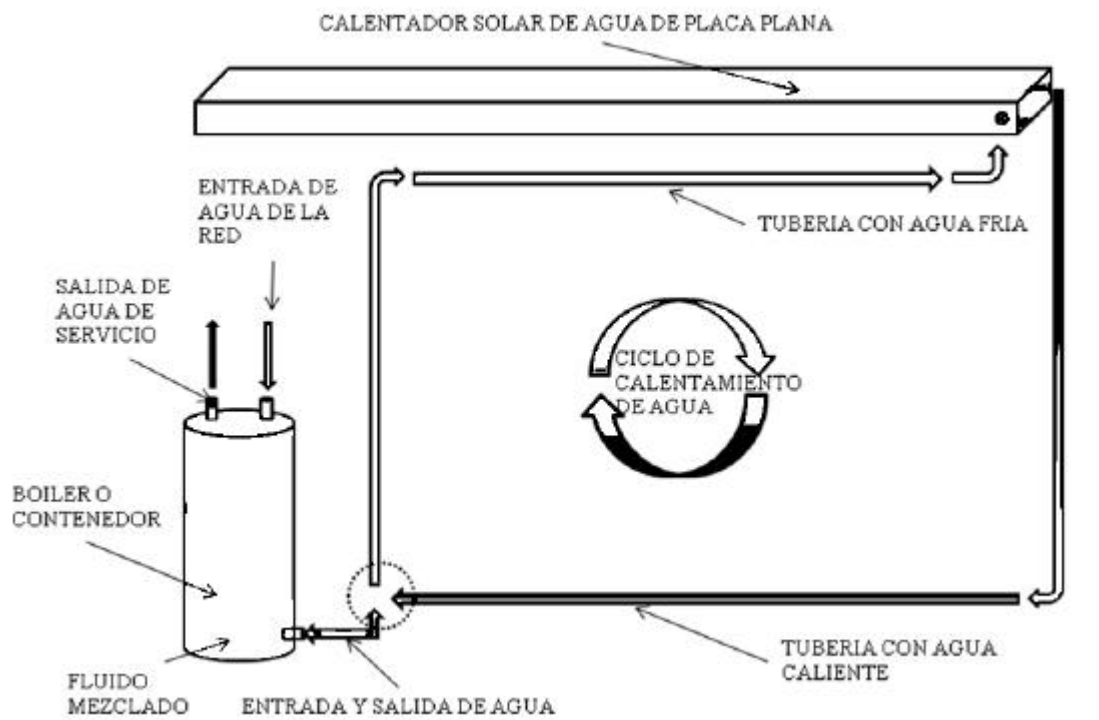


Figura 24. Ciclo de calentamiento de agua CSA-Boiler.  
Fuente: Este estudio.

Para calcular la cantidad de energía aprovechada por el CSA con respecto a la cantidad de energía solar incidente sobre el mismo, se realiza el balance de energía, el cual considera las formas de pérdida de energía presentes en el CSA. El balance tiene como objetivo determinar el calor útil transmitido al agua para establecer la eficiencia del calentador solar. El calor útil ( $q_{util}$ ), empleado para calentar el agua del depósito de almacenamiento, es una parte de la radiación global incidente sobre el colector solar ( $H_T A_e$ ), la otra parte es calor disipado al ambiente: por el colector solar ( $q_{cs}$ ), por el depósito de almacenamiento ( $q_{da}$ ) y por las conexiones ( $q_{cx}$ ). En la Figura 2.5 se muestra un diagrama del balance de energía.

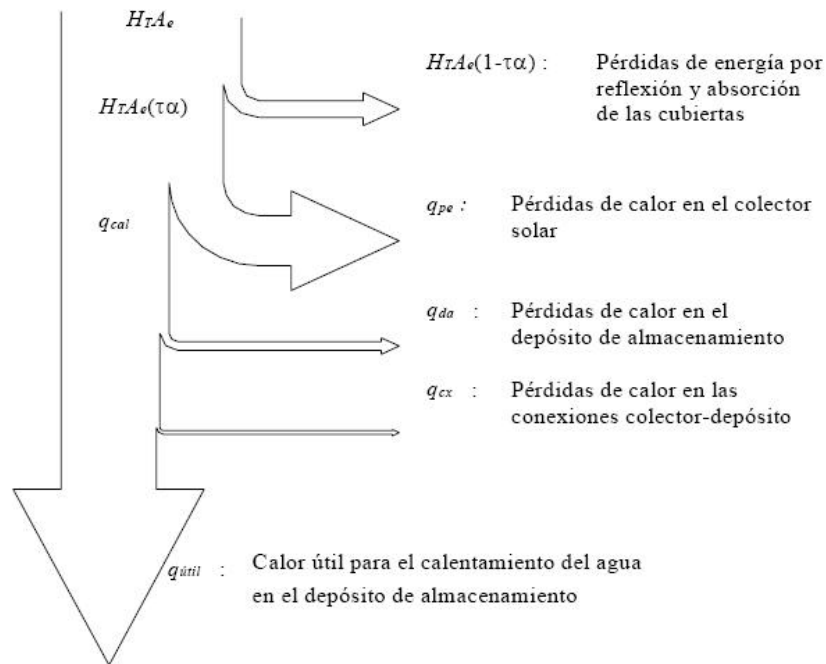


Figura 2.5. Diagrama de Balance de Energía.  
Fuente: [www.cepis.org.pe](http://www.cepis.org.pe)

Este balance de energía se expresa analíticamente como:

$$H_{\tau}A_e = q_{\acute{u}til} + q_{cx} + q_{da} + q_{pe} \quad \text{Ec.1}$$

La energía útil se define como la energía o el calor que extrae el fluido del sistema, se determina con el calor específico ( $J/kg^{\circ}C$ ) en función del caudal y de la diferencia de temperaturas de entrada y salida. Así tenemos que:

$$q_{\acute{u}til} = m * Cp * (T_{fs} - T_{fe}) \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

$q_{\acute{u}til}$  = calor útil.

$m$  = flujo de fluido que pasa por el colector.

$T_{fe}$  = temperatura de entrada del fluido.

$T_{fs}$  = temperatura de salida del fluido.

$C_p$  = capacidad calorífica del fluido.

$\eta_c$  = eficiencia del sistema.

La eficiencia del calentador se define como el porcentaje de la radiación solar global incidente sobre la superficie efectiva del colector y que es aprovechado como calor útil.

$\eta_c$  = calor aprovechado/radiación solar incidente

$$\eta_c = \frac{Q_{\text{útil}}}{H_T A_c} \quad \text{Ec.3}$$

En la práctica la eficiencia se determina experimentalmente en un intervalo finito de tiempo. Para fines de diseño el período de evaluación  $t$  puede ser de un día o un tiempo mayor. Así, los valores puntuales obtenidos durante el periodo de evaluación son integrados mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_c = \frac{\int_0^t q_{\text{útil}} dt}{\int_0^t H_T A_c dt} \quad \text{Ec.4}$$

En conclusión, la eficiencia del equipo CSA estará dada básicamente por tres factores principales: radiación solar, ambiente y el calor útil (Guevara, Sixto, 2003).

El ángulo de inclinación del CSA es relevante en cuanto a la cantidad de energía que este recibe del sol, por ende la estimación del ángulo de inclinación se realiza considerando la estación o mes del año correspondientes. El CSA puede estar en un ángulo de inclinación fijo si la base no es movable, puede ajustarse manualmente si la base lo permite, o ajustarse automáticamente si la base tiene un sistema de ajuste programado. El método más utilizado para determinar el ángulo de inclinación en instalaciones residenciales fijas es:

$$\text{Para verano, } \theta = \text{Latitud} - 15^\circ \quad \text{Ec.5}$$

Para invierno,  $\theta = \text{Latitud} - 15^\circ$

Ec.6

Donde  $\theta$  es el ángulo calculado, la *latitud* que corresponde a la ciudad o localidad donde se desea instalar el CSA, y un ángulo de ajuste de  $15^\circ$ . Sin embargo, algunos autores consideran un valor diferente para estaciones de verano e invierno respectivamente (Tomas Perales, Benito, 2005):

Para verano,  $\theta = \text{Latitud} + 10^\circ$

Ec.7

Para invierno,  $\theta = \text{Latitud} - 10^\circ$

Ec.8.

Para variar el ángulo de inclinación del colector mes a mes, se recomienda usar la tabla de pendientes para colectores estimada para el día 15 de cada mes según la latitud del lugar en la República Mexicana (Paz Gutiérrez, Jenaro, 2006), como se ve en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1. Pendiente del colector para tener incidencia normal sobre su superficie al mediodía solar el día 15 de cada mes, en diferentes latitudes de la República Mexicana.  
(Fuente: [www.uacj.mx/Publicaciones](http://www.uacj.mx/Publicaciones))

Lat.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
15°	36.26	28.28	17.81	5.59	-3.79	-8.31	-6.51	1.22	12.79	24.59	34.14	38.33
16°	37.26	29.28	18.81	6.59	-2.79	-7.31	-5.51	2.22	13.79	25.59	35.14	39.33
17°	38.26	30.28	19.81	7.59	-1.79	-6.31	-4.51	3.22	14.79	26.59	36.14	40.33
18°	39.26	31.28	20.81	8.59	-0.79	-5.31	-3.51	4.22	15.79	27.59	37.14	41.33
19°	40.26	32.28	21.81	9.59	0.21	-4.31	-2.51	5.22	16.79	28.59	38.14	42.33
20°	41.26	33.28	22.81	10.59	1.21	-3.31	-1.51	6.22	17.79	29.59	39.14	43.33
21°	42.26	34.28	23.81	11.59	2.21	-2.31	-0.51	7.22	18.79	30.59	40.14	44.33
22°	43.26	35.28	24.81	12.59	3.21	-1.31	0.49	8.22	19.79	31.59	41.14	45.33
23°	44.26	36.28	25.81	13.59	4.21	-0.31	1.49	9.22	20.79	32.59	42.14	46.33
24°	45.26	37.28	26.81	14.59	5.21	0.69	2.49	10.22	21.79	33.59	43.14	47.33
25°	46.26	38.28	27.81	15.59	6.21	1.69	3.49	11.22	22.79	34.59	44.14	48.33
26°	47.26	39.28	28.81	16.59	7.21	2.69	4.49	12.22	23.79	35.59	45.14	49.33
27°	48.26	40.28	29.81	17.59	8.21	3.69	5.09	13.22	24.79	36.59	46.14	50.33
28°	49.26	41.28	30.81	18.59	9.21	4.69	6.49	14.22	25.79	37.59	47.14	51.33
29°	50.26	42.28	31.81	19.59	10.21	5.69	7.49	15.22	26.79	38.59	48.14	52.33
30°	51.26	43.28	32.81	20.59	11.21	6.69	8.49	16.22	27.79	39.59	49.14	53.33
31°	52.26	44.28	33.81	21.59	12.21	7.69	9.49	17.22	28.79	40.59	50.14	54.33
32°	53.26	45.28	34.81	22.59	13.21	8.69	10.49	18.22	29.79	41.59	51.14	55.33
33°	54.26	46.28	35.81	23.59	14.21	9.69	11.49	19.22	30.79	42.59	52.14	56.33

## Estructura y funcionamiento del sistema fotovoltaico (CFV).

Un módulo fotovoltaico se compone de las siguientes partes:

1. Material fotovoltaico. Este se fabrica a base de silicio, del cual a partir de diferentes procesos se obtienen diferentes tipos de celdas (Tabla 2.2). Este material es el que reacciona con la radiación solar a partir de la cual genera electricidad.

Tabla 2.2. Clasificación de celdas FV por tipo de célula.

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

TIPO DE CÉLULA	RENDIMIENTO	CARACTERÍSTICAS
<b>MONOCRISTALINO</b>	15-18%	-Cristal único. -Buen rendimiento. -Color azul homogéneo.
<b>POLICRISTALINO</b>	12-14%	-Diferentes cristales elementales. -Precio inferior al del anterior. -Diferentes tonalidades de azul.
<b>AMORFO</b>	<10%	-Capa delgada. -Células flexibles en forma de láminas. -Color marrón homogéneo.

2. El marco. Este es el material que tiene la función de mantener unido el elemento fotovoltaico y que permite su manejo e instalación. El material más utilizado es el aluminio por ser ligero, maleable y resistente.
3. Circuito de cableado. Corresponde a los cables que unen los circuitos del elemento fotovoltaico y que conducen la electricidad generada. Estos cables se unen en la parte posterior del panel fotovoltaico donde tienen una conexión de salida.

La instalación del módulo fotovoltaico o sistema fotovoltaico (CFV) debe realizarse tomando en cuenta el tipo de corriente que se desea, si se desea corriente directa (CD) o si necesita corriente alterna (CA). El CFV genera corriente directa (CD) por lo que sólo aquellos aparatos diseñados para el uso de este tipo de corriente pueden ser conectados. Para contar con corriente alterna (CA), como la que provee la red eléctrica principal, se necesitan aparatos de CA se requiere de equipo adicional que convierta la CD a CA.

Los pasos para realizar la instalación de un CFV pueden ser sencillos o complicados dependiendo de la capacidad del sistema y el uso dado. Para casos donde el CFV alimenta de manera directa un aparato de bajo consumo, resulta factible realizar la instalación por parte del usuario, siempre siguiendo el manual y guía de instalación incluidas en el CFV. Los pasos contenidos en los manuales y guías de instalación se resumen en dieciséis puntos (Anexo 3), los cuales conforman las etapas de preparación, realización de la instalación y puesta en funcionamiento del sistema.

Cuando se trata de instalar un sistema fotovoltaico de gran capacidad y que requiere de equipo adicional como lo son; baterías para almacenar electricidad, inversores de corriente y controles adicionales, es necesario que la instalación y prueba del sistema se realice por personal profesional, ya sea que lo brinde el proveedor del CFV o que se contrate a un proveedor de servicios especializado. En este caso, la complejidad y consideraciones que tienen que realizarse, hacen indispensable la asesoría profesional.

Las consideraciones para orientar el CFV son las mismas que se aplican para la orientación del CSA. Es importante denotar que para un CFV los efectos de sombra afectan grandemente su desempeño y es sensible a la variación en su ángulo de inclinación. Es conveniente que el CFV sea ajustado en su ángulo de inclinación mensualmente para obtener mejores resultados y mayor aprovechamiento del recurso solar, ya sea mediante un sistema de se-

guimiento o mediante el uso de una base que permita ajustar la inclinación del equipo fotovoltaico. (Anexo 2).

El funcionamiento de un módulo o arreglo fotovoltaico consiste en varias etapas (Figura 2.6). La primera consiste en la generación eléctrica que se da debido a la reacción que provoca la radiación solar en el material fotovoltaico, es decir, la radiación solar causa que los electrones del material fotovoltaico generen una corriente, en consecuencia se produce energía eléctrica. La siguiente etapa es el transporte de la energía mediante el cableado adecuado hasta el aparato o equipo que la demanda, hasta las baterías para almacenar energía eléctrica, y hasta suministrar la energía generada a la red si existe una conexión que así lo permita.

Finalmente en la etapa de utilización, la electricidad generada por el CFV puede realizarse de manera directa (CD) ya sea desde el CFV o desde las baterías, sin embargo, para poder utilizar aparatos comunes de corriente alterna, son necesarios controles de seguridad e inversores de corriente. (Anexo 4).

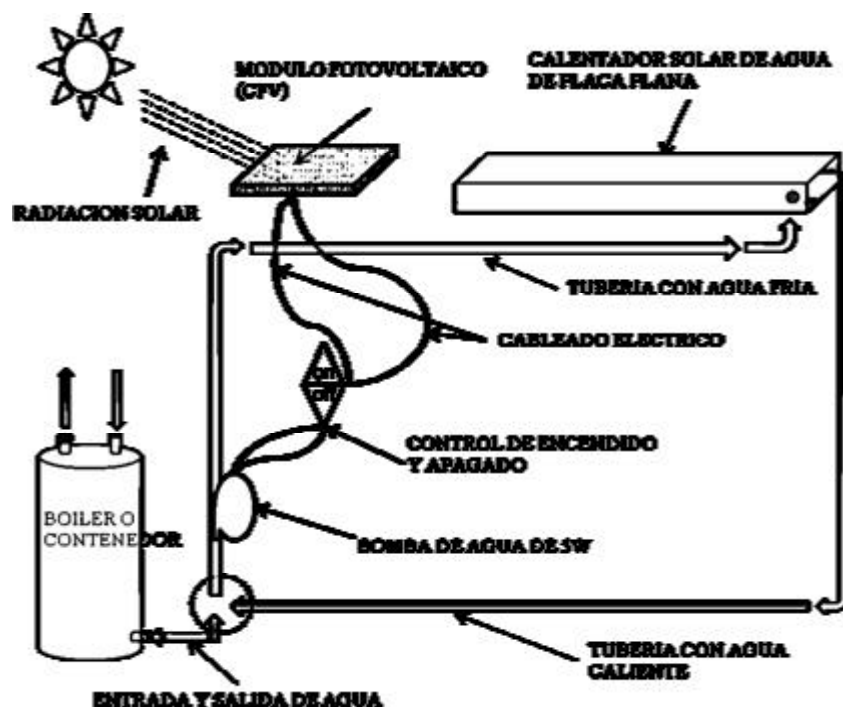


Figura 2.6. Funcionamiento del arreglo fotovoltaico (CFV).  
Fuente: Este estudio.

Para calcular la eficiencia de conversión del módulo fotovoltaico se relaciona la energía producida o generada y la energía incidente sobre el CFV, de tal modo que la eficiencia de conversión se define como:

$$\eta\% = \left( \frac{\text{Energía generada}}{\text{Energía incidente}} \right) \times 100 \quad \text{Ec.9}$$

Si los valores de potencia luminosa y orientación del panel permanecen constantes, la corriente de salida de un panel fotovoltaico varía con el valor de voltaje de carga y su temperatura de trabajo. Esto se debe a las características intrínsecas de los materiales semiconductores.

Para la mayoría de los paneles fotovoltaicos, cuando la temperatura de trabajo aumenta el valor de la potencia de salida disminuye, esto ocurre en casi todos los casos excepto en lugares muy fríos. Cuando ello ocurre, la potencia de salida nunca alcanza el valor pico especificado por el fabricante.

La temperatura de trabajo que alcanza el panel fotovoltaico obedece a una relación lineal dada por:

$$T_t = T_a + k R \quad \text{Ec.10}$$

Donde:

$T_t$  = temperatura de trabajo del panel.

$T_a$  = máxima temperatura ambiente.

$k$  = coeficiente que varía entre 0.2 y 0.4  $^{\circ}\text{C cm}^2/\text{W}$ , donde el mínimo es cuando la velocidad del viento es alta y el valor máximo cuando la velocidad del viento es nula o casi nula.

$R$  = valor de la radiación solar en  $W/cm^2$ . Para lugares con alta insolación diaria se utiliza el máximo valor, y si existen nublados que reduzcan el valor de irradiación, el valor de  $R$  se reduce a  $80W/cm^2$ . El producto de  $kR$  representa el aumento de temperatura que sufre el panel sobre la máxima temperatura ambiente.

Una vez conocido este valor de  $T_t$ , se determina el valor de potencia de salida de un panel trabajando a una temperatura  $T_t$  y se determina como:

$$P_t = P_p - (P_p * d * \Delta T) \quad \text{Ec.11}$$

Donde:

$P_t$  = potencia de salida a la temperatura de trabajo  $T_t$ .

$P_p$  = potencia pico del panel a  $25^0C$ .

$d$  = coeficiente de degradación.

$\Delta T$  = es el incremento de temperatura por sobre los  $25^0C$ .

Si se asumen valores para un  $P_p=60W$ ,  $d=0.006^0C$  y un  $\Delta T=29^0C$ , tenemos que:

$$P_t = 60 - (60 * 0.006 * 29) = 60 - 10.44 = 49.56W$$

Valor común para zonas desérticas donde la radiación es elevada y los vientos en verano son mínimos, la temperatura de trabajo del panel se elevará, incrementándose la pérdida de la potencia de salida (L. Gasquet, 2004).

La eficiencia de conversión del sistema fotovoltaico está en relación a la energía incidente sobre este, por eso es conveniente el uso de sistemas de seguimiento, soportes de equipo que permitan ajustar la inclinación según se requiera. Los ángulos de inclinación recomendados correspondientes a la ciudad de Mexicali se muestran en la Tabla 2.3, aplican para el equipo calentador solar de agua (CSA) y de igual modo para el sistema fotovoltaico (CFV).

Tabla 2.3. Inclinación recomendada mensual para CSA y CFV.  
Fuente: Colectores solares planos. Paz Gutiérrez, Jenaro, 2006.

Latitud de Mexicali: 32°			
Mes	Inclinación	Mes	Inclinación
Enero	53.26	Julio	10.49
Febrero	45.29	Agosto	18.22
Marzo	34.81	Septiembre	29.79
Abril	22.59	Octubre	41.59
Mayo	13.21	Noviembre	51.14
Junio	8.69	Diciembre	55.33

Como se indicó al principio de este capítulo, es importante reconocer y diferenciar entre sistemas de calentamiento solar de agua y sistemas fotovoltaicos, de igual modo es fundamental tener una idea clara del funcionamiento de cada uno de estos sistemas, ya que a partir de ello se comprenden las limitaciones de cada uno de los sistemas y por ende se tiene conciencia de las implicaciones técnicas y económicas que de estos se desprenden durante el planteamiento de un proyecto. Hay que recordar que un sistema CSA es mucho menos costoso y complejo que un sistema CFV, debido principalmente a que este último implica el riesgo inherente a la electricidad y de equipos adicionales para el manejo y suministro de energía eléctrica. No menos importante son las consideraciones ambientales óptimas o suficientes requeridas para un buen desempeño de las tecnologías solares, dado que en función de la disponibilidad del recurso solar dependerá la cantidad y calidad de energía generada o aprovechada.

## **Capitulo 3. Metodología y Herramientas.**

Este capítulo establece la relación entre los diferentes elementos que conforman el enfoque termoeconómico, por ello, se propone una secuencia de pasos para lograr un análisis integral. Se describe la metodología a utilizar y la descripción de los componentes de la misma, como las herramientas de paquetes de cómputo empleadas para las simulaciones de escenarios. También se describen los materiales empleados para la etapa experimental, que tiene como objetivo principal obtener información coherente acerca del funcionamiento del sistema CSA y CFV que coincida con los resultados esperados para tales sistemas. El objetivo de utilizar diferentes simuladores es realizar un análisis comparativo que conlleve a resultados coherentes y para identificar aquellos factores y variables indispensables y determinantes para lograr soluciones confiables.

### **Metodología.**

La metodología propuesta se basa en el manejo de un enfoque desde el punto de vista de la termoeconomía, basada en la adaptación e integración de modelos y técnicas existentes, que permita establecer las condiciones y escenarios para los cuales se logre la factibilidad sistémica del uso de tecnología solar, a pequeña escala, enfocado al sector doméstico de la ciudad de Mexicali, Baja California.

La termoeconomía busca lograr un equilibrio o punto óptimo entre los aspectos técnicos y financieros, sin dejar que estos pierdan su relación existente de beneficio-costos. La termoeconomía se define por Antonio Valero como “El estudio desagregado de un sistema con el fin de encontrar como se forma el costo, como se interrelacionan los componentes y cuáles son sus verdaderas eficiencias para localizar las causas de ineficiencia y cuantificar la causalidad a través de los valores de costos”. Para poder aplicar un enfoque termoeconómico es necesario definir claramente el sistema de estudio y después desagregar sus componentes

para poder establecer su interrelación. En este trabajo se define la metodología para uso de sistemas solares en la vivienda, se identifican los tres elementos principales que lo componen (tecnología solar, vivienda y el enfoque de termoeconomía) y finalmente se identifican los factores relevantes (energético, económico y ambiental) de interrelación en base a la termoeconomía.

La finalidad de la metodología es presentar resultados de análisis de escenarios varios a partir de los cuales se concluye las condiciones favorables, las restricciones de uso, el campo de aplicación o para los casos que su implementación es válida y definir las variables mediante las cuales se miden los beneficios generados del uso de calentadores solares de agua (CSA) y celdas fotovoltaicas (CFV).

La metodología se conforma primeramente de modelos existentes y especializados para el estudio técnico y financiero de proyectos que involucran equipos solares como CSA y CFV. Involucra también la definición del campo de aplicación así como sus variables y comportamiento a través del tiempo.

Finalmente, los aspectos técnicos y financieros correspondientes a los anteriores, se manejan integralmente mediante el enfoque termoeconómico. Por ello, la metodología propuesta no sólo evalúa el aspecto técnico-financiero si no que también los beneficios y el valor desde el punto de vista ambiental y de mejora en la calidad de vida de las personas beneficiadas del uso de esta tecnología.

Dentro de la implementación del enfoque termoeconómico, se realizan las pruebas experimentales necesarias del equipo solar que permiten establecer criterios de funcionalidad, de operación y de desempeño.

La metodología para el análisis del uso de tecnología solar en la vivienda con un enfoque termoeconómico (ver Figura 3.1), no sólo tiene el objetivo de proponer los escenarios de

viabilidad de esta tecnología. Los manuales y guías de usuario son herramientas de apoyo que sirven para dar difusión y promover la tecnología solar de uso doméstico, por lo que este material de apoyo tiene la finalidad de presentar de manera clara y comprensible para la población en general la información referente al concepto de CSA y CFV, además de enfatizar las características que los identifican, las cualidades y beneficios que provee y sobre todo las ventajas de su utilización con respecto a los medios convencionales tanto de calentamiento de agua (boilers) como de generación eléctrica (red eléctrica).

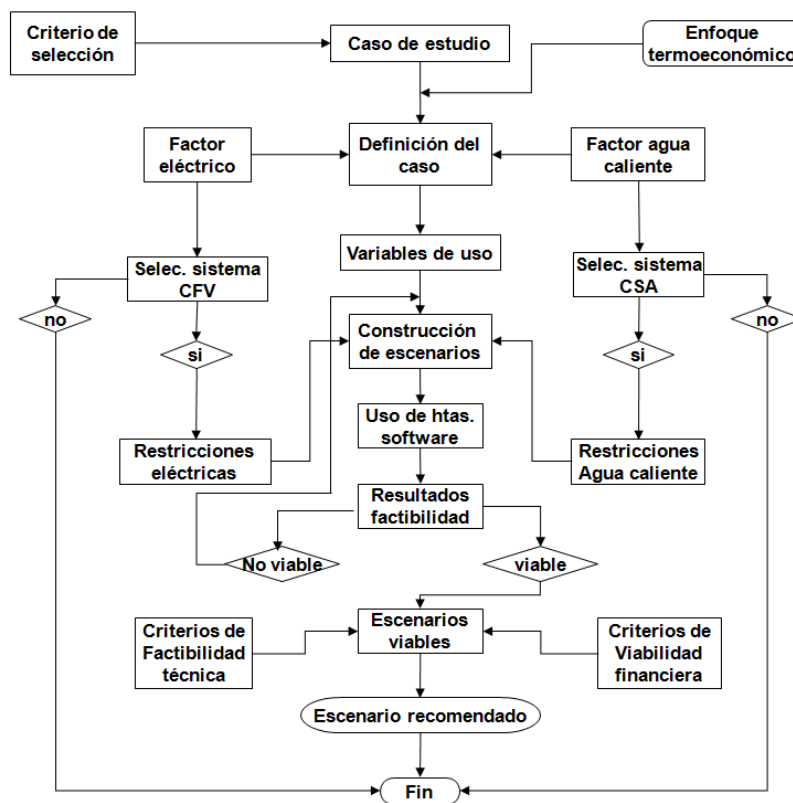


Figura 3.1. Metodología para el análisis del uso de tecnología solar en la vivienda.  
Fuente: Este estudio.

La metodología se describe a continuación siguiendo el esquema mostrado en la Figura 3.1: **Criterio de selección.** El criterio para seleccionar el caso de estudio se basa en las características que definen el tipo de vivienda descrita en este trabajo. Las características de la vivienda como el número de ocupantes, los consumos de agua caliente y electricidad, los ma-

teriales de construcción y servicios públicos y las condiciones ambientales son los principales puntos para incluir o excluir del análisis el caso de una vivienda.

**Caso de estudio.** Se define como la vivienda que se desea analizar mediante la metodología propuesta. Además el resultado para este caso debe ser aplicable para las demás viviendas que compartan similitudes con el caso de análisis, es decir, se generaliza el resultado para la categoría de vivienda señalada.

**Enfoque termoeconómico.** La termoeconomía aplicada al caso de estudio permite establecer los factores que delimitan el caso ya sean factores técnicos, factores económicos o ambientales y a la vez definir la relación entre estos. Permite además plantear tales relaciones en términos medibles y cuantificables útiles para los cálculos necesarios.

**Definición del caso.** El caso se define y delimita en función de los términos relacionados al factor de demanda eléctrica, al factor de demanda de agua caliente y de costos de la demanda, como son consumos promedios mensuales y tarifas por unidad de energía o combustible.

**Factor eléctrico.** Este define parte del caso de estudio ya que establece el consumo y demanda de electricidad en la vivienda, el gasto mensual por este concepto, las tarifas que aplican y las condiciones de uso de energía eléctrica de la vivienda. A partir de este factor se establece la relación con el dimensionamiento del sistema fotovoltaico para generación eléctrica.

**Factor de agua caliente.** Este otro factor que forma parte de la definición del caso de estudio permite establecer la demanda de agua caliente en la vivienda, el gasto mensual por concepto de uso de combustible (gas LP) para calentamiento de agua, el precio del combustible y las condiciones de uso del agua caliente para servicio doméstico. Además este factor

sirve para relacionar el dimensionamiento del calentador solar de agua con respecto a la demanda del recurso y de la relación costo-beneficio.

**Variables de uso.** Estas son la expresión de los factores anteriormente mencionados en términos medibles y cuantificables para su fácil manejo e interpretación en las operaciones de cálculo. Incluye también la temperatura de uso de agua caliente en la vivienda para los diferentes servicios y la porción de demanda eléctrica susceptible de ser cubierta por celdas fotovoltaicas.

**Selección del sistema CFV.** A partir de la diversidad de opciones que ofrece la tecnología solar fotovoltaica se realiza la selección de alternativas. Define también las características técnicas y económicas del equipo fotovoltaico además de basar dichas características en el factor eléctrico correspondiente a la vivienda.

**Selección del sistema CSA.** Analiza las alternativas que ofrece el mercado a partir de las cuales se escogen las que se consideran adecuadas. Se define entonces el tipo de CSA que se requiere en función del factor de agua caliente de la vivienda, las características técnicas y económicas del equipo.

En este punto se decide si el caso se desea modelar con un sistema solar sea fotovoltaico o termosolar, ya sea una decisión del usuario o del analista del caso. Si se opta por no considerar uno de los sistemas este queda fuera del análisis, si se opta por incluir el sistema solar se prosigue con el análisis.

**Restricciones eléctricas.** En este punto se definen las restricciones y limitaciones del equipo fotovoltaico (CFV) dadas sus especificaciones técnicas, se identifican las variables y valores necesarios para estimar su eficiencia, productividad y condiciones de operación como inclinación del equipo y características ambientales del lugar donde se instalará.

**Restricciones de agua caliente.** Se definen las restricciones y limitaciones del equipo termosolar (CSA) dadas sus especificaciones técnicas, se identifican variables y valores necesarios para calcular su eficiencia y productividad, las condiciones de operación y condiciones ambientales en las que operará.

**Construcción de escenarios.** En base a las características del caso de estudio y las propias de los equipos solares elegidos se proponen escenarios varios donde se proponen diferentes condiciones tanto económicas, técnicas y de operación que sean apegadas a la realidad y que sean evidentemente aptas de análisis.

**Herramientas de simulación (software).** Una vez definidos los escenarios para su análisis se utilizan los diferentes paquetes de cómputo seleccionados. Se programan los escenarios en base a las variables definidas para cada herramienta, los valores de consumo dados para cada caso y las restricciones para cada equipo solar.

**Resultados de factibilidad.** Los resultados generados de las herramientas de cómputo para los diferentes escenarios programados se califican en viables y no viables, basando la decisión en los aspectos financieros y relación de costo-beneficio.

**No viable.** Si los resultados de los escenarios programados no son viables entonces se vuelve al paso de construcción de escenarios, se plantean nuevas restricciones y condiciones técnicas, financieras y ambientales.

**Viable.** Al haber resultados de viabilidad se prosigue a agrupar aquellos escenarios viables ordenándolos en base al tiempo de recuperación de la inversión y de los ahorros generados.

**Criterios de factibilidad técnica.** De los escenarios viables se identifican las características técnicas programadas y se estudian sus limitaciones, condiciones de uso y de equipamiento.

**Criterios de viabilidad financiera.** Dados los resultados de los escenarios se identifican las características de costos involucrados, ahorros y beneficios de cada uno para analizar las diferencias.

**Escenarios viables.** Se comparan entre sí las características técnicas y financieras de los diferentes escenarios viables. A partir de la información resultante se toma la decisión de las opciones más adecuadas.

**Escenario recomendado.** De la selección de escenarios adecuados, se toma la decisión de seleccionar cual de las opciones es la que se ajusta mejor a las necesidades energéticas y posibilidades económicas del usuario, considerando la termoeconomía del proyecto, es decir, costos, eficiencia, ahorros y uso adecuado de energía.

**Fin.** El análisis del caso de estudio concluye con la aceptación del escenario propuesto y las características que lo definen para su aplicación generalizada para los casos con condiciones similares.

### **Herramientas de simulación para sistema fotovoltaico (CFV).**

HOMER es un simulador que permite crear arreglos variados para generar electricidad, entre ellos se encuentra la opción para uso de módulos fotovoltaicos. Este programa es facilitado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable, para el análisis de sistemas de generación de electricidad (NREL, 2007).

El simulador HOMER facilita describir los componentes que involucran la instalación de un sistema fotovoltaico de cualquier magnitud, incluyendo el parámetro de conexión a la red eléctrica local. Los componentes como baterías, inversores y módulos fotovoltaicos, deben describirse en capacidad, cantidad, costo, entre otros, para generar todas las combinaciones que arrojen las opciones disponibles con base a lo programado y de estas mismas

alternativas señalar las soluciones óptimas y recomendadas. Es decir, considera la información técnica, financiera, ambiental y del usuario para mostrar las mejores alternativas. Su principal ventaja es su capacidad para generar todas las opciones posibles realizables y seleccionar las mejores alternativas de la lista de opciones.

RETScreen-PV es un software de Análisis de Proyectos de Energía Limpia (Natural Resources Canada) para el apoyo en la toma de decisiones. Fue desarrollado en ambiente Excel y su adquisición es gratuita por lo que cualquier persona interesada en analizar un proyecto que involucre un arreglo fotovoltaico puede acceder esta herramienta.

La versión de RETSCREEN para sistemas fotovoltaicos requiere de información como condición ambiental, capacidad eléctrica de la CFV, características técnicas de la CFV, costos relacionados al arreglo fotovoltaico y para el análisis financiero se consideran los créditos, costos de energía, descuentos, vida del proyecto entre otra información que puede o no incluirse (RetScreen international, 2007).

La ventaja principal de este paquete de cómputo es la relativa simplicidad para manejar la información de entrada, sin embargo, no contempla la demanda total de la vivienda ya que solamente evalúa el desempeño del propio sistema fotovoltaico.

### **Herramientas de simulación para sistema de calentamiento solar de agua (CSA).**

SSCA es una herramienta desarrollada por la CONAE con el propósito de realizar el análisis técnico-financiero del uso de calentadores solares de agua (CSA) para diferentes ciudades de la República Mexicana. El SSCA está programado en Excel (CONAE, 1999) con un diseño sencillo que puede ser utilizado por cualquier persona.

La información que requiere para llevar a cabo los cálculos es mínima ya que sólo requiere del número de usuarios de la vivienda, las características del CSA en cuanto a materiales y la consideración del uso de una fuente convencional como respaldo.

La ventaja de este programa radica en su simplicidad para ser usado y la relevancia de los resultados que genera, ya que a partir de los cálculos llega a la conclusión de “El proyecto es rentable” o “El proyecto no es rentable”. La información adicional que genera está relacionada al área superficial del CSA, la capacidad del contenedor y financieramente muestra el tiempo de recuperación de la inversión.

RETScreen-SWH está programado para el Análisis del Modelo de un Proyecto de Calentador Solar de Agua. Los resultados se basan en la información que se ingresa al programa como características técnicas del CSA, datos ambientales, demanda de agua caliente, costos de equipo y materiales y para el análisis financiero considera los créditos, inflación, descuentos, costos de energía para calentamiento de agua, entre otros, permitiendo detallar el proyecto lo más posible para tomar la decisión adecuada (Retscreen international, 2007).

La cualidad de este paquete de cómputo es el nivel de detalle que se puede manejar para el análisis del proyecto y la presentación de los resultados, los cuales facilitan la toma de decisiones.

### **Herramienta de simulación desarrollada en STELLA.**

STELLA es un paquete de cómputo para investigación y educacional (Isee Systems, 2008), fue desarrollado con la finalidad de analizar situaciones reales o supuestas y observar el comportamiento de estas cuando las condiciones se modifican.

El modelo desarrollado con STELLA durante este estudio utiliza las variables relevantes para determinar la eficiencia y productividad de un módulo fotovoltaico y un calentador

solar de agua. En base al análisis de los paquetes de cómputo HOMER, RETScreen y SSCA, se programó el modelo de STELLA para CSA y CFV, es decir, se incluyeron ambos sistemas solares para su análisis integral para el caso de la vivienda de interés social, obteniendo así escenarios donde se incluyen el sistema CSA y CFV, y escenarios para los que se excluye el CSA o el CFV.

El modelo de simulación está dividido en submodelos para el mejor manejo de la información, estos modelos involucran las características técnicas de los equipos, la proporción de participación del sistema solar y el sistema convencional, el comportamiento de la demanda mensual, los costos de equipos solares y combustibles convencionales, estimado de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas, disponibilidad del recurso solar y el crecimiento del número de viviendas de tipo de interés social.

El presente capítulo se resume en dos partes, la primera que consta de la metodología con un enfoque termoeconómico que relaciona las condiciones y características del caso de estudio con inclusión de tecnología solar, y la segunda parte que consiste en la descripción de herramientas que forman parte fundamental de la propia metodología y del enfoque termoeconómico tales como los paquetes de simulación (HOMER, SSCA, RETScreen, STELLA) los cuales son indispensables para determinar la viabilidad técnica y financiera de los escenarios analizados en los capítulos 5 y 6.

## **Capitulo 4. Trabajo de campo y Trabajo experimental.**

El objetivo principal es describir la metodología aplicada para obtener información y establecer la relevancia sobre los usos finales de la energía eléctrica, los usos del agua caliente, el consumo promedio de electricidad en los aparatos de uso más frecuente y de gas LP para agua caliente. Para lograr lo anterior, fue necesario identificar los elementos que más afectan el consumo energético en la vivienda y también la caracterización de la misma con base en las características correspondientes que permitieran englobar la vivienda de interés social y nivel medio en el presente estudio.

### **Caracterización de la vivienda.**

El mercado de la vivienda en Mexicali, clasifica a esta según el nivel de ingresos que perciben las personas, la superficie de construcción, materiales de construcción, servicios disponibles, entre otras características de las cuales, las que son relevantes en este estudio se muestran en la Figura 4.1.



Figura 4.1. Características que permiten caracterizar la vivienda.  
Fuente: Este estudio.

**Número de ocupantes.** La cantidad de personas que habitan en las viviendas de interés social depende de muchos factores, sin embargo, para este estudio se considera que el promedio de ocupantes por vivienda es de cuatro personas (INEGI, 2005). A partir de este valor promedio la vivienda se caracteriza para establecer los casos de estudio en tres tipos: 1) Casas con menos de cuatro ocupantes, 2) Casas con cuatro ocupantes y 3) Casas con más de cuatro y menos de siete ocupantes.

**Salarios mínimos percibidos.** El costo de la vivienda se puede clasificar en relación al salario mínimo y al intervalo de ingreso mensual. En base a lo anterior se tienen dos categorías (Tabla 4.1), se omite la vivienda de bajos ingresos con valor inferior a los \$210 mil pesos a la que corresponde una percepción mensual de ingresos de menos de \$3,197.00, es decir, menos de dos SMD (Hipotecaria Nacional, 2007).

Tabla 4.1. Clasificación de la vivienda en Mexicali por rango de ingresos.

Fuente: Hipotecaria Nacional, 2007.

SMD	Rango de ingreso mensual	Tipo de vivienda	Distribución %	Nivel de la vivienda
De 5 a 10	De \$7,995 a \$15,987	Menos de \$1 millón	15%	Medio
De 2 a 5	De \$3,198 a \$7,994	Menos de \$500 mil	49%	Int. Social

Las viviendas con un valor mayor a \$1 millón de pesos se omiten debido que su número proporcionalmente no es significativo.

**Materiales de construcción.** Los materiales comúnmente utilizados en la construcción de las viviendas en Mexicali sontecho de concreto normal, muros de bloque de concreto de 12 y 15cm de espesor y material aislante en techo. Estos son los principales componentes en la estructura de la vivienda y los materiales son los que reportan los principales desarrolladores de viviendas en Mexicali (Desarrollos urbanos Mexicali, Homex, 2008). Sin embargo,

observan una resistencia térmica menor a la requerida lo que obliga al uso excesivo de aire acondicionado (Conavi, 2008).

**Superficie construida.** La superficie construida tiene una relación directa con el valor de la vivienda que predomina en la ciudad de Mexicali. Dependiendo del factor superficie se puede clasificar la vivienda cuyo costo se encuentra en el intervalo de \$210 mil a menos de \$1 millón de pesos en tres categorías (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Clasificación por valor de la vivienda.  
Fuente: Hipotecaria Nacional, 2007.

Segmento según valor de vivienda	Precio venta (miles)	Sup. Construida (m <sup>2</sup> )	Precio por m <sup>2</sup>	Nivel de la vivienda
\$210 - \$300 mil	\$228	40	\$5,694	Int. Social
\$300 - \$500 mil	\$349	50	\$6,989	Int. Social
\$500 - \$1 millón	\$682	86	\$7,900	Medio

De estas categorías se observa que el tipo de vivienda predominante, que es la de interés social, se divide en dos categorías de valor de la vivienda. Esto se debe a que las viviendas que están dentro de esta clasificación varían en cuanto a dimensiones de superficie construida (Hipotecaria Nacional, 2007).

**Servicios en la vivienda.** Dado que el tipo de vivienda de análisis se caracteriza por ser esencialmente urbano, se incluyen dentro de la caracterización de la vivienda los servicios básicos como son: servicio de agua potable, servicio de electricidad, servicio de drenaje y en algunos casos gas por tubería.

De las características mencionadas resultan relevantes aquellas que están directamente relacionadas a la implementación de tecnología solar como lo son la disponibilidad de agua por tubería y de gas, en el caso del calentamiento de agua para el que se pretende analizar el uso de CSA, y del suministro de energía eléctrica para el cual se analiza la posibilidad de empleo CFV.

**Número de habitaciones.** El número de cuartos en una vivienda es determinante en factores de demanda y consumo energético. La clasificación de la vivienda se basa en características como : de 2 a 3 recámaras, un área de sala y comedor, cocina separada y en algunos casos uno o dos baños. La cantidad de habitaciones en una vivienda limita la cantidad de ocupantes de esta y a la vez limita el consumo de energía por parte de algunos aparatos y equipos.

**Consumo eléctrico.** En este caso se tiene como objetivo el análisis de casas que cuentan con el servicio eléctrico de red convencional que aplican en la tarifa correspondiente a vivienda cuando el consumo mínimo mensual está por arriba de los 100kWh, para casas con líneas eléctricas de 110V y 220V que cuenten con al menos un televisor, un refrigerador, un radio, un aire acondicionado o enfriador evaporativo (cooler) y que en cada cuarto cuenten con iluminación eléctrica.

**Consumo de agua caliente.** Gran parte de las viviendas en Mexicali, en especial las construidas en años más recientes, cuentan con un sistema de calentamiento de agua ya sea eléctrico o de gas (LP o natural) con una eficiencia de diseño cercana al 70% (Conavi, 2008). Para este caso se caracteriza la vivienda de estudio por la capacidad del boiler; 40 a 60 litros, 70 a 100 litros, y 150 litros. Como se menciona en puntos anteriores existe una relación entre el número de usuarios y el consumo (CINSA, 2008), por ello se relaciona en base al número de personas que habitan una casa y la capacidad recomendada del boiler (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Capacidad del tanque o boiler recomendada por número de usuarios.  
Fuente: CINSA, 2008

Número de Personas	Capacidad Recomendada (litros)
De 2 a 3	40 a 60
De 4 a 5	70 a 100
Más de 5	150 o más

El consumo promedio de agua caliente por habitante a nivel nacional se maneja en 60 litros por día (Comisión Nacional del Agua, 2007), sin embargo, cabe aclarar que no son en su totalidad los litros calentados en el equipo si no más bien la cantidad de litros resultante después de mezclar el agua caliente con agua fría o del uso de agua caliente a temperatura por debajo de la máxima lograda por el calentador. Además el factor ambiental, más aún en una ciudad como Mexicali donde las condiciones extremas prevalecientes varían mes a mes, son determinantes en consumo y uso de energía térmica.

El estudio contempla solamente los usos domésticos indispensables y necesarios del recurso de agua caliente durante los meses invernales cuando el agua caliente se vuelve una necesidad primordial, estos se consideran del mes de noviembre al mes de abril, por lo que la información referente a la utilización de agua caliente en la vivienda se limita a este período y el uso de gas LP se limita a la finalidad de calentar agua. Sin embargo, el aspecto de uso eléctrico se contempla para el periodo completo del año, así que la información referente al consumo eléctrico en la vivienda se contempla para todos los meses. Para fines prácticos no se contempla el consumo eléctrico de aparatos como sistemas de aire acondicionado y refrigerador, es decir, se definen como aparatos de alto consumo eléctrico no susceptibles de ser cubiertos por un CFV. En Mexicali se tiene en promedio un consumo eléctrico anual de aire acondicionado de 4077 kW para viviendas de interés social que no cuentan con aislamiento mientras que para viviendas aisladas el consumo se reduce en 34%, es decir, 2683 kW anuales para aire acondicionado (Conavi, 2008).

Dado todo lo anterior, la parte de monitoreo de viviendas con las características antes mencionadas, se planteó para reafirmar e identificar comportamientos de consumo de energía térmica y eléctrica en viviendas dentro de las clasificaciones indicadas.

Para el monitoreo de utilizaron seis viviendas de interés social con calentador de agua de gas LP (boiler), uno a cuatro ocupantes, al menos un sistema de aire acondicionado (refrigeración), con una y dos recamaras, sala-comedor y cocina, las cuales fueron observadas durante una semana (siete días) para obtener los datos representativos durante los meses de Febrero y Marzo para invierno, y el mes de Julio para verano .

### **Instrumentación para monitoreo.**

Se instrumentó el monitoreo de la vivienda utilizando sensores de iluminación para medir el tiempo que se mantuvo encendida una luz, totalizadores de consumo en kWh conectados a los electrodomésticos de uso cotidiano, un termómetro programable para determinar el tiempo de operación del equipo de refrigeración y para el agua caliente se colocaron termopares dentro del boiler, en el tubo de entrada y salida del boiler, en la chimenea del contenedor y un sensor más en la salida del agua de la regadera, de tal modo que con estos sensores conectados a un procesador de datos programable se pudo determinar el tiempo, la hora y la temperatura de uso del agua caliente, así como la del boiler. La cantidad de gas LP consumido, se estimó colocando una mina de gas LP independiente para el boiler que fue pesada al colocarse y nuevamente al ser retirada, midiendo con una balanza digital la cantidad de gas LP consumido durante el periodo de tiempo del monitoreo.

Para determinar la cantidad de agua caliente utilizada se colocó un totalizador de flujo en la entrada del agua fría del boiler de manera tal que al final del periodo de monitoreo se obtuvo el total de agua caliente utilizada y por ende se estimó la cantidad promedio utilizada en base a la cantidad de ocasiones que se encendió el boiler o los cambios registrados en los sensores de temperatura (Figura 4.2).

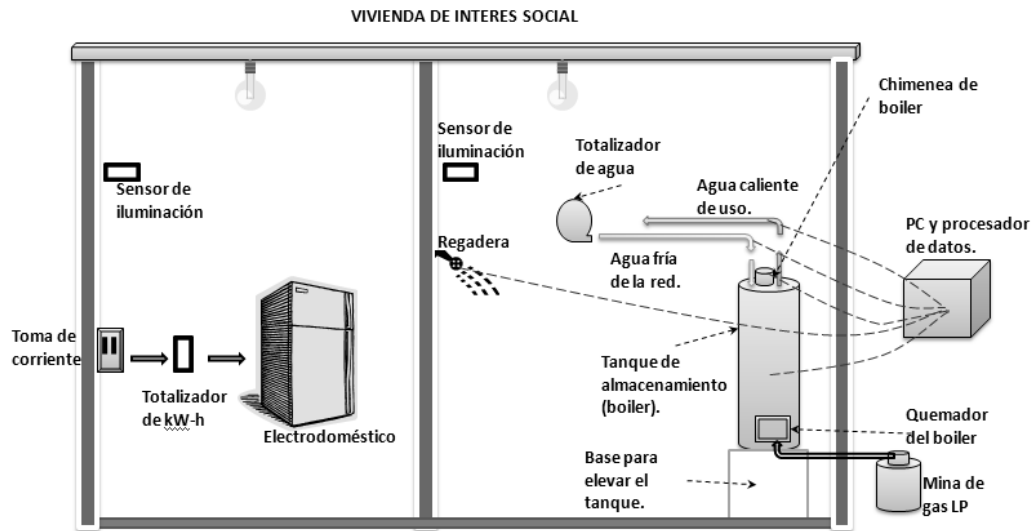


Figura 4.2. Instrumentación para monitoreo de la vivienda.

Fuente: Este estudio.

La caracterización de la vivienda, la identificación de los elementos determinantes para el consumo energético en la misma, el comportamiento del consumo y la demanda mínima en la vivienda de tipo interés social y de nivel medio son los puntos principales que en este capítulo se han descrito con el objetivo de fundamentar la información empleada en el modelado de escenarios de análisis en el Capítulo 6, alimentando con dichos datos cada una de las herramientas de simulación. El trabajo de monitoreo permitió establecer que el uso de agua caliente es intermitente presentando mayor empleo durante la mañana y noche correspondiente a las horas previas de horario de trabajo y escuela, y posteriores a estas. Se observó que la capacidad del boiler en este tipo de viviendas es de 60 y 100 litros, la temperatura promedio de uso principalmente en regadera se estimó entre 35 y 40°C, se estimó un consumo promedio de 3 kg de gas LP por persona al mes, lo anterior dado que el boiler se enciende en el momento que se requiere el agua caliente, es decir, no se deja encendido el piloto del boiler. En cuanto al uso de energía eléctrica se estimó un consumo mínimo de electricidad en el mes de febrero en 180 kWh, mientras que el mínimo en verano para el

mes de agosto corresponde a 1200 kWh, siendo este último el mes de mayor demanda eléctrica (CDEM, 2003).

Para estimar la eficiencia del calentador de agua utilizado en las viviendas monitoreadas, se utilizó la ecuación 12:

$$Eff = (E/PC)/C_{gas} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

$C_{gas}$  = es la cantidad de gas consumida.

E = consumo promedio de energía en la vivienda para calentamiento de agua.

PC = poder calorífico del combustible.

Eff = eficiencia del calentador de agua.

A partir de los datos analizados de las viviendas monitoreadas se obtuvo un promedio de la eficiencia del calentador de agua de 60%, es decir, una eficiencia intermedia respecto a los valores de CONAVI donde la eficiencia de un calentador nuevo es de aproximadamente 74% y para uno promedio es de 50% (Conavi, 2008).

### **Trabajo experimental.**

El objetivo fundamental de este paso es observar el comportamiento, funcionamiento y operación de los sistemas CSA y CFV trabajando en condiciones ambientales normales y típicas de la ciudad de Mexicali. Es decir, no se pretende validar la eficiencia del equipo, solamente observar el comportamiento del sistema en función de las variables de radiación solar disponible y ambientales. A partir de las observaciones generadas se establecen consideraciones adicionales referentes a situaciones que el usuario puede afrontar para instalar y operar el equipo CSA o CFV, como lo son algunos costos adicionales de instalación para el arreglo del sistema híbrido (boiler/CSA y red/CFV).

La etapa de experimentación consistió en la instalación de un calentador solar de agua y un módulo fotovoltaico sobre un techo, con ellos se realizaron pruebas de operación y eficiencia bajo condiciones ambientales normales. Las pruebas y las variables se consideraron a partir del proyecto de norma para colectores solares para calentamiento de agua (PROY-NMX-ES-001-NORMEX-2005).

El calentador solar de agua utilizado fue el modelo SKYLINE de la marca ACR SOLAR. El panel del CSA es de aluminio con un espesor de 1.37mm, con un material aislante (CELOTEX) de 2.54cm de espesor, el material absorbente de cobre, tuberías de cobre de 12.7mm (1/2in) de diámetro exterior, con cubiertas de doble pared de policarbonato de 6mm.

Las dimensiones del CSA son de 3.67m de longitud, 0.51m de ancho y 0.076m de peralte, el peso aproximado es de 17.24 kg, el área de superficie es de 1.71 m<sup>2</sup> y la capacidad de volumen de agua es de 1.135 litros. El flujo recomendado para el sistema es de 0.946 a 1.324 litros por minuto (lpm), mientras que la máxima presión de trabajo es de 10.21 atm (150 PSI), la máxima temperatura es de 121.11°C (250°F), y el fluido para transferencia de calor es agua potable. Se recomienda para este sistema un contenedor de 189.27 litros (50 galones).

El sistema de CSA cuenta con un sistema de circulación de agua por bombeo, la bomba de agua es de 12 Volts (corriente directa) cuya fuente de energía es una celda fotovoltaica que es el mismo módulo fotovoltaico de análisis (ACR International Corp.).

El módulo fotovoltaico modelo MSX-5 de SOLAREX está diseñado para operar con cargas bajas y moderadas en corriente directa. El módulo pesa aproximadamente 0.77 kg, mide 245mm X 235mm, y sus características eléctricas son: potencia máxima (Pmax) 4.5W, Voltaje @ Pmax (Vmp) 16.8 V, Corriente @ Pmax (Imp) 0.27 A, mínimo garantizado Pmax 4

W, corriente de corto circuito(Isc) 0.29 A, voltaje de circuito abierto (Voc) 20.6 V, temperatura de coeficiente de Voc-  $(80\pm 10)\text{mV}/^\circ\text{C}$ , temperatura del coeficiente de Isc  $(0.065\pm 0.015)\%/^\circ\text{C}$ , temperatura del coeficiente de potencia -  $(0.5\pm 0.05)\%/^\circ\text{C}$  y la temperatura nominal de operación de la celda (NOCT)  $47\pm 2^\circ\text{C}$  (SOLAREX, 1998).

El contenedor de agua empleado para mantener el agua caliente es un boiler de la marca CINSA, modelo C-302, el cual tiene una presión máxima de trabajo de 0.63MPa ( $6.5\text{ kg/cm}^2$ ) con capacidad para 106 litros y una carga térmica de 4.5 kW. El funcionamiento del sistema se describe en la Figura 4.3.

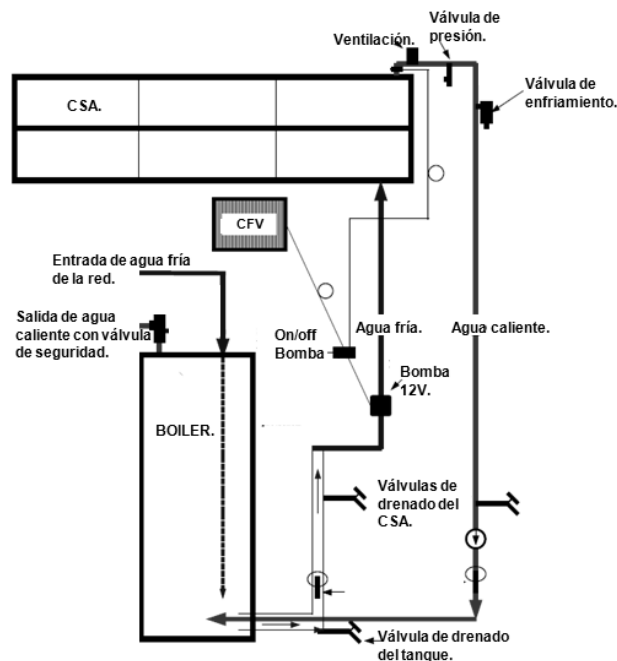


Figura 4.3. Diagrama de funcionamiento de los sistemas de prueba CSA, CFV y contenedor.  
Fuente: ACR internacional, manual de instalación para modelo fireball-2001.

Durante las pruebas experimentales para observar al funcionamiento del sistema CSA se observó que para una temperatura promedio de  $18^\circ\text{C}$  en el medio ambiente con una temperatura promedio del fluido  $22^\circ\text{C}$  durante la mañana de 9 a 11 horas, el fluido incrementó su temperatura en la primer línea del colector en promedio  $15^\circ\text{C}$ , en la segunda línea de la tubería del colector el incremento de temperatura fue en promedio de  $11^\circ\text{C}$  respecto a la pri-

mera línea de la tubería, en la tercera línea del colector el incremento de temperatura en promedio fue de 9°C respecto a la segunda y en la última línea de tubería del colector se midió un incremento promedio de 6°C respecto a la tercera. En promedio se midió un flujo del fluido en ese horario de 0.65 lpm, por debajo de las especificaciones debido a pérdidas de presión en el sistema. Como resultado se obtuvo una temperatura de salida en promedio de 62°C del sistema CSA. La temperatura mínima en promedio fue de 54°C para temperatura del fluido de entrada de 16°C y temperatura ambiente de 14°C, y una temperatura máxima de salida de 72°C para un flujo promedio de 0.78 lpm, una temperatura ambiente de 24°C y una temperatura de fluido de entrada de 19°C, resultado que corresponde al horario entre 13:00 y 15:00 horas ya que a partir de las 16:00 horas el sistema de bombeo baja de manera considerable y la radiación solar incide sobre el colector de manera inadecuada (obstrucciones de sombras) durante los meses de invierno.

La temperatura mínima de salida en promedio fue de 43°C para una temperatura ambiente de 15°C, una temperatura del fluido de 18°C, un flujo de 0.57 lpm. Esto último corresponde las primeras horas de funcionamiento del sistema horario que comprende de 7:00 a 9:00 horas.

El proceso de monitoreo en las viviendas tuvo la finalidad de verificar los consumos de energía térmica para calentamiento de agua y eléctrica en la vivienda de interés social, tomando en cuenta que el calentamiento de agua es intermitente dependiendo de los usos y costumbres de los usuarios. Se determinó un consumo mínimo en invierno de 180 kWh mensual y en verano un consumo mínimo de 1200 kWh para el mes de mayor demanda (CDEM, 2003). Respecto a la parte experimental con los sistemas CSA y CFV se concluyó que la temperatura de salida se encuentra entre 40°C y 60°C que es el rango en que el agua

caliente es útil en la vivienda, considerando que el funcionamiento del sistema varía en base a las condiciones ambientales y la configuración de la instalación.

## **Capitulo 5. Trabajo de simulación.**

Los escenarios propuestos para ser analizados se definen como aquellos casos dentro de los cuales es posible adaptar la información a los casos reales, es decir, el escenario presentado trata de reflejar la realidad actual de uso y demanda energética. Las características que hacen diferenciar a un escenario de otro varían según la información requerida en cada uno de los paquetes de cómputo utilizados para realizar los análisis y también dadas las variables de interés. La información mínima requerida es:

**Demanda promedio.** Esta característica se define en base a un intervalo de consumo energético que abarca las diferentes demandas para los tipos de vivienda contemplados en la caracterización de estas.

**Características del equipo solar.** Estas se definen en cuanto a los aspectos técnicos de los equipos que son relevantes para su eficiencia y desempeño, así como los componentes y condiciones necesarios para su adecuación en la estructura de la vivienda.

**Costos del sistema propuesto.** Estas características incluyen el costo referente al equipo solar, materiales requeridos, partes y accesorios, modificaciones de la vivienda y gastos de operación y mantenimiento.

**Recurso solar disponible.** La disponibilidad de energía solar es una característica fundamental para llevar a cabo el análisis, pues en base a este recurso se estima la productividad y desempeño esperado del equipo y su comportamiento a través del tiempo.

**Condiciones ambientales.** Esta es una característica que limita en ciertos aspectos el funcionamiento del equipo solar. El factor ambiental es determinante en cuanto al aprovechamiento del recurso solar y en cuanto al desgaste del equipo solar expuesto a la intemperie.

**Costo de energía convencional.** Para lograr establecer conclusiones de índole económico se requiere realizar el análisis que permita comparar el costo de utilizar un equipo solar contra el costo de seguir utilizando la energía convencional, por ende se incluye el análisis

de costo de la energía convencional versus costo de energía renovable y sus cambios a través del tiempo.

A partir de las variables involucradas en cada una de las características anteriores y de la información disponible para programar cada escenario en cada uno de los paquetes de cómputo, se obtienen los resultados del análisis técnico y financiero. Dado que se obtienen varios resultados dependiendo de la herramienta en que se programa el escenario, se obtiene información en términos que deben ser interpretados para llegar a una conclusión además de la inclusión de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, aspecto relevante y fundamental en la toma integral de decisiones.

Para el análisis comparativo se programan los escenarios con las diferentes herramientas de cómputo, alimentando la información base de cada escenario en cada paquete de cómputo utilizado. De tal manera que el porcentaje de variación entre los resultados para un mismo escenario de un análisis realizado en un software diferente sea el menor posible y por ende poder comparar los resultados y validar la conclusión en base a los datos obtenidos.

### **Simulación térmica.**

Como se ha mencionado, las herramientas de simulación para sistemas de calentamiento solar de agua son el SSCA, RETScreen-SWH y el Modelo de simulación de STELLA. En seguida se describen los escenarios planteados en cada una de las herramientas.

**SSCA.** Esta herramienta de simulación es bastante simple y realiza consideraciones en varios aspectos, por lo tanto se maneja un mínimo de información de entrada.

En la Tabla 5.1 se muestra la información de entrada para el simulador SSCA en el análisis Técnico-Financiero del escenario propuesto.

Tabla 5.1. Consideraciones realizadas por el SSCA.  
Fuente. Este estudio.

Información de entrada	
Mes utilizado para dimensionar el equipo:	Junio
Radiación en la superficie horizontal:	26.20MJ/ m <sup>2</sup>
Radiación proyectada en el colector:	27.05MJ/ m <sup>2</sup>
Tasa real de descuento:	8.00% anual
Interés:	30.00% anual
Costo de mantenimiento cada 5 años:	\$800.00
Precio de gas LP:	\$3.45
Radiación en la superficie:	26.20MJ/ m <sup>2</sup>
Radiación proyectada:	27.05MJ/ m <sup>2</sup>
Vida útil del equipo:	20 años
Tiempo de financiamiento:	4 años
Costo de CSA por m <sup>2</sup> :	\$2,783

Cabe destacar que parte de la información alimentada es predefinida por el simulador, así el mes utilizado para dimensionar el equipo no coincide con los meses en los cuales se presenta la demanda de agua caliente y además se considera por ende que la demanda de agua caliente se presenta en todos los meses del año, siendo que en el caso de Mexicali la demanda se presenta en la temporada invernal.

En cuanto a los escenarios programados en el simulador, se tiene la Tabla 5.2 donde se muestran los valores utilizados como datos de entrada. En el caso del número de usuarios y material del absorbente se consideran los factores con mayor influencia en cuanto al dimensionamiento del equipo se refiere. Como se observa en la Tabla 5.2 los escenarios se programaron variando en primer plano el número de usuarios a considerar para el análisis, de manera que los escenarios 1, 2 y 3 representan el promedio de ocupantes en la vivienda. En los escenarios 4, 5 y 6 se representan las situaciones en las que las personas en una vivienda son dos. Y en los escenarios 7, 8 y 9 se plantean aquellos casos en que en una vivienda habitan seis personas. El material de la placa absorbente es importante en la medida que

aprovecha la energía solar, por ello es relevante analizar los materiales usados como absorbentes en los CSA.

Tabla 5.2. Datos de entrada relevantes en el dimensionamiento del CSA.  
Fuente: Este estudio.

Datos de entrada.	# de usuarios	Material absorbente	Espesor de placa
Escenario 1	4	Cobre	0.001m
Escenario 2	4	Aluminio	0.001m
Escenario 3	4	Fierro	0.001m
Escenario 4	2	Cobre	0.001m
Escenario 5	2	Aluminio	0.001m
Escenario 6	2	Fierro	0.001m
Escenario 7	6	Cobre	0.001m
Escenario 8	6	Aluminio	0.001m
Escenario 9	6	Fierro	0.001m

La información que no resulta tan relevante en cuanto al dimensionamiento del equipo, ya que se consideran características promedio que tienen la mayoría de los CSA, se programaron idénticas para los nueve escenarios de análisis como se ve en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Datos de entrada complementarios para CSA.  
Fuente: Este estudio.

Datos de entrada.	Acabado de placa	Material aislante	Espesor del aislante
Escenario 1	negro mate	fibra de vidrio	0.0635m
Escenario 2	negro mate	fibra de vidrio	0.0635m
Escenario 3	negro mate	fibra de vidrio	0.0635m
Escenario 4	negro mate	fibra de vidrio	0.0635m
Escenario 5	negro mate	fibra de vidrio	0.0635m
Escenario 6	negro mate	fibra de vidrio	0.0635m
Escenario 7	negro mate	fibra de vidrio	0.0635m
Escenario 8	negro mate	fibra de vidrio	0.0635m
Escenario 9	negro mate	fibra de vidrio	0.0635m

RETScreen-SWH. Esta herramienta de simulación cubre más a detalle los aspectos referentes a la información que se utiliza para alimentar el programa. Los campos en los que se divide la alimentación de información son el modelo de energía, el recurso solar disponible,

el análisis de costos, de emisiones y el financiero. Con el fin de obtener resultados que permitan hacer un análisis comparativo, se plantean los valores de la Tabla 5.4 como constantes en todos los escenarios.

Tabla 5.4. Recurso solar, condiciones ambientales y uso de agua caliente mensuales.  
Fuente: Atmospheric science data center, NASA.

Rec. Solar	Fracción de uso (0-1)	Radiación prom. kWh/m <sup>2</sup> /d	Temp. prom. °C	Humedad relativa prom. %	Vel. viento prom. m/s
Enero	1	3.25	11.9	45.2	3.9
Febrero	1	4.09	13.3	42.6	3.8
Marzo	1	5.35	16.5	35.4	3.9
Abril	0.7	6.45	20.1	29.4	3.8
Mayo	0	7.44	24.2	27.4	4.1
Junio	0	7.74	27.5	25.2	4.1
Julio	0	7.04	31.1	26.6	3.5
Agosto	0	6.18	30.8	33.4	3.2
Septiembre	0	5.33	27.7	35.1	3.4
Octubre	0.5	4.41	22.4	33.9	3.4
Noviembre	1	3.52	15.8	36.3	3.8
Diciembre	1	2.98	11.6	43.5	3.8

Otra consideración que no varían en los cuatro escenarios es el de emisiones, ya que se contemplan las mismas condiciones como se muestra en la Tabla 5.5. Este compara el caso base (energía convencional) contra la alternativa (solar).

Tabla 5.5. Consideraciones para los cuatro escenarios.  
Fuente: Este estudio.

Análisis de emisiones.	
Tipo de combustible:	Solar
Mezcla de combustible (%)	100
Pérdidas (%)	8
Consideraciones.	
Tiempo de vida del proyecto:	25 años
Agua caliente por usuario (litros):	60
Tasa de incremento precio gas LP:	5.00%

Se programaron cuatro escenarios que presentan diferencias en cada uno de los campos de programación ya mencionados y que suponen las posibles situaciones contempladas como probables. El campo de modelo de energía se programó como muestra la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Escenarios programados en el campo de modelo de energía.  
Fuente: Este estudio.

Modelo de energía.	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Combustible de calentamiento:	gas LP	gas LP	gas LP	gas LP
Tipo de colector:	con cubierta	con cubierta	con cubierta	con cubierta
Fabricante del colector:	ACR	ACR	ACR	ACR
Modelo de colector:	Fireball 2001	Fireball 2001	Fireball 2001	Fireball 2001
Área del colector:	1.87 m <sup>2</sup>	1.87 m <sup>2</sup>	1.87 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>
Número de colectores:	1	2	1	1
Capacidad de almacenamiento:	155 litros	155 litros	172 litros	60 litros
Potencia de bombeo:	5 W/m <sup>2</sup>	5 W/m <sup>2</sup>	3 W/m <sup>2</sup>	3 W/m <sup>2</sup>

El análisis de costos es fundamental para determinar la factibilidad financiera del proyecto planteado en el escenario, por ende se proponen una serie de condiciones en cada escenario que permitan identificar las posibilidades de viabilidad en cada uno. La información ali-mentada en este campo se muestra en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Escenarios planteados en el campo de análisis de costos.  
Fuente: Este estudio.

Análisis de costos.	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Costo de CSA:	\$7,480.00	\$7,480.00	\$3,740.00	\$2,000.00
Costo de tubería:	\$102.00	\$102.00	\$102.00	\$0.00
Costo de bombeo:	\$0.00	\$0.00	\$538.00	\$0.00
Costo base de soporte:	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Plomería:	\$300.00	\$300.00	\$300.00	\$0.00
Instalación del CSA:	\$19.00	\$19.00	\$19.00	\$0.00
Instalación de aislante:	\$34.00	\$34.00	\$34.00	\$0.00
Instalación de equipamiento:	\$50.00	\$50.00	\$50.00	\$0.00
Contingencias:	\$798.00	\$798.00	\$478.00	\$200.00
Costo anual (créditos):	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Costo periódico:	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00

Finalmente el análisis financiero se programó considerando dos factores determinantes o de mayor relevancia que son el precio de gas LP y los incentivos económicos que pueden o no aplicar. Cada uno de los cuatro escenarios se planteó de manera distinta para identificar la influencia de estos factores en los resultados, la información correspondiente se muestra en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Escenarios propuestos en el campo de análisis financiero.  
Fuente: Este estudio.

Análisis financiero.	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Precio gas LP:	\$6.50	\$5.00	\$5.00	\$3.45
Incentivos:	\$500.00	\$500.00	\$0.00	\$0.00

**STELLA-CSA.** El modelo de simulación desarrollado para el análisis de sistemas CSA (Anexo 6) presupone un tiempo de vida útil del sistema de 25 años y consta de varios campos para alimentar la información en el modelo, en el primero de ellos se plantean los costos y dimensiones de los sistemas correspondientes a cada escenario como se describe en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Costos del sistema CSA para los escenarios analizados.  
Fuente: Este estudio.

	Costo CSA \$/m <sup>2</sup>	Área CSA m <sup>2</sup>
Escenario1	\$2,000.00	2
Escenario2	\$2,000.00	2
Escenario3	\$4,000.00	2
Escenario4	\$4,000.00	2

Factores como el precio de gas LP, el número de usuarios en la vivienda y la demanda de agua caliente son relevantes para determinar la viabilidad del escenario, por ello se plantean diferentes escenarios en la Tabla 5.10, además se supone un consumo promedio de gas LP por persona y no se considera ningún apoyo económico o subsidio.

Tabla 5.10. Datos de demanda y de gas LP para los escenarios de CSA en STELLA.  
Fuente: Este estudio.

	Precio gas LP \$/kg	gas LP/mes/per Kg	Subsidios \$	Usuarios	Consumo litro/mes/per
Escenario1	\$7.50	4	\$0.00	4	900
Escenario2	\$7.50	4	\$0.00	2	900
Escenario3	\$7.50	4	\$0.00	4	900
Escenario4	\$5.00	4	\$0.00	4	1350

Se supone una capacidad del calentador solar de agua de 52.6 litros/m<sup>2</sup>/día, con lo que se estima un volumen de 105 litros/día (lpd) a una temperatura de 60°C para un CSA de dos metros cuadrados de área de apertura.

### **Simulación fotovoltaica.**

El análisis de los sistemas fotovoltaicos (CFV) es más complejo que el del sistema de calentamiento solar de agua (CSA), debido principalmente a que implica la consideración de equipo adicional como baterías, inversores, controles, que dependiendo del tipo de arreglo que se plantea varían en cantidad y en capacidad. Los simuladores en este caso para CFV son HOMER, RETScreen-PV y el Modelo de simulación de STELLA.

**HOMER.** La alimentación de información en esta herramienta es bastante detallada, ya que analiza el proyecto mediante la simulación iterativa de soluciones probables y óptimas, permite plantear la alternativa de un sistema híbrido y por ende las implicaciones relacionadas.

En este simulador en particular se maneja la unidad monetaria en dólares americanos (USD), se presupone un valor de \$10.00 pesos por cada dólar (USD). Sin embargo, en el resto de los simuladores la unidad monetaria utilizada corresponde en pesos.

En este estudio se plantean ocho escenarios de análisis para los que el sistema fotovoltaico se supone con conexión a la red (híbrido). Se realizan las consideraciones de la Tabla 5.11 para cada uno de los escenarios propuestos.

Tabla 5.11. Consideraciones para los escenarios propuestos.  
Fuente: Este estudio.

Consideraciones para el análisis.	
Vida útil del CFV:	25 años
Conexión de red:	siempre
Ajuste de CFV:	fijo
Vida útil de baterías:	6 años
Vida útil de convertidor:	15 años

En la Tabla 5.12 se describe la información referente a radiación disponible y el índice de claridad mensual aplicada a los escenarios planteados.

Tabla 5.12. Índice de claridad y radiación disponible mensual.  
Fuente: Atmospheric science data center, NASA, 2008.

Rec. solar		
Mes	Índice de claridad	Radiación diaria kWh/m <sup>2</sup> /d
Enero	0.625	3.494
Febrero	0.638	4.377
Marzo	0.671	5.74
Abril	0.683	6.917
Mayo	0.694	7.709
Junio	0.691	7.927
Julio	0.669	7.537
Agosto	0.669	6.997
Septiembre	0.684	6.198
Octubre	0.683	5.014
Noviembre	0.665	3.899
Diciembre	0.615	3.189

Además de las consideraciones anteriores, se utiliza la información de la demanda para todos los escenarios describiendo el comportamiento de esta en demanda horaria mensual (Tabla 5.13).

Tabla 5.13. Demanda mínima horaria mensual.  
Fuente: Este estudio.

Demanda mínima horaria por mes en la vivienda (kWh) Enero-Junio													
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
00	0.2	0.2	0.2	0.2	0.43	0.8	12	0.32	0.32	0.32	0.32	0.57	1.11
01	0.2	0.2	0.2	0.2	0.43	0.8	13	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	1.5
02	0.2	0.2	0.2	0.2	0.44	0.87	14	0.38	0.38	0.38	0.38	0.65	1.5
03	0.2	0.2	0.2	0.2	0.44	0.8	15	0.35	0.35	0.35	0.35	0.6	1.3
04	0.32	0.32	0.32	0.32	0.45	0.85	16	0.33	0.33	0.33	0.33	0.58	1.3
05	0.34	0.34	0.34	0.34	0.45	0.9	17	0.32	0.32	0.32	0.32	0.58	1.2
06	0.36	0.36	0.36	0.36	0.46	0.95	18	0.32	0.32	0.32	0.32	0.57	1.11
07	0.4	0.4	0.4	0.4	0.46	0.95	19	0.32	0.32	0.32	0.32	0.57	1.11
08	0.34	0.34	0.34	0.34	0.47	0.95	20	0.32	0.32	0.32	0.32	0.57	1.11
09	0.32	0.32	0.32	0.32	0.5	0.97	21	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	1.11
10	0.32	0.32	0.32	0.32	0.53	0.98	22	0.2	0.2	0.2	0.2	0.47	1.11
11	0.32	0.32	0.32	0.32	0.57	1.11	23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.47	0.99
Demanda mínima horaria por mes en la vivienda (kWh) Julio-Diciembre													
Hora	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Hora	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
00	1	1.32	0.3	0.39	0.39	0.2	12	1.39	1	0.54	0.3	0.3	0.29
01	1	1.32	0.3	0.39	0.39	0.2	13	1.5	1	0.67	0.3	0.3	0.3
02	1	1.32	0.3	0.39	0.39	0.2	14	1.5	1	0.65	0.3	0.3	0.3
03	1	1.32	0.3	0.39	0.39	0.2	15	1.45	1	0.67	0.3	0.3	0.35
04	1	1.32	0.45	0.39	0.39	0.2	16	1.47	1	0.6	0.45	0.45	0.3
05	1	1.32	0.46	0.39	0.39	0.2	17	1.48	1	0.64	0.46	0.46	0.29
06	1.1	1.32	0.45	0.39	0.39	0.25	18	1.5	1.1	0.6	0.45	0.45	0.29
07	1.1	1.32	0.5	0.39	0.39	0.25	19	1.4	1.1	0.54	0.5	0.5	0.29
08	1.1	1.32	0.53	0.39	0.39	0.25	20	1.39	1.1	0.54	0.53	0.53	0.29
09	1.1	1.32	0.54	0.39	0.39	0.25	21	1.39	1.1	0.5	0.54	0.54	0.3
10	1.39	1.32	0.54	0.39	0.39	0.29	22	1.2	1.39	0.49	0.54	0.54	0.3
11	1.39	1.32	0.54	0.39	0.39	0.29	23	1.1	1.39	0.39	0.54	0.54	0.25

La información que varía entre escenarios se agrupa en los campos de información del CFV, información de baterías, información de convertidor y la información de red. La Tabla 5.14 muestra los datos ingresados en el campo de información del CFV.

Tabla 5.14. Información de escenarios en el campo de CFV (costos en USD).

Fuente: Este estudio

Info. de entrada CFV.	Capacidad(kW)	Costo (USD)	Capacidades a considerar(kW)	Corriente salida
Escenario 1	0.22	1,540.00	0.22	CA
Escenario 2	0.22	1,540.00	0.22	CA
Escenario 3	0.22	1,540.00	0.22	CD
Escenario 4	0.1	700.00	0.100,0.220	CD
	0.22	1,540.00		
Escenario 5	0.1	700.00	0.00,0.100	CD
Escenario 6	0.1	500.00	0.00,0.100	CD
Escenario 7	0.1	500.00	0.00,0.100,0.15,0.20	CD
	0.15	750.00		
	0.2	1,000.00		
Escenario 8	0.1	500.00	0.00,0.100,0.15,0.20	CD
	0.15	750.00		
	0.2	1,000.00		

La información de baterías que se utilizó para alimentar cada uno de los escenarios planteados para análisis se detalla en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Información de baterías para cada escenario en HOMER (costos en USD).

Fuente: Este estudio

Información de entrada Batería.	Cantidad	Costo (USD)	Cantidad a considerar	Tipo de batería
Escenario 1	1	500.00	0,1,2,3,6	Trojan L16P
	2	1,000.00		
	3	1,500.00		
Escenario 2	1	500.00	0,1,2,3,6	Trojan L16P
	2	1,000.00		
	3	1,500.00		
Escenario 3	1	500.00	0,1,2,3,6	Trojan L16P
	2	1,000.00		
	3	1,500.00		
Escenario 4	1	500.00	0,1,2,3,6	Trojan L16P
	2	1,000.00		
	3	1,500.00		
Escenario 5	1	500.00	0,1,2,3,6	Trojan L16P
	2	1,000.00		

Tabla 5.15. Información de baterías para cada escenario en HOMER (costos en USD) (Cont.).  
Fuente: Este estudio

Escenario 6	1	400.00	0,1,2,3,6	Trojan L16P
	2	800.00		
Escenario 7	1	400.00	0,1,2,3,6	Trojan L16P
	2	800.00		
Escenario 8	1	400.00	0,1,2,3,6	Trojan L16P
	2	800.00		

El convertidor es una parte fundamental en el arreglo del sistema CFV, debido a ello se contemplan en cada uno de los escenarios como se indica en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Información del convertidor para cada escenario en HOMER (costos en USD).  
Fuente: Este estudio

Información de entrada de Convertidor.	Capacidad(kW)	Costo (USD)	Capacidad a considerar(kW)
Escenario 1	0.1	800.00	0.0,0.1,0.220
	0.22	1,600.00	
Escenario 2	0.1	800.00	0.0,0.1,0.220
	0.22	1,600.00	
Escenario 3	0.1	800.00	0.0,0.1,0.220
	0.22	1,600.00	
Escenario 4	0.1	800.00	0.0,0.1,0.220
	0.22	1,600.00	
Escenario 5	0.1	800.00	0.00,0.07,0.10,0.20
	0.22	1,600.00	
Escenario 6	0.1	600.00	0.00,0.07,0.10,0.20
	0.2	1,100.00	
Escenario 7	0.1	600.00	0.00,0.10,0.20
	0.2	1,100.00	
Escenario 8	0.1	600.00	0.00,0.10,0.20
	0.2	1,100.00	

Debido a que se considera que el CFV cuenta con conexión a la red principal de energía y que existe un intercambio de energía en ambos sentidos (compra-venta) se deben indicar las condiciones en que se lleva a cabo, por ello se muestra en la Tabla 5.17 las tarifas conside-

radas para cada uno de los escenarios tanto para la operación de compra como la de venta de energía, donde esta última implica que el usuario vende energía generada por el CFV a la red principal.

Tabla 5.17. Tarifas (moneda en USD) aplicadas a los diferentes escenarios analizados.  
Fuente: Este estudio.

Info. de red	Tarifa1 (USD/kWh)	Tarifa2 (USD/kWh)	Tarifa3 (USD/kWh)	venta1 USD	venta2 USD	venta3 USD
Escenario 1	\$0.150	Na	Na	\$0.050	Na	Na
Escenario 2	\$0.150	\$0.076	\$0.060	\$0.050	\$0.050	\$0.050
Escenario 3	\$0.150	\$0.076	\$0.060	\$0.050	\$0.050	\$0.050
Escenario 4	\$0.150	\$0.076	\$0.060	\$0.050	\$0.050	\$0.050
Escenario 5	\$0.110	Na	Na	\$0.050	Na	Na
Escenario 6	\$0.110	Na	Na	\$0.080	Na	Na
Escenario 7	\$0.180	Na	Na	\$0.100	Na	Na
Escenario 8	\$0.250	\$0.100	Na	\$0.100	\$0.070	Na

**RETScreen-PV.** La descripción de la información de entrada para el análisis de sistemas fotovoltaicos (CFV) es detallada hasta el punto que se considere necesario. Este simulador permite detallar el escenario con la información que se tiene disponible ya que entre más información se tenga el análisis será más preciso.

Los campos en los que la información es alimentada corresponden a modelo de energía, costos, recurso solar, de emisiones y financiero, aunque también se tienen las consideraciones como se describen en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18. Consideraciones para escenarios de RETScreen-PV.  
Fuente: Este estudio.

Consideraciones para el análisis.	
Sistema seguimiento CFV:	fijo
Ángulo de inclinación:	45°

El campo de recurso solar se resume en la Tabla 5.19 en términos de radiación solar y temperatura promedio.

Tabla 5.19. Condiciones ambientales para escenarios planteados.  
Fuente: Atmospheric science data center, NASA.

Rec. Solar Mes	Fracción de uso. (0-1)	Radiación prom. (kWh/m <sup>2</sup> /d)	Temp. Promedio (°C)
Enero	1	3.25	11.9
Febrero	1	4.09	13.3
Marzo	1	5.35	16.5
Abril	1	6.45	20.1
Mayo	1	7.44	24.2
Junio	1	7.74	27.5
Julio	1	7.04	31.1
Agosto	1	6.18	30.8
Septiembre	1	5.33	27.7
Octubre	1	4.41	22.4
Noviembre	1	3.52	15.8
Diciembre	1	2.98	11.6

La información de entrada correspondiente al modelo de energía planteado para cada uno de los seis escenarios de análisis contemplados para esta herramienta de simulación se muestran en la Tabla 5.20.

Tabla 5.20. Datos de modelo de energía para escenarios propuestos.  
Fuente: Este estudio

Modelo de energía.	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario4	Escenario5	Escenario6
Tipo de arreglo:	solar-red	solar-red	solar-red	solar-red	solar-red	solar-red
Absorción CFV:	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Tipo de módulo CFV:	mono-si	mono-si	poli-si	poli-si	poli-si	poli-si
Fabricante:	Shell	Shell	Kyocera	Kyocera	Kyocera	Kyocera
Modelo de CFV:	SM55	SM56	KC120	KC120	KC120	KC120
Eficiencia nominal:	12.90%	12.90%	12.90%	12.90%	12.90%	12.90%
% de pérdidas:	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%	5.00%
Potencia nominal (kWp):	0.22	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
Eficiencia del inversor:	90.00%	90%	90%	90%	90%	90%
Cap. del inversor (kW):	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
Perdidas de potencia:	4.00%	4.00%	4.00%	4.00%	4.00%	4.00%

El análisis de costos de cada uno de los escenarios propuestos es fundamental para determinar las condiciones financieras adecuadas que permitan la viabilidad del proyecto en términos económicos. La información relevante a este campo se describe en cada escenario en la Tabla 5.21.

Tabla 5.21. Datos para el análisis de costos de los escenarios propuestos.  
Fuente: Este estudio

Análisis de costos.	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario4	Escenario5	Escenario6
Costo del CFV:	\$15,400.00	\$7,700.00	\$7,200.00	\$7,200.00	\$6,000.00	\$6,000.00
Estructura de soporte:	\$512.00	\$256.00	\$930.00	\$930.00	\$744.00	\$837.00
Otros equipos:	\$0.00	\$0.00	\$1,716.00	\$858.00	\$600.00	\$7,300.00
Instalación:	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$240.00
Preparación:	\$0.00	\$0.00	\$3,900.00	\$3,900.00	\$3,000.00	\$3,000.00
Contingencias:	\$796.00	\$398.00	\$687.00	\$644.00	\$517.00	\$869.00
Reposición de inversor:	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$5,000.00
Reposición baterías:	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$4,800.00

El campo de análisis financiero es determinante en cuanto a la relación de los resultados en términos de beneficio-costos, de tal modo que dadas las condiciones propuestas y probables se generan resultados que permiten concluir la factibilidad del proyecto. Por ende, se plantean los siguientes datos para cada uno de los escenarios en la Tabla 5.22.

Tabla 5.22. Información alimentada en el campo de análisis financiero en los escenarios correspondientes.  
Fuente: Este estudio.

Análisis financiero.	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario4	Escenario5	Escenario6
Capacidad de RE (kW):	0.2	0.1	0.12	0.12	0.12	0.12
Costo evitado (\$/kWh):	\$1.50	\$1.50	\$1.50	\$2.50	\$2.50	\$1.80
Crédito por RE (\$/kWh):	\$0.75	\$0.75	\$2.50	\$0.75	\$0.50	\$1.00
Porcentaje de la deuda:	60%	60%	60%	60%	90%	50%
Tasa interés de la deuda:	8.50%	8.50%	8.50%	8.50%	8.50%	8.00%
Termino de la deuda:	25 años	25 años	25 años	25 años	25 años	25 años
Incentivos:	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$1,000.00	\$500.00	\$5,000.00

**STELLA-CFV.** El modelo de simulación dinámica aplicado al análisis de sistemas CFV (Anexo 6) para su empleo en la vivienda se diseñó de manera simple y considerando los aspectos relevantes para el cálculo de los resultados que permiten llevar a cabo la toma de decisiones sobre la viabilidad del escenario planteado. Se presupone una demanda mínima para invierno de 260 kWh en el mes de febrero, mientras que para verano en el mes de agosto se considera una demanda eléctrica de 1170 kWh (CDEM, 2003), y un tiempo de vida útil del sistema de 25 años. Para la realización de los cálculos se utiliza la información sobre recurso solar disponible de la Tabla 5.23.

Tabla 5.23. Recurso solar disponible para análisis CFV en STELLA.  
Fuente: Atmospheric science data center, NASA.

	Radiación promedio kWh/m <sup>2</sup> /d
Enero	3.29
Febrero	4.12
Marzo	5.41
Abril	6.59
Mayo	7.53
Junio	7.73
Julio	6.97
Agosto	6.16
Septiembre	5.33
Octubre	4.41
Noviembre	3.59
Diciembre	3.03

En cuanto al aspecto de costos se manejan diferentes costos en términos de pesos/watt instalado así como la capacidad del equipo en cada escenario, en la Tabla 5.24 se muestra la información correspondiente a los escenarios planteados.

Tabla 5.24. Costos y capacidades de equipo analizados para el sistema CFV en STELLA.  
Fuente: Este estudio.

	Costo CFV \$/watt	Capacidad CFV (watts)
Escenario1	\$70.00	220
Escenario2	\$50.00	220
Escenario3	\$50.00	110
Escenario4	\$50.00	300

Un aspecto que se relaciona directamente con los beneficios y los costos, es el empleo de las tarifas que en este caso se contemplan tres tarifas en verano y una en invierno, además se presupone el intercambio de energía con la red principal de electricidad con un precio de venta de la energía renovable producida tal y como se indica en la Tabla 5.25.

Tabla 5.25. Tarifas de la red eléctrica presupuestas para al análisis y precio de venta de energía renovable.  
Fuente: Este estudio.

CFV	Tarifa 1 \$/kWh	Tarifa 2 \$/kWh	Tarifa 3 \$/kWh	Tarifa invierno. \$/kWh	\$ venta \$/kWh
Escenario1	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$1.20
Escenario2	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$1.50
Escenario3	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$1.00
Escenario4	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$1.20

Los subsidios o incentivos financieros se consideran dentro del análisis de los sistemas CFV, debido a que es necesario cubrir parte de la inversión mediante estos recursos y apoyos. En la Tabla 5.26 se indican los subsidios aplicados en cada escenario.

Tabla 5.26. Subsidios consideraciones para los escenarios de CFV en STELLA.  
Fuente: Este estudio

CFV	Subsidios (pesos)
Escenario1	\$0.00
Escenario2	\$1,000.00
Escenario3	\$1,000.00
Escenario4	\$3,000.00

Finalmente mediante el escenario 5 se plantea el uso combinado del análisis de los sistemas CSA y CFV para el que se plantean los valores de la Tabla 5.27 conservando los datos de demanda eléctrica presupuestos al igual que los de recurso solar disponible (Tabla 5.23).

Tabla 5.27. Datos para el escenario que contempla CSA y CFV.  
Fuente: Este estudio.

Escenario 5	Costo CSA	Área CSA	Costo CFV	Capacidad	Equipo adicional
CSA-CFV	\$/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	\$/watt	CFV (watts)	\$
	\$3,000.00	2	\$50.00	300	\$6,000.00
CFV	Tarifa 1	Tarifa 2	Tarifa 3	Tarifa invierno.	\$ venta
	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh
	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$0.80
CSA	Precio gas LP	gas LP/mes/per	Subsidios	Usuarios	Consumo
	\$/kg	kg	\$		litros/mes/per
	\$6.00	4	\$3,000.00	4	1350
CSA-CFV	Subsidios				
	\$				
	\$3,000.00				

## **Capitulo 6. Resultados obtenidos.**

Los resultados generados de las simulaciones tanto del sistema CSA como del sistema CFV son presentados en términos comunes entre estas herramientas. Tales términos como valor presente neto (VPN), tiempo de recuperación y relación de beneficio-costos, son indispensables para llevar a cabo la toma de decisiones acerca de la “Rentabilidad” o “No Rentabilidad” del proyecto o escenario planteado.

En base a las características antes mencionadas acerca de la forma de presentación de los resultados, se tienen a continuación los correspondientes a cada tipo de sistema y para cada escenario simulado.

### Resultados de simulación térmica (CSA).

Los escenarios programados en SSCA se resumen en una serie de datos y valores que se muestran en la Tabla 6.1 y Tabla 6.2.

Tabla 6.1. Resumen de resultados para las simulaciones realizadas en SSCA. Escenarios 1-4.  
Fuente: Este estudio

Resumen de resultados.	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Área del colector recomendada (m <sup>2</sup> ):	1.0	1.0	1.0	1.0
Cap. tanque de almacenamiento (litros):	60	60	60	60
Precio estimado del sistema:	\$2,783.00	\$2,783.00	\$2,783.00	\$2,783.00
Ahorro mensual de gas LP (kg):	17.15	16.96	16.14	10.75
Beneficio/Costo:	1.97	1.94	1.82	1.06
Valor presente neto:	\$2,686.17	\$2,614.06	\$2,288.87	\$169.24
Recuperación de la inversión (años):	6.25	6.33	6.75	14.75
Eficiencia promedio de diseño:	50.16%	49.43%	46.33%	50.16%
Diagnóstico del proyecto:	Rentable	Rentable	Rentable	No rentable

Tabla 6.2. Resumen de resultados para las simulaciones realizadas en SSCA. Escenarios 5-9.  
Fuente: Este estudio.

Resumen de resultados.	Escenario5	Escenario6	Escenario7	Escenario8	Escenario9
Área del colector recomendada (m <sup>2</sup> ):	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0
Cap. tanque de almacenamiento (litros):	60	60	120	120	120
Precio estimado del sistema:	\$2,783.00	\$2,783.00	\$5,566.00	\$5,566.00	\$5,566.00
Ahorro mensual de gas LP (kg):	10.75	10.75	30.49	30.27	29.30
Beneficio/Costo:	1.06	1.06	1.93	1.92	1.85
Valor presente neto:	\$169.24	\$169.24	\$5,187.16	\$5,099.52	\$4,710.09
Recuperación de la inversión (años):	14.75	14.75	6.50	6.58	6.92
Eficiencia promedio de diseño:	49.43%	46.33%	50.16%	49.43%	46.33%
Diagnóstico del proyecto:	No rentable	No rentable	Rentable	Rentable	Rentable

Dadas las características peculiares de diagnóstico del simulador SSCA, los resultados entre otras cosas incluye el dimensionamiento del sistemas CSA como parte de los mismos, además de recomendar la capacidad del depósito adecuado para el sistema, sin embargo, los términos relevantes para la decisión de “Viabilidad” o “Rentabilidad” del proyecto se indican como Valor presente neto (VPN) y Beneficio-Costo, a partir de los cuales se generan las conclusiones y decisiones para cada caso, así como las relaciones existentes entre los resultados y los factores técnicos y financieros relevantes para el análisis.

En RETScreen-SWH los resultados de las simulaciones sobre el uso de calentadores solares de agua residenciales son más concretos, sin embargo, a diferencia del simulador SSCA, la dimensión del CSA se propone como un dato de entrada y no se obtiene como un resultado. La Tabla 6.3 resume en cuatro términos principales los valores relevantes para la toma de decisiones, como son el retorno simple de la inversión, el tiempo para flujo positivo de efectivo, el valor presente neto (VPN) y la relación de Beneficio-Costo, a partir de los cuales se concluye la “Rentabilidad” o “No rentabilidad” del escenario analizado.

Tabla 6.3. Resumen de resultados para los cuatro escenarios de CSA en RETScreen.  
Fuente: Este estudio.

Resumen de resultados.	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Retorno simple (años):	13.7	17.8	10.3	11.6
Flujo positivo de efectivo (años):	10.3	12.6	8.2	9.0
Valor presente neto:	\$22,041.00	\$15,043.00	\$20,415.00	\$7,294.00
Beneficio-Costo:	3.51	2.71	4.88	4.32

Y por supuesto, a partir de estos también se establecen la relación existente entre los datos de entrada con mayor relevancia para el análisis.

En STELLA-CSA los resultados de la simulación realizada en cada uno de los cuatro escenarios planteados para sistemas de calentamiento solar de agua (CSA) se resumen en la Tabla 6.4 en términos de tiempo de recuperación y de flujo positivo de efectivo.

Tabla 6.4. Resumen de resultados para CSA en STELLA.  
Fuente: Este estudio

CSA Resultados	Tiempo de recuperación (años)	Flujo positivo de efectivo (años)	Pago mensual (\$)
Escenario1	6	4	\$83.30
Escenario2	11	4	\$83.30
Escenario3	12	5	\$117.00
Escenario4	más de 25	4	\$150.00

Se muestra también la cantidad considerada como pago mensual fija (Tabla 6.4) para poder saldar la deuda de la inversión inicial, sin embargo, no se considera ninguna tasa de interés por concepto de la deuda debido a que se presuponen facilidades especiales para promoción de uso de tecnología solar en la vivienda.

## Resultados de simulación fotovoltaica (CFV).

En los resultados de las simulaciones realizadas para el análisis de los sistemas CFV, se manejan términos diferentes en los simuladores utilizados, sin embargo, se puede de igual modo llegar a conclusiones de “Rentabilidad” o “No rentabilidad” de los escenarios. HOMER es el simulador que presenta resultados en términos que se interpretan de manera muy particular, debido principalmente a su característica para generar múltiples alternativas u opciones de solución. En este caso, se eligieron las soluciones más cercanas a la solución óptima y que incluyen la implementación de CFV sin importar la exclusión de baterías. En la Tabla 6.5 se muestra un resumen de resultados con los valores en términos empleados por el simulador HOMER para cada uno de los ocho escenarios.

Tabla 6.5. Resumen de resultados para escenarios de CFV analizados en HOMER (costos en USD).  
Fuente: Este estudio.

Términos	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario4
Costo presente neto (USD)	3,894.00	3,572.00	3,940.00	3,118.00
Costo de energía generada (USD)	0.35	0.32	0.24	0.23
Costo de operación anual (USD)	122.00	96.00	125.00	127.00
Capital inicial (USD)	2,340.00	2,340.00	2,340.00	1,500.00
Fracción de energía renovable	0.37	0.37	0.28	0.15
Términos	Escenario5	Escenario6	Escenario7	Escenario8
Costo presente neto (USD)	2,464.00	2,116.00	3,671.00	3,763.00
Costo de energía generada (USD)	0.24	0.21	0.27	0.28
Costo de operación anual (USD)	94.00	91.00	201.00	208.00
Capital inicial (USD)	1,260.00	950.00	1,100.00	1,100.00
Fracción de energía renovable	0.2	0.2	0.15	0.15

En este caso el término de costo de energía generada permite tener una perspectiva entre el costo de la energía convencional y la energía renovable. La fracción de energía renovable permite observar la aportación que realiza el sistema CFV en relación a la demanda establecida.

RETSscreen-PV presenta una serie de resultados que al igual que en su versión para CSA es simple y fácil de interpretar. Los términos que emplea son recuperación simple, flujo positivo de efectivo, valor presente neto (VPN) y la relación de Beneficio-Costo. Estos términos son claros y particularmente obvios en cuanto a las conclusiones que se generan de éstos referentes a la “Rentabilidad” o “No rentabilidad” del proyecto propuesto en el escenario.

En la Tabla 6.6 se indican los resultados en los términos mencionados para los escenarios objetos de análisis.

Tabla 6.6. Resumen de resultados para escenarios de CFV en RETScreen-PV.  
Fuente: Este estudio.

Resultados	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario4	Escenario5	Escenario6
Recuperación simple (años)	15.9	15.9	15.4	16.4	14.7	20.2
Flujo positivo efectivo (años)	14.3	14.3	15.2	14.9	13.9	30
VPN	\$1,007.00	\$504.00	\$1,550.00	\$775.00	\$770.00	\$13,018.00
Ahorros anuales	\$103.00	\$51.00	\$158.00	\$79.00	\$78.00	\$1,325.00
Beneficio/Costo	0.85	0.85	0.73	0.86	1.71	0.43

STELLA-CFV presenta una serie de resultados correspondientes a los cuatro escenarios sujetos a análisis, el resumen se muestra en términos de tiempo de recuperación y el tiempo para flujo positivo de efectivo dados los pagos mensuales programados sin contemplar intereses por concepto de la deuda.

La Tabla 6.7 muestra el resumen de resultados para los escenarios en los que se analizó el sistema fotovoltaico.

Tabla 6.7. Resumen de resultados para CFV en STELLA.  
Fuente: Este estudio.

CFV	Tiempo de recuperación	Flujo positivo de efectivo	Pago mensual
Resultados	(años)	(años)	(\$)
Escenario1	21	10	\$128.00
Escenario2	12	11	\$83.30
Escenario3	21	12	\$37.50
Escenario4	15	12	\$100.00
Escenario5	24	20	\$100.00

Los resultados en cada uno de los simuladores varían indudablemente, sin embargo, es el punto de partida para los análisis que conlleven a una coherencia en lo que se refiere a las conclusiones correspondientes a los escenarios y poder determinar en base a estos aquellas condiciones en las que el uso de la tecnología solar ya sea termosolar o fotovoltaica sea viable en la vivienda de tipo de interés social y de nivel medio que ya se ha caracterizado. Cada uno de los simuladores tiene como objetivo realizar una evaluación de un escenario dado a partir del cual el analista pueda tomar una decisión mediante la interpretación de los valores obtenidos como resultados.

En este capítulo el objetivo principal es establecer los puntos de partida para la discusión de resultados desde el punto de vista termoeconómico, es decir, plantear los términos técnicos y financieros que conforman cada escenario en relación a los resultados presentados y la conclusión que se genere al respecto de estos mismos. Además de mostrar los resultados resumiendo la información relevante para el análisis y para la generación de conclusiones acerca de cada una de las metodologías empleadas y las diferencias entre las mismas.

## **Capitulo 7. Análisis y discusión de resultados**

El análisis se basa en distinguir las diferencias significativas entre escenarios y la discusión de las causas que provocan las discrepancias entre los diferentes resultados obtenidos, a partir de las cuales se definen aquellos escenarios “Factibles” y los “No Factibles”.

De las cuatro metodologías utilizadas como base para el análisis de los escenarios propuestos, se encontraron coincidencias en la información que manejan como en el caso de la metodología para CSA, donde se emplea en ambas metodologías la información de radiación solar disponible, estimados de la demanda, características del equipo CSA, inversión requerida y costo de la energía convencional. Estos datos son el fundamento sobre el que funciona el análisis técnico y financiero de un escenario, esto no significa que las metodologías utilizan datos idénticos, ya que cada una cuenta con su propia fuente de datos que distinguen las discrepancias entre resultados.

SSCA utiliza los valores horarios de radiación solar disponible para el mes de junio en la ciudad de Mexicali en unidades de  $\text{MJ}/\text{m}^2$ , RETScreen emplea valores promedio mensuales en unidades de  $\text{kWh}/\text{m}^2$  por día, este último además incorpora datos de velocidad de viento, humedad relativa y temperatura promedio, determinadas en la base de datos dada la localización geográfica del proyecto determinada por la latitud de la ciudad (Mexicali:  $32^{\circ}\text{N}$ ).

Los tipos de factores o variables a considerar para un análisis confiable de un escenario que implica el uso de CSA deben ser:

- **Ambiental.** La información de las variables relevantes (temperatura, radiación, humedad, velocidad de viento) para el cálculo de energía del CSA correspondientes a la localidad (ciudad) donde se pretende realizar el proyecto.
- **Servicio.** Información confiable sobre la demanda real del recurso de agua caliente en la vivienda, así como el comportamiento de la demanda mensual y de la temperatura mínima del agua requerida para ser útil en las necesidades domésticas.

- **Técnico.** Información suficiente sobre las características del equipo CSA (materiales, dimensiones) para determinar su capacidad de calentamiento de agua o en su defecto un valor confiable sobre la capacidad mínima y máxima esperada del sistema CSA y el tiempo de vida útil del mismo.
- **Inversión y costos.** Detalle de los costos involucrados en la inversión inicial y gastos recurrentes (mantenimiento y reposición).
- **Energía convencional.** Información de análisis sobre el costo de la energía (gas LP), el consumo de gas en la vivienda para fines de calentamiento de agua y el comportamiento futuro del precio del gas LP de los próximos años.

Dados los tipos de factores ya mencionados, se tiene que las metodologías para análisis del uso de CSA cumplen con que se describen en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Tipos de factores aplicados a las metodologías para CSA.

Fuente: Este estudio.

<b>Factores</b>	<b>SSCA</b>	<b>RETSscreen-SWH</b>
Ambiental	No cumple con la información necesaria sobre las variables relevantes.	Cumple con la información suficiente sobre las variables relevantes.
De servicio	Cumple con los detalles de demanda y comportamiento de servicio, aunque este último es inadecuado.	Cumple con información suficiente sobre demanda y su comportamiento.
Técnico de CSA	Cumple con la información técnica mínima del sistema.	Cumple con la información técnica del sistema usando datos del fabricante.
Inversión y costos	Cumple con el criterio aunque el detalle es limitado.	Cumple con detalle sobre los aspectos de inversión y costos.
Energía convencional	Incluye el análisis del costo de gas LP y reducción del consumo.	Realiza el análisis de costo de gas LP sin incluir el cálculo de la reducción del consumo.

Tomando en cuenta los tipos de factores aplicados a las metodologías para análisis de CSA, los escenarios analizados se agrupan en los más importantes que son *el servicio* y la *energía convencional* los cuales son determinantes en la interpretación de resultados relacio-

nando el tiempo de recuperación de la inversión y el beneficio-costo en la metodología de SSCA.

El servicio se compone de la demanda estimada en base a consumo promedio por usuario y la energía convencional se basa en los costos de gas LP. Los escenarios planteados en SSCA (Tabla 7.2) se agrupan entonces en la categoría de servicio dado que la metodología maneja un costo de gas LP fijo (\$3.45, precio de 1999) así como el del sistema CSA (\$2,783.00/m<sup>2</sup> estimado por la CONAE).

Tabla 7.2. Escenarios en SSCA factores de servicio.  
Fuente: Este estudio.

<b>Factores</b>	<b>Escenario</b>	<b># de usuarios</b>
Servicio promedio	Escenario 1	4
	Escenario 2	4
	Escenario 3	4
Servicio inferior	Escenario 4	2
	Escenario 5	2
	Escenario 6	2
Servicio superior	Escenario 7	6
	Escenario 8	6
	Escenario 9	6

En esta metodología el factor de mayor relevancia está representado por la demanda estimada del servicio dada por el número de usuarios en la vivienda. La cantidad promedio de usuarios es de cuatro, mientras que dos y seis usuarios representan la minoría de los casos en relación al promedio. Los escenarios 1, 4 y 7 son representativos de cada grupo de tal modo que los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Resultados para los escenarios representativos de SSCA para CSA.  
Fuente: Este estudio.

<b>Resumen de resultados.</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 4</b>	<b>Escenario 7</b>
Beneficio/Costo:	1.97	1.06	1.93
Valor presente neto:	\$2,686.17	\$169.24	\$5,187.16
Recuperación de la inversión:	6.25 años	14.75 años	6.50 años
Diagnóstico del proyecto:	Rentable	No rentable	Rentable

En este caso los parámetros son Beneficio/Costo, Valor presente neto, recuperación de la inversión, los cuales de acuerdo al valor de los criterios permiten la decisión de “Rentable” o “No rentable”. El SSCA utiliza de un criterio basado en el Beneficio/costo que debe considera que debe ser mayor a 1.20 para que el proyecto sea “Rentable” y si resulta menor se considera “No rentable”. Además, por consecuencia se tiene que el Valor presente neto debe ser positivo y el tiempo de recuperación de la inversión tiene que ser menor al tiempo de vida del CSA.

En la Tabla 7.3 se observa que para el Escenario 1, representativo de la demanda promedio de la vivienda en Mexicali, la relación beneficio-costos es cercana a 2 y que el tiempo de recuperación corregido para la condición de que el sistema opere sólo en la temporada invernal es de 12.5 años y permite que el proyecto sea rentable.

El Escenario 7 presenta un comportamiento similar al escenario 1, sin embargo, ambos difieren del Escenario 4 representativo de los casos con número de usuarios menor al promedio, de tal forma que esta última variable es un factor de peso en los resultados y diagnóstico en la metodología SSCA.

La metodología de RETScreen-SWH basa los cálculos en los tipos de factores de *servicio*, *energía convencional*, *datos técnicos*, *inversión* y *costos*. Estos se componen dentro de esta metodología en el número de usuarios para estimar la demanda, el precio de gas LP para el

análisis comparativo y de recuperación de la inversión, el área del CSA y la inversión requerida para el equipo dado como se muestra en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4. Factores relevantes para la metodología de RETScreen-SWH.  
Fuente: Este estudio.

<b>Factores</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>	<b>Escenario 4</b>
Precio gas LP:	\$6.50	\$5.00	\$5.00	\$3.45
Usuarios:	4	4	6	2
Costo de CSA:	\$7,480.00	\$7,480.00	\$3,740.00	\$2,000.00
Área del colector:	1.87 m <sup>2</sup>	1.87 m <sup>2</sup>	1.87 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>

Estos cuatro aspectos de la metodología de RETScreen-SWH son definitivos para que los resultados que se generan conlleven a un diagnóstico o conclusión de factibilidad del proyecto. Por ello los resultados de los cuatro escenarios propuestos permiten contrastar la relación de causa-efecto de cada uno, como se muestra en la Tabla 7.5, donde el criterio de los parámetros de Beneficio-Costo debe ser mayor a 1.3, el Valor presente neto tiene que ser positivo y el Retorno simple debe ser menor a 25 años para que sea “Rentable”.

Tabla 7.5. Resumen de resultados para los escenarios analizados por RETScreen-SWH.  
Fuente: Este estudio.

<b>Resumen de resultados.</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>	<b>Escenario 4</b>
Retorno simple:	13.7 años	17.8 años	10.3 años	11.6 años
Flujo positivo de efectivo:	10.3 años	12.6 años	8.2 años	9.0 años
Valor presente neto:	\$22,041.00	\$15,043.00	\$20,415.00	\$7,294.00
Beneficio-Costo:	3.51	2.71	4.88	4.32

Como se observa en la Tabla 7.5 los resultados presentan una relación con los factores de la Tabla 7.4 de los que se puede destacar el impacto del costo de la energía convencional en relación al tiempo de recuperación de la inversión, que de igual manera se relaciona al costo del CSA. Es decir, los Escenarios 1 y 2 presentan una diferencia del costo del gas LP, esto en consecuencia incrementa el tiempo de recuperación de la inversión y disminuye el

valor de la relación beneficio-costo para el Escenario 2 el cual presenta un precio de gas LP menor al del Escenario 1. En los Escenarios 3 y 4 el costo de gas LP es diferente entre estos, mientras que los resultados muestran valores próximos entre cada escenario, es decir, el retorno de la inversión, el flujo positivo de efectivo y el beneficio-costo están aproximados a pesar de que existe la diferencia marcada en la demanda (número de usuarios) y en el costo de gas LP, esta característica se debe a que el costo del CSA es menor en el Escenario 4 respecto al Escenario 3 ya que el número de usuarios en el Escenario 3 junto con el costo menor del CSA respecto al Escenario 1 permiten lograr un valor alto de beneficio-costo. Todo lo anterior permite concluir que tanto el factor de demanda como el de costo de la energía convencional son críticos para la rentabilidad del proyecto.

La metodología propuesta en el modelo de simulación elaborado en STELLA permitió integrar los factores relevantes para el análisis de CSA en la vivienda, es decir, incluye información suficiente sobre condiciones ambientales, de servicio, de costos, sobre la energía convencional y del equipo CSA. En la Tabla 7.6 se muestran los cuatro escenarios planteados con la información respectiva.

Tabla 7.6. Factores relevantes planteados en STELLA -CSA.  
Fuente: Este estudio.

	Costo CSA \$/m <sup>2</sup>	Área CSA m <sup>2</sup>	Precio gas LP \$/kg	gas LP/mes/per kg	Usuarios
Escenario1	\$2,000.00	2	\$7.50	4	4
Escenario2	\$2,000.00	2	\$7.50	4	2
Escenario3	\$4,000.00	2	\$7.50	4	4
Escenario4	\$4,000.00	2	\$5.00	4	4

Se estableció como constante el consumo promedio de gas LP en los cuatro escenarios y se utilizó un precio menor al actual que es de 9.00 \$/kg aproximadamente. En la mayoría de los equipos CSA se maneja una dimensión de superficie de área promedio de dos metros

cuadrados, y se considera esta característica como un factor fijo. Los costos de equipo CSA se consideraron en base al precio comercial promedio por metro cuadrado (\$4,000.00) y un precio optimista de \$2,000.00 por unidad de área. La demanda de servicio establecida por su relación directa con el número de usuarios considera un consumo promedio de 30 litros de agua caliente por día por persona, y un promedio de ocupantes de cuatro personas para el caso de Mexicali. La Tabla 7.7 presenta los resultados obtenidos, donde el parámetro de Tiempo de recuperación según el criterio para que el proyecto sea “Rentable” debe ser menor a 25 años.

Tabla 7.7. Resumen de resultados correspondientes a los escenarios analizados en STELLA para CSA.  
Fuente: Este estudio.

<b>CSA Resultados</b>	<b>Tiempo de recuperación (años)</b>	<b>Flujo positivo de efectivo (años)</b>	<b>Pago mensual (\$)</b>
Escenario1	6 años	4 años	\$83.30
Escenario2	11 años	4 años	\$83.30
Escenario3	12 años	5 años	\$117.00
Escenario4	más de 25 años	4 años	\$150.00

Contrastando los Escenarios 1 y 2, se observa que la diferencia en el tiempo de recuperación se debe a la demanda del servicio de agua caliente, que en el Escenario 1 es del doble que en el Escenario 2, por lo tanto, la demanda en el caso de una vivienda de interés social promedio permite un tiempo de recuperación relativamente corto con opción de pago accesible para el caso de financiamiento o crédito para la adquisición del equipo CSA, es decir, se propone en el Escenario 1 un pago de \$83.30 por mes cuando el costo de consumir gas LP equivale a \$144.00 por mes para una vivienda con cuatro ocupantes.

En los Escenario 3 y 4, se observa que el precio del gas LP impacta directamente en la cuantificación de los beneficios desde el punto de vista financiero, ya que en el Escenario 4 una reducción del 44% en el precio actual del gas LP hace “No factible” la implementación

de un equipo CSA en la vivienda, dado que su costo comercial para una vivienda de interés social promedio equivale a \$8,000.00 y el tiempo de recuperación excede por mucho el tiempo de vida útil del sistema CSA. En contraste el Escenario 3 presenta una conclusión de ‘Factibilidad’ dadas las condiciones de precio actual del CSA y de un precio competitivo del gas LP (16% por debajo de su precio actual) con un tiempo de recuperación aceptable de 12 años, lo que permite aprovechar el sistema durante otros 13 años con un costo mínimo.

Las metodologías utilizadas para el análisis de CFV presentan características diferentes a partir de las cuales se consideran los siguientes tipos de factores (Tabla 7.8) como los más relevantes para llevar a cabo los principales cálculos para determinar la ‘Factibilidad’ o ‘No factibilidad’ del proyecto.

Tabla 7.8. Factores aplicados a las metodologías para CFV.

Fuente: Este estudio

<b>Factores</b>	<b>HOMER</b>	<b>RETScreen-PV</b>
Ambiental	Cumple con la información adecuada para los cálculos necesarios de energía a partir de la base de datos.	Cumple con la información suficiente sobre radiación solar a partir de la base de datos.
De servicio	Cumple con los detalles de demanda y comportamiento de servicio con detalle horario y mensual.	No maneja el criterio de demanda de energía o consumo energético, se limita al análisis del equipo CFV.
Técnico de CSA	Cumple con la información técnica mínima del sistema incluyendo accesorios adicionales para el tipo de arreglo a partir de base de datos.	Cumple con la información técnica del sistema usando datos del fabricante para el equipo CFV a partir de la base de datos que posee.
Inversión y costos	Cumple a detalle con los costos implicados sin embargo omite el análisis de factibilidad financiera.	Detalla adecuadamente los costos correspondientes a equipo y gastos adicionales implicados en la realización del proyecto.
Energía convencional	Incluye a detalle el manejo de tarifas eléctricas por horario y por mes.	Cumple con la información acerca del costo de la energía convencional.

- De la información ambiental se tiene la variable de radiación solar como la más relevante para los cálculos de energía en el caso de CFV.
- La información de la demanda o servicio eléctrico es importante para cuantificar el ahorro de energía por concepto del sistema CFV y para determinar el nivel de contribución de energía a la vivienda, ya sea dado un consumo promedio mensual u horario.
- Los datos técnicos del equipo CFV como capacidad, tipo de salida de corriente (CD o CA), tipo de arreglo (con conexión a la red o sin conexión) e información de baterías, inversores, etc.
- La inversión y los costos implica información sobre el costo del equipo CFV, equipo adicional para el arreglo del sistema y costos adicionales como de servicio y reposición.
- El manejo de tarifas para la energía convencional es importante para determinar la viabilidad financiera del proyecto y reflejar la realidad particularmente en la ciudad de Mexicali donde las tarifas varían.

En la metodología de HOMER los tipos de factores de mayor relevancia debido a su influencia en los resultados y en la interpretación de estos para la concluir la Factibilidad del proyecto, se identifican al consumo o *servicio* y las tarifas o *costo de energía convencional*.

El factor de servicio se compone de la descripción del consumo horario mensual promedio en la vivienda, establecido a partir del consumo mínimo (200 kWh en invierno y 900 kWh en verano) esperado para la vivienda de interés social en Mexicali, y el factor tarifario que se compone de manera particular en Mexicali por tarifa de invierno y tarifa de verano los cuales se plantean como tarifas horarias mensuales en los escenarios propuestos. En la Tabla 7.9 se muestran los escenarios para los cuales se considero un precio del CFV de \$7.00

USD/W instalado con las propuestas de capacidad de CFV suficiente para cubrir parte de la demanda eléctrica por parte de equipos de bajo consumo e iluminación.

Tabla 7.9. Información de escenarios para CFV en HOMER empleando un costo elevado.  
Fuente: Este estudio.

<b>Información de CFV.</b>	<b>Capacidad (kW)</b>	<b>Costo(USD)</b>
Escenario 1	0.22	\$1,540.00
Escenario 2	0.22	\$1,540.00
Escenario 3	0.22	\$1,540.00
Escenario 4	0.1	\$700.00
	0.22	\$1,540.00
Escenario 5	0.1	\$700.00

Los escenarios para los que se emplea un costo bajo de 5.00 USD/W instalado para el CFV se pueden ver en la Tabla 7.10.

Tabla 7.10. Información de escenarios para CFV en HOMER empleando un costo bajo.  
Fuente: Este estudio.

<b>Información de CFV.</b>	<b>Capacidad (kW)</b>	<b>Costo(USD)</b>
Escenario 6	0.1	\$500.00
Escenario 7	0.1	\$500.00
	0.15	\$750.00
	0.2	\$1,000.00
Escenario 8	0.1	\$500.00
	0.15	\$750.00
	0.2	\$1,000.00

De los escenarios anteriores se propusieron alternativas de capacidad de CFV para ser analizadas por HOMER, dado que la capacidad del sistema está ligada directamente a la inversión requerida, la metodología del simulador busca aquella alternativa que implica un menor costo con respecto a la cantidad de energía producida, sin embargo, la decisión está relacionada íntimamente a los costos de energía convencional establecidos en este caso parti-

cular por las tarifas propuestas para el análisis de cada escenario como se muestran en la Tabla 7.11.

Tabla 7.11. Tarifas y precios de electricidad (moneda en USD) de escenario analizados en HOMER para CFV.

Fuente: Este estudio.

<b>Compra-venta (Dólares)</b>	<b>T1 (USD/kWh)</b>	<b>T2 (USD/kWh)</b>	<b>T3 (USD/kWh)</b>	<b>venta 1 USD</b>	<b>venta 2 USD</b>	<b>venta 3 USD</b>
Escenario 1	0.150	Na	Na	0.050	Na	Na
Escenario 2	0.150	0.076	0.060	0.050	0.050	0.050
Escenario 3	0.150	0.076	0.060	0.050	0.050	0.050
Escenario 4	0.150	0.076	0.060	0.050	0.050	0.050
Escenario 5	0.110	Na	Na	0.050	Na	Na
Escenario 6	0.110	Na	Na	0.080	Na	Na
Escenario 7	0.180	Na	Na	0.100	Na	Na
Escenario 8	0.250	0.100	Na	0.100	\$0.070	Na

Los precios de venta en la Tabla 7.11 son los propuestos dado el caso de arreglo con conexión a la red y que corresponden a cada una de las tarifas propuestas para cada escenario. El incremento en la tarifa eléctrica y el aumento del precio de venta de energía producida por CFV se analizan por la metodología de HOMER, lo que generó los resultados que permiten concluir sobre la “Factibilidad” del proyecto. En la Tabla 7.12 se muestran los resultados que genera la metodología de HOMER, cuyos parámetros son el Costo presente neto y Costo de energía generada, donde el criterio del primero establece que no debe ser mayor al Capital inicial en más del 20% y el segundo no debe ser mayor al costo convencional en más del 25%.

Tabla 7.12. Resumen de resultados de los escenarios en HOMER para CFV.

Fuente: Este estudio.

<b>Concepto</b>	<b>Escenario1</b>	<b>Escenario2</b>	<b>Escenario3</b>	<b>Escenario4</b>
Costo presente neto	\$3,894.00	\$3,572.00	\$3,940.00	\$3,118.00
Costo de energía generada	\$0.35	\$0.32	\$0.24	\$0.23
Costo de operación anual	\$122.00	\$96.00	\$125.00	\$127.00
Capital inicial	\$2,340.00	\$2,340.00	\$2,340.00	\$1,500.00
Fracción de energía renovable	0.37	0.37	0.28	0.15
<b>Concepto</b>	<b>Escenario5</b>	<b>Escenario6</b>	<b>Escenario7</b>	<b>Escenario8</b>
Costo presente neto	\$2,464.00	\$2,116.00	\$3,671.00	\$3,763.00
Costo de energía generada	\$0.24	\$0.21	\$0.27	\$0.28
Costo de operación anual	\$94.00	\$91.00	\$201.00	\$208.00
Capital inicial	\$1,260.00	\$950.00	\$1,100.00	\$1,100.00
Fracción de energía renovable	0.2	0.2	0.15	0.15

Los resultados obtenidos permiten observar aspectos importantes en lo que respecta a los costos involucrados durante el tiempo de vida del sistema CFV, como los costos de operación que incluye la metodología de HOMER a partir de la cual se obtiene el Costo Presente Neto (CPN) y que sirve para calcular el costo de generación de energía. De los resultados mostrados en la Tabla 7.12 el Escenario 6 es el que presenta costo de generación menor respecto a los demás escenarios, así como un menor costo de operación y la menor inversión inicial, además evidencia el punto relevante en cuanto al mayor obstáculo para lograr la Factibilidad de proyectos CFV que es el costo de operación que incluye el costo del equipo, la reposición de equipo y mantenimiento. La fracción de energía aportada por el CFV va desde el 15% hasta el 37% lo que es relativamente bajo respecto a la demanda de la vivienda, sin embargo, se vuelve significativa respecto a la demanda en la vivienda por parte de los equipos de bajo consumo eléctrico y del concepto de iluminación. Como se observa en el Escenario 6 los costos son menores debido a tres factores: el costo del sistema en 5.00 USD/W instalado, costo menor de accesorios y el incremento en el precio de venta de

energía generada por el CFV, lo que se traduce en mayores ahorros y mayores ganancias. Sin embargo, dado el CPN se observa que el menor tiempo de recuperación es de aproximadamente 19.6 años, lo que deja relativamente pocos años de aprovechamiento del sistema CFV sin costo alguno.

La metodología de RETScreen-PV basa los cálculos para el análisis en los factores de *inversión y costos*, de *costo de energía convencional y datos técnicos* del CFV. Esta metodología excluye totalmente el de *demanda o servicio*, es decir, no toma en cuenta el consumo de energía eléctrica realizado en la vivienda para la cual se analiza el proyecto lo que por consecuencia limita el análisis de los ahorros económicos y energéticos generados por el sistema CFV, sin permitir establecer una relación respecto a la fracción de la demanda eléctrica cubierta por el equipo solar. La metodología de RETScreen permite destacar la relevancia del *costo de energía convencional* para determinar la “Factibilidad” o “No factibilidad” de un proyecto fotovoltaico residencial en relación con la inversión requerida. Se propusieron seis escenarios para ser analizados por RETScreen-PV los cuales se detallan en la Tabla 7.13.

Tabla 7.13. Información sobre escenarios planteados en RETScreen-PV para CFV.  
Fuente: Este estudio.

<b>Análisis de CFV</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>	<b>Escenario 4</b>	<b>Escenario 5</b>	<b>Escenario 6</b>
Costo del CFV:	\$15,400.00	\$7,700.00	\$7,200.00	\$7,200.00	\$6,000.00	\$6,000.00
Estructura de soporte:	\$512.00	\$256.00	\$930.00	\$930.00	\$744.00	\$837.00
Otros equipos:	\$0.00	\$0.00	\$1,716.00	\$858.00	\$600.00	\$7,300.00
Instalación:	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$240.00
Preparación:	\$0.00	\$0.00	\$3,900.00	\$3,900.00	\$3,000.00	\$3,000.00
Contingencias:	\$796.00	\$398.00	\$687.00	\$644.00	\$517.00	\$869.00
Reposición de inversor:	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$5,000.00
Reposición baterías:	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$4,800.00
Capacidad de RE (kW):	0.2	0.1	0.12	0.12	0.12	0.12
Costo evitado (\$/kWh):	\$1.50	\$1.50	\$1.50	\$2.50	\$2.50	\$1.80
Crédito por RE (\$/kWh):	\$0.75	\$0.75	\$2.50	\$0.75	\$0.50	\$1.00

El costo del equipo CFV está dado por la capacidad de este mismo, aunque el costo total del sistema implica la adquisición de accesorios como base, baterías, inversores, dependiendo del tipo de arreglo que se desea. En estos escenarios se manejó el arreglo con conexión a la red principal de suministro eléctrico debido a que es prácticamente imposible que el CFV cubra la demanda total de una vivienda. La conexión a la red implica que existe el intercambio de energía de lo cual se establece una tarifa (*costo evitado*) para el consumo de energía de la red y créditos por unidad de energía producida por el sistema CFV. Los criterios para los parámetros son para VPN valores positivos, para Recuperación simple un tiempo menor a 25 años y para Beneficio/Costo un valor mayor a 1.2. Los resultados se muestran en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14. Resumen de resultados para escenarios analizados en RETScreen-PV para CFV.  
Fuente: Este estudio.

Resultados	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario4	Escenario5	Escenario6
Recuperación simple (años)	15.9	15.9	15.4	16.4	14.7	20.2
Flujo positivo efectivo, años	14.3	14.3	15.2	14.9	13.9	30
VPN	\$1,007.00	\$504.00	\$1,550.00	\$775.00	\$770.00	\$13,018.00
Ahorros anuales	\$103.00	\$51.00	\$158.00	\$79.00	\$78.00	\$1,325.00
Beneficio/Costo	0.85	0.85	0.73	0.86	1.71	0.43

En los resultados para los Escenarios 1, 2 y 3 se observan tiempos de recuperación relativamente similares y relación beneficio-costos también similares entre los Escenarios 1 y 2, lo anterior se debe a que se utiliza un costo aproximado de 70.00 USD/W para estimar el costo del CFV, el mismo costo evitado para los tres escenarios, créditos iguales para los Escenarios 1 y 2 mientras que para el Escenario 3 se incrementa el crédito en un 330% para compensar los costos adicionales agregados en este escenario. Los Escenarios 4 y 5 permiten contrastar el efecto de incrementar el costo de la energía convencional y de aumentar el nivel de financiamiento del proyecto, dado que en el Escenario 4 el costo evitado pasa de

1.50 a 2.50 \$/kWh el tiempo de recuperación se incrementa sólo un año respecto al Escenario 3 cuyo crédito es superior al del Escenario 4, mientras que el Escenario 5 pasa a tener un costo evitado de 1.50 a 2.50 \$/kWh su crédito por producción CFV se reduce en un 30% respecto al Escenario 4 y además se establece un financiamiento del proyecto del 90% que supera el 60% propuesto en los Escenarios 1, 2, 3 y 4, por consecuencia el incremento del costo evitado y el aumento del financiamiento reflejan un tiempo de recuperación cercano a los 15 años y una relación beneficio-costo de 1.71 debida a que la mayor parte de la inversión se cubre con el financiamiento.

El Escenario 6 contrasta los escenarios anteriores dado que involucra todos los costos implicados dentro de un proyecto CFV residencial, en consecuencia los costos se incrementan significativamente y además sólo se considera el financiamiento del 50% respecto a la inversión requerida lo que conlleva a un resultado del tiempo de recuperación mayor a los 20 años y una relación de beneficio-costo por debajo de 0.5 que, como casi en todos los demás escenarios son menores a 1.0, exceptuando el Escenario 5.

La metodología desarrollada para la simulación dinámica de sistemas CFV en STELLA trata de cubrir los criterios más importantes para realizar los cálculos necesarios que permitan llegar a una conclusión de factibilidad sobre los proyectos fotovoltaicos de tipo residencial.

Por eso es que se modelaron cuatro escenarios para analizar la alternativa de sistemas CFV a partir de los factores de *servicio, técnicos, costo de energía convencional, inversión y costos*, de los cuales se describe la información de cada Escenario en la Tabla 7.15.

Tabla 7.15. Escenarios de CFV analizados en el simulador de STELLA.

Fuente: Este estudio.

	Costo CFV \$/watt	Capacidad CFV (watts)	Tarifa 1 \$/kWh	Tarifa 2 \$/kWh	Tarifa 3 \$/kWh	Tarifa invierno. \$/kWh	\$ venta \$/kWh
Escenario1	\$70.00	220	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$1.20
Escenario2	\$50.00	220	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$1.50
Escenario3	\$50.00	110	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$1.00
Escenario4	\$50.00	300	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$1.20

Dado que el costo del equipo CFV es relevante para estimar y comparar los beneficios obtenidos se proponen dos costos para su análisis, de igual modo las tarifas eléctricas propuestas se establecen para analizar el caso peculiar de Mexicali. La demanda o servicio requerido en la vivienda de interés social se estableció en un mínimo requerido de 260 kWh aproximadamente para los meses de invierno y de 800 kWh para meses de verano.

Los resultados obtenidos del análisis de estos cuatro escenarios permiten llegar a la conclusión de ‘Factibilidad’ o ‘No factibilidad’ de los proyectos planteados principalmente, dado que en estos no se incluyen los costos adicionales por concepto de accesorios, reposiciones y mantenimiento, lo cual sin duda alguna influye de manera importante en los resultados de Factibilidad. La Tabla 7.16 muestra el resumen de resultados generados por la metodología propuesta en el modelo de simulación desarrollado en STELLA.

Tabla 7.16. Resumen de resultados de escenarios para CFV analizados en STELLA.

Fuente: Este estudio.

<b>CFV Resultados</b>	<b>Tiempo de recuperación (años)</b>	<b>Flujo positivo de efectivo (años)</b>
Escenario1	21 años	10 años
Escenario2	12 años	11 años
Escenario3	21 años	12 años
Escenario4	15 años	12 años

El criterio para determinar que el proyecto es “Rentable” se basa en el parámetro de Tiempo de recuperación que debe ser menor a 25 años. Como se observa en la Tabla 7.16 los escenarios muestran un tiempo de recuperación inferior a los 25 años, sin embargo, esto es sin considerar los costos recurrentes y los costos adicionales para adquisición de equipo (baterías, inversores, etc.), de estos el Escenario 2 muestra un tiempo de recuperación relativamente corto dado que el costo del sistema CFV es 20.00 USD/W menor que en el Escenario 1 y además cuenta con un precio de venta para la energía producida por el CFV de 0.30 \$/kWh por arriba del precio de venta del Escenario 1, esto permite observar el impacto que representa reducir el costo del equipo y el contar con un buen precio de venta o crédito por producción de energía limpia.

En el Escenario 4, a pesar de ser un sistema de mayor capacidad que los demás, presenta un tiempo de recuperación menor que los Escenarios 1 y 3, esto se debe a que se consideró para este escenario un subsidio de \$3,000.00 es decir, 10.00 \$/W instalado o un subsidio del 20% respecto al costo de 50.00 \$/W planteado para el CFV. Esto hace evidente que el usuario promedio de una vivienda de interés social podría adquirir el sistema CFV, sin embargo, no podría confrontar los costos adicionales de equipo y mantenimiento así como la reposición de estos, aunque la inversión inicial es alta existe la posibilidad de créditos y financiamientos a mediano y largo plazo como alternativas de solución.

Un último escenario modelado utilizando la metodología desarrollada en STELLA permite conjuntar un análisis simultaneo de CSA y CFV, así como también establecer una alternativa de análisis financiero que permita absorber parte del costo del equipo CFV mediante el uso de los ahorros generados por el CSA, de tal modo que contribuya a establecer condiciones para el uso “Factible” del CFV en la misma vivienda. En la Tabla 7.17 se observa el

resumen del planteamiento del escenario de análisis mixto con la información más relevante y significativa.

Tabla 7.17. Información para el escenario mixto (CSA-CFV) para análisis en STELLA.  
Fuente: Este estudio.

<b>CSA-CFV Escenario5</b>	<b>Costo CSA \$/m<sup>2</sup></b>	<b>Área CSA m<sup>2</sup></b>	<b>Costo CFV \$/watt</b>	<b>Capacidad CFV (watts)</b>	<b>Equipo adicional \$</b>
	\$3,000.00	2	\$50.00	300	\$6,000.00
	<b>Tarifa 1 \$/kWh</b>	<b>Tarifa 2 \$/kWh</b>	<b>Tarifa 3 \$/kWh</b>	<b>Tarifa invierno \$/kWh</b>	<b>\$ venta \$/kWh</b>
	\$0.67	\$0.79	\$2.34	\$1.80	\$0.80
	<b>Precio gas LP \$/kg</b>	<b>gas LP/mes/per kg</b>	<b>Subsidios \$</b>	<b>Usuarios</b>	
	\$6.00	4	\$3,000.00	4	

En este escenario se proponen costos moderados para realizar un análisis desde un punto de vista optimista. Los criterios de mayor relevancia para la metodología se enfocan en el aspecto financiero como son los costos de equipo, tarifas, costo de energía convencional y en los subsidios que se considera como un apoyo para contrarrestar el costo de la energía convencional (tarifas eléctricas y gas LP).

Los resultados generados por la metodología propuesta se muestran en la Tabla 7.18 a partir de los cuales se discuten las razones de la información resultante.

Tabla 7.18. Resumen de resultados para el escenario mixto (CSA-CFV) en STELLA.  
Fuente: Este estudio.

<b>Resultados</b>	<b>Tiempo de recuperación (años)</b>	<b>Flujo positivo de efectivo (años)</b>	<b>Pago mensual (\$)</b>
Escenario5	24 años	20 años	\$100.00

Dadas las condiciones en que se programó el escenario mixto para CSA-CFV, se tiene que un tiempo de recuperación superior a los 20 años es poco favorable debido a que el tiempo durante el que se aprovecha el sistema solar es relativamente corto, y sin tomar en cuenta

que durante los últimos cinco años de vida útil del equipo solar su eficiencia decae significativamente. Sin duda alguna el sistema CSA es capaz de cubrir parte de la inversión inicial de un sistema CFV, sin embargo, es relativamente poco el aporte que pueden brindar los ahorros esperados del CSA respecto a los costos que representa el sistema CFV. Por ello es que los resultados presentan un tiempo de recuperación apenas por debajo del tiempo de vida útil esperado de los sistemas solares, lo que permite realizar la siguiente observación: el escenario tal como fue planteado deja ver que aunque el costo de un sistema CSA-CFV pueda ser solventado por los ocupantes de una vivienda de interés social el beneficio esperado de este arreglo no es suficiente para impactar en la calidad de vida del usuario.

## **Capitulo 8. Conclusiones y recomendaciones.**

De los resultados obtenidos se concluye que el enfoque termoeconómico permite lograr un estudio sistémico de los elementos que conforman el análisis y una metodología integral, ya que establece la relación entre los factores de tecnología solar, costos y características del usuario. Por ello se identifican las ventajas de la metodología con el enfoque termoeconómico:

- La termoeconomía establece relaciones entre los elementos de interés mediante el uso de factores de energía, costos, ahorros (energéticos y económicos) y beneficios cuantificables o medibles.
- Incorpora el análisis técnico y financiero para el equipo solar (CSA o CFV) en base a las condiciones del usuario o de la vivienda.
- Obtiene un diagnóstico sobre la factibilidad del uso de tecnología solar en la vivienda.
- Analiza los escenarios buscando opciones que no necesariamente implican el uso de un sistema CSA o CFV de tecnología de punta, no tiene como objetivo cubrir la totalidad de la demanda en la vivienda con el sistema solar y no tiene como prioridad configurar un sistema de alta eficiencia.
- El enfoque termoeconómico plantea los escenarios en que la tecnología solar se adapte al sistema convencional (calentador de gas, red eléctrica) de la manera más sencilla, con la mínima inversión posible, una configuración híbrida entre tecnología solar y convencional, cubrir una parte de la demanda energética que a mediano y largo plazo sea significativa.

- Los resultados desde el punto de vista termoeconómico facilitan la toma de decisiones sobre el uso adecuado y eficiente del recurso energético en la vivienda, mediante usos y costumbres que deben ser adoptados por los usuarios.

El estudio demuestra que existen acciones y medidas que favorecen el uso masivo de calentadores solares de agua en la vivienda de interés social en Mexicali, como lo son el subsidio, los créditos por bonos de carbono y financiamiento.

Las condiciones actuales en Mexicali permiten el empleo de calentadores solares de agua en la vivienda de interés social con grandes posibilidades de lograr su utilización de forma masiva en el sector doméstico.

El presente trabajo demuestra que el uso de la tecnología solar para calentamiento de agua de uso doméstico es viable desde el punto de vista técnico y económico, y que además cubre de manera significativa parte de la demanda de agua caliente para la vivienda de interés social con las siguientes características:

- Sea ocupada por al menos cuatro usuarios.
- Un consumo promedio de 3-4 kg de gas LP por persona para calentamiento de agua.
- Un ingreso mínimo de 2 a 5 SMD para viviendas de interés social y de 5 a 10 SMD para viviendas de nivel medio considerando el salario diario de \$52.59 correspondiente a la Zona A (STPS, 2008).
- Una demanda mínima de agua caliente promedio de 35 litros por persona diarios.

Para tales casos implicaría un ahorro en consumo de gas LP de 48 kg mensuales por vivienda de este tipo, lo que a su vez extrapolándolo a la demanda de vivienda nueva de interés social y media con ingresos por hogar menor a 5 SMD y menores a 12 SMD en la ciudad de Mexicali que suman 3680 viviendas (Hipotecaria Nacional, 2007), equivaldría a un ahorro en la ciudad de 1,059.84 toneladas métricas de gas LP al año cuyo subsidio es de

\$1.00 aproximadamente por kg, redirigido a subsidiar equipos de calentamiento de agua solar equivale a \$1,059,840 pesos por año de parte de viviendas nuevas con CSA, sin considerar al total de viviendas existentes. En emisiones no generadas por vivienda, para un consumo de 288 kg de gas LP anualmente (seis meses) se traduce en 0.71424 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> al año (1 ton de gas LP=2.48 ton métricas de CO<sub>2</sub>).

En cuanto al mercado de CSA considerando un equipo de 2 m<sup>2</sup> de área por vivienda se hay un potencial de 7360 m<sup>2</sup> de calentadores solares de agua cada año para cubrir la vivienda nueva de interés social y nivel medio en la ciudad de Mexicali.

Una vivienda de interés social requiere una inversión de \$11,000.00 para instalar el CSA y lograría un ahorro mensual de \$172.80 considerando una aportación solar de 80% con lo cual se pagaría la inversión en 6 años considerando un consumo de gas LP uniforme durante los meses de invierno para un sistema que tiene una vida útil de 25 años. Para un programa de financiamiento se requiere un capital de \$39,600,000.00 para atender anualmente 3600 viviendas, por lo cual el monto financiado total a 10 años es de 396 millones. Para una vivienda con un costo de más de \$300,000.00 y menos de 1 millón de pesos financiada a 10 años implica un incremento en la mensualidad de \$91.7 pesos, considerando que un financiamiento de la vivienda equivale a pagos mensuales de \$2,000.00 pesos aproximadamente.

El empleo de tecnología solar fotovoltaica no resulta viable económicamente para la vivienda de interés social en Mexicali, dado que la inversión y los costos implicados son demasiado elevados para ser cubiertos por el usuario aun incluyendo subsidios, apoyos y créditos. Por lo tanto, en ninguno de los escenarios propuestos de las situaciones posibles se encontró oportunidad para la tecnología fotovoltaica de baja generación con cualquiera de las metodologías utilizadas para los análisis de viabilidad técnica y financiera.

Refiriendo a las metodologías empleadas para el análisis de los escenarios propuestos, cada una presenta características muy particulares con ventajas, desventajas y opciones de mejora. Sin embargo, de las cuatro metodologías seleccionadas, la opción más adecuada para la evaluación de proyectos que involucran la utilización de CSA y CFV en la vivienda es RETScreen tanto en su versión para calentamiento de agua (RETScreen-SWH) y para sistemas fotovoltaicos (RETScreen-PV), debido principalmente a que está diseñada específicamente para la evaluación técnico-financiera.

HOMER y SSCA presentan carencias en cuanto a información que es importante considerar en el análisis de los sistemas CFV y CSA, como se describen en la Tabla 8.1, y no se recomiendan como métodos de análisis para proyectos de tecnología solar en viviendas del tipo objeto de este estudio.

En cuanto al modelo de simulación desarrollado en STELLA, simplifica el manejo de costos, la información técnica del equipo solar y detalla la información referente a la demanda y costos relacionados que definen las características de la vivienda y las necesidades reales del usuario.

Tabla 8.1. Ventajas y desventajas de las metodologías analizadas.  
Fuente: Este estudio.

Metodología.	Ventajas.	Desventajas.
<b>SSCA.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Simple y comprensible.</li> <li>*Manejable por cualquier persona.</li> <li>*Genera un diagnostico del caso.</li> <li>*Evalúa el diseño del CSA.</li> <li>*Realiza el análisis financiero del proyecto.</li> <li>*Presenta los resultados en términos de ahorro de combustible y económico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Realiza consideraciones inadecuadas para la demanda.</li> <li>*Sobrestima la eficiencia del sistema.</li> <li>*Sobrestima la cantidad de recurso solar aprovechado.</li> <li>*Considera un costo bajo para el CSA.</li> <li>*Utiliza el mes de Junio como base para el recurso solar.</li> <li>*No genera resultados sobre reducción de emisiones.</li> </ul>
<b>RETSscreen-SWH.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Información disponible de equipos desde base de datos.</li> <li>*Información ambiental disponible desde base de datos.</li> <li>*Detalle de los datos en base a la información disponible.</li> <li>*Análisis financiero detallado.</li> <li>*Análisis de emisiones.</li> <li>*Permite ingresar los datos técnicos de modo manual.</li> <li>*Cuenta con secciones bien definidas para manejo de la información.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*No permite configurar el sistema CSA.</li> <li>*No es posible especificar el diseño del CSA.</li> <li>*Utiliza un factor de demanda por encima del real.</li> <li>*Sobredimensiona la capacidad del sistema CSA.</li> <li>*No genera un diagnostico del caso.</li> </ul>

Tabla 8.1. Ventajas y desventajas de las metodologías analizadas (Cont).  
Fuente: Este estudio.

<p><b>HOMER.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Permite detallar el comportamiento de la demanda eléctrica horaria.</li> <li>*Permite la aplicación de tarifas horarias y mensuales.</li> <li>*Incluye una base de datos para algunos equipos.</li> <li>*Permite detallar gastos recurrentes.</li> <li>*Genera escenarios múltiples y selecciona el óptimo.</li> <li>*Permite comparar las alternativas de un mismo escenario.</li> <li>*Incluye el análisis del sistema con conexión a la red.</li> <li>*Genera un análisis de emisiones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*No contempla opciones de créditos, subsidios o financiamientos.</li> <li>*Los resultados que arroja están en términos que requieren ser interpretados.</li> <li>*No genera un diagnostico del caso.</li> </ul>
<p><b>RETScreen-PV.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Información técnica de equipos desde base de datos.</li> <li>*Información ambiental disponible desde base de datos.</li> <li>*Detalle de los datos en base a la información disponible.</li> <li>*Análisis financiero detallado.</li> <li>*Análisis de emisiones.</li> <li>*Permite ingresar los datos técnicos de modo manual.</li> <li>*Admite información de costos recurrentes.*Tiene secciones definidas para manejo de la información.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*No es posible configurar el sistema CFV por componentes.</li> <li>*No cuenta con análisis de la demanda.</li> <li>*No genera un diagnostico del caso.</li> <li>*No presenta información sobre el comportamiento horario mensual del sistema.</li> <li>*Se enfoca en el análisis financiero y de costos.</li> </ul>

El modelo de simulación en STELLA (Anexo 6) tiene la ventaja de estar programado de manera tal que permite reunir las ventajas de las metodologías anteriores en un solo modelo de análisis, es decir, cubre los aspectos técnicos, financieros, de costos y de demanda que maneja RETScreen incluidos de manera simplificada, también detalles adicionales de HOMER como el manejo de tarifas para la demanda eléctrica y detalle de la demanda por mes, y de SSCA la presentación de resultados en términos de ahorro energético, económico y de combustible.

Por lo tanto es recomendable utilizar el modelo de simulación para sistemas solares de STELLA en los casos de análisis de proyectos que involucran el uso de cualquiera de los sistemas (CSA o CFV) y para casos donde se analiza el uso conjunto de los sistemas, siendo esta última opción la mayor ventaja de esta metodología desarrollada en STELLA.

Como se explico en el Capítulo 4 la parte experimental de este trabajo no se realizó en base a un diseño de experimentos puesto que la intención de realizar las pruebas con los sistemas CSA y CFV tuvo el objetivo de identificar las variables, métodos de medición adecuados y de instrumentación de los sistemas, además de observar las alternativas probables de instalación y de operación de cada sistema.

De los datos obtenidos de manera experimental se concluye que un sistema CSA de placa plana similar al modelo FIREBALL de ACR International, es capaz de operar adecuadamente bajo las condiciones ambientales de la ciudad de Mexicali predominantes en la temporada invernal, eleva la temperatura del agua al menos a 40<sup>0</sup>C (temperatura mínima de uso) y hasta 60<sup>0</sup>C de modo que proporciona un fluido utilizable para las necesidades básicas de la vivienda, proporciona el volumen suficiente de agua caliente para cubrir en 80% la demanda de cuatro personas (120-140 litros por día) considerando que la demanda promedio es de 40 litros de agua caliente por persona.

Los datos obtenidos del sistema CFV mediante lecturas de la energía producida permiten concluir que el equipo es susceptible a bajar su eficiencia en condiciones como nublados parciales lo que provoca intermitencia en la generación de electricidad, debido a acumulación de polvo sobre la superficie fotovoltaica lo cual reduce la cantidad de energía aprovechada por el sistema CFV y por consecuencia su eficiencia.

De las mediciones realizadas en el mes de febrero se obtuvo que la mínima potencia fue 25% menor respecto a la máxima, es decir, 3.4 watts en el horario de 9:00 a 11:00 hrs, la máxima potencia medida fue de 4.5 watts para el horario de 12:00 a 14:00 hrs, sin embargo, hay que considerar que estos valores no son constantes ya que las lecturas fueron casi siempre por debajo del valor máximo, esto se debe a que el ángulo de inclinación y el calentamiento del panel fotovoltaico afectan su desempeño.

De las seis viviendas sujetas a monitoreo de consumo de agua caliente y consumo eléctrico, se obtuvo que el consumo promedio de gas LP por persona es de 2.6 kg por semana, es decir, es un valor de consumo por debajo del promedio que se maneja en 3.0 kg de gas LP por persona por semana para calentadores (boiler) usados según los datos de CONAVI que considera un consumo mensual de 48 kg de gas LP por vivienda en el caso de calentadores en uso y 32 kg de gas LP al mes por vivienda para calentadores nuevos (Conavi, 2008), la diferencia entre valores es poca y se debe a que las costumbres de los usuarios consisten básicamente en aprovechar el encendido del sistema (boiler) para utilizar la regadera. De los datos obtenidos de consumo de agua caliente se observó que las costumbres son relevantes en el uso y aprovechamiento de la energía térmica, ya que en base a la información recopilada se concluyó que los usuarios de las viviendas observadas consumen aproximadamente 30 litros del agua caliente contenida en el boiler, comparado con el valor de consumo promedio de agua caliente por usuario de 60 litros que proporciona CONAVI. Esto

último se puede justificar considerando que el consumo de 60 litros se basa en el volumen de agua utilizada después del mezclado (agua caliente-agua fría), ya que el agua calentada por el sistema (boiler) se encuentra por encima de la temperatura de uso.

Los simuladores para sistemas CSA (SSCA y RETScreen-SWH) utilizan valores de consumo promedio, considerando que el usuario presenta un comportamiento de consumo independiente, es decir, estiman el consumo para un solo usuario el cual se toma como factor que multiplica para un mayor número de usuarios, ejemplo de ello es el valor de cantidad de agua caliente por persona de 60 litros por día que utiliza RETScreen-SWH y el valor mensual de 4 kg de gas LP por persona que emplea SSCA.

En cuanto al consumo eléctrico en las viviendas monitoreadas, se observó que el mayor consumo en invierno corresponde al refrigerador dado que es un electrodoméstico que opera durante las 24 horas del día y consume relativamente mayor energía que los demás electrodomésticos. En cuanto al consumo eléctrico para fines de iluminación se observó que sólo en dos de las viviendas se contaban con focos ahorradores en la sala y cocina (donde existe mayor uso) mientras que en el resto de las viviendas se utilizan focos incandescentes de 75 y 100 watts, cada vivienda cuenta con al menos 5 focos para iluminar el interior de la casa, el menor tiempo de uso corresponde al foco del baño con 14 horas por semana, el foco de mayor tiempo de uso es el de la sala y cocina con aproximadamente 40 horas de uso a la semana. Se observó que la demanda de electricidad por concepto de iluminación es susceptible de ser satisfecha mediante el uso de CFV de baja capacidad y focos ahorradores, sin embargo, su implementación involucra superar la barrera que implica el costo de la inversión inicial para el sistema.

Los simuladores HOMER y RETScreen-PV tienen características que permiten complementarse entre sí, por ende es necesario integrar sus ventajas en el modelo de simulación

dinámica de STELLA para llevar a cabo análisis mucho más adecuados para los estudios de factibilidad de CSA y CFV en viviendas de interés social, que incluyan el factor de comportamiento de uso de la energía por parte de los usuarios dentro de los análisis técnico correspondiente.

Por todo lo anterior, se recomienda realizar un trabajo de campo a una muestra representativa de viviendas caracterizadas y debidamente instrumentadas, para obtener datos de monitoreo que pueden extrapolarse a las viviendas que entren dentro de la caracterización dada. De este modo la información recopilada puede ser validada y utilizada para evaluar y diagnosticar adecuadamente y de manera confiable los proyectos de uso de tecnología solar en viviendas de interés social. El modelo de simulación dinámica en STELLA debe ser trabajado más a detalle de manera que involucre cálculos más precisos y manejo de información validada correspondiente al trabajo de monitoreo así como condiciones particulares del usuario.

## **Nomenclatura.**

Nomenclatura.

$^{\circ}\text{C}$  = grados centígrados.

$C_{gas}$  = cantidad de gas consumida.

$C_p$  = capacidad calorífica del fluido.

$E$  = consumo promedio de energía para calentamiento de agua en la vivienda.

$Eff$  = eficiencia del calentador de agua.

$H_{TA_e}$  = radiación incidente en el colector.

$k$  = coeficiente que varía entre 0.2 y 0.4  $^{\circ}\text{C cm}^2/\text{mW}$ .

kg = kilogramos.

kWh = kilowatt- hora.

L = litros.

$m$  = flujo de fluido que pasa por el colector.

$^{\circ}\text{F}$  = grados Fahrenheit.

PC = poder calorífico del gas LP.

$P_p$  = potencia pico del panel a 25 $^{\circ}\text{C}$ .

$P_t$  = potencia de salida a la temperatura de trabajo  $T_t$ .

$q_{cs}$  = calor disipado por el colector solar.

$q_{cx}$  = calor disipado por las conexiones.

$q_{da}$  = calor disipado por el contenedor.

$q_{\text{útil}}$  = calor útil o calor aprovechado.

$R$  = valor de la radiación solar en  $\text{W}/\text{cm}^2$

$T_a$  = máxima temperatura ambiente.

$T_{fe}$  = temperatura de entrada del fluido.

$T_{fs}$  = temperatura de salida del fluido.

$T_t$  = temperatura de trabajo del panel.

$\delta$  = coeficiente de degradación.

$\Delta T$  = es el incremento de temperatura por sobre los 25<sup>0</sup>C.

$\eta_c$  = eficiencia del sistema.

$\theta$  = ángulo de inclinación.

## **Glosario.**

**Balance de energía.** Es el análisis de la energía que entra en un sistema, los cambios que sufre dentro de este y las formas en que la energía sale del sistema.

**Boiler.** Término en inglés que se refiere al calentador de agua que opera a base de gas o de electricidad.

**Calor específico.** Magnitud física que indica la capacidad de un material para almacenar energía interna en forma de calor, es decir, es la cantidad de energía necesaria para incrementar en una unidad de temperatura una cantidad de sustancia.

**Caracterización de la vivienda.** Consiste en identificar las características específicas de un tipo de vivienda que permite agruparlas dadas las consistencias entre estas, de modo que se pueda generalizar la información correspondiente.

**Calor útil.** Forma de energía en tránsito que puede ser aprovechada y utilizada en aplicaciones que requieren de energía térmica.

**Capacidad calorífica.** Es la razón de la cantidad de energía transferida a un cuerpo en un proceso cualquiera por su cambio de temperatura correspondiente, es decir, es la cantidad de energía necesaria para incrementar la temperatura de un cuerpo en un grado Kelvin (1 K).

**Coefficiente de degradación** Es la medida de la pérdida de eficiencia debida a la realización de ciclos del equipo.

**Colector solar.** Aparato de que sirve para captar la energía solar ya sea para fin fotovoltaico o térmico. Existen colectores de baja temperatura menor de  $65^{\circ}\text{C}$ , media de  $100^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$  y menos de  $500^{\circ}\text{C}$ , y alta mayor de  $500^{\circ}\text{C}$ .

**Cooler.** Término en inglés para referirse al sistema de enfriamiento evaporativo que utiliza el agua como fluido de intercambio de calor, y que se emplea comúnmente en la vivienda.

**Eficiencia.** Capacidad de un sistema de disponer de un recurso para lograr conseguir el efecto determinado.

**Energía convencional.** Tipo de energía que proviene de fuentes no renovables o de fuentes que se agotan como el gas, carbón y petróleo.

**Energía fotovoltaica.** Forma de energía eléctrica producida a partir de la radiación solar y de la utilización de paneles que captan dicha radiación.

**Energía térmica.** Forma de energía liberada en forma de calor que puede ser obtenida a partir de la combustión, por reacción nuclear, por reacción química, mediante energía eléctrica, etc.

**Energía termosolar.** Es el resultado de utilizar la energía del sol para fines térmicos (calentamiento).

**Escenario.** Es la representación de una situación alterna a la realidad donde interactúan los elementos y componentes bajo condiciones diferentes para las que se modifican las variables de análisis, con la finalidad de observar los efectos de tales modificaciones que se podrían esperar en la realidad.

**Factibilidad del proyecto.** Es un diagnóstico resultado de un análisis del proyecto a partir del cual se concluye que es posible llevar a cabo o que es realizable en la realidad y se espera que su resultado sea exitoso o que satisfaga las necesidades.

**Factibilidad sistémica.** Se define como el diagnóstico de viabilidad refiriéndose a los elementos y relaciones entre estos en un sistema o método que es realizable.

**Material fotovoltaico.** Material compuesto que dadas sus propiedades físicas y químicas permite absorber la energía solar y generar a partir de ella una corriente eléctrica, pueden ser monocristalinos y policristalinos.

**Módulo fotovoltaico.** Equipo que consta de un material especial capaz de convertir la energía solar captada en energía eléctrica.

**Potencia.** Se define como la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo.

**Radiación solar.** Energía emitida por el sol en forma de radiaciones electromagnéticas que al llegar a la superficie de la tierra se mide en energía por unidad de tiempo y área ( $W/m^2$ ).

**Simulador.** Es una herramienta (aparato o programa) que intenta replicar o reproducir el comportamiento de la forma más realista y precisa posible.

**Sistema híbrido.** Es aquel compuesto de dos o más sistemas que tengan la misma finalidad o que contribuyen a un fin, es decir, un sistema solar híbrido se conforma con una fuente de respaldo o que complementa su operación para poder cubrir una demanda energía ya sea eléctrica o térmica.

**Termoeconomía.** Es la ciencia en la que se unen la termodinámica y la economía en un sentido amplio, para tratar los costos monetarios o energéticos principalmente para la contabilidad, diagnóstico, mejora y diseño y particularmente la optimización de sistemas térmicos. (Antonio Valero Capilla).

**Viabilidad financiera.** Es la condición que evalúa la conveniencia de un sistema o proyecto, atendiendo a la relación que existe entre los recursos empleados para que se logre y aquellos recursos de que en realidad se cuentan.

**Viabilidad técnica.** Esta evalúa la conveniencia de un sistema o proyecto al que califica en función de sus características tecnológicas y de un determinado requerimiento, para determinar si es posible llevarlo a cabo satisfactoriamente y en condiciones de seguridad con la tecnología disponible, verificando factores de resistencia estructural, durabilidad, operatividad, de energía, de control, etc.

## **Bibliografía.**

1. ACR International, 2006. Solar Roofs, Manual de Instalación de CSA.
2. Anteproyectos de Norma de Colectores y Sistemas de Calentamiento de Agua. Cuernavaca, Morelos. Asociación Nacional de Energía Solar, A.C., 2002.
3. Atmospheric Science Data Center, NASA. Surface Meteorology and Solar Energy. <http://eosweb.larc.nasa.gov>
4. Cinsa, 2008. Detalles y especificaciones de depósitos (boilers). [www.cinsaboilers.com.mx](http://www.cinsaboilers.com.mx)
5. Comisión nacional de vivienda (CONAVI), 2008. Desarrollo habitacional sustentable ante el cambio climático.
6. Comisión nacional para el ahorro de energía (CONAE), 1999. Programa de evaluación Técnico-Financiera para sistemas solares para calentamiento de agua en el sector doméstico.
7. Consejo de desarrollo económico de Mexicali A.C. (CDEM), 2003. Identificación y definición del impacto social y económico de la problemática del servicio eléctrico y sus alternativas de solución. Instituto de Ingeniería, Área de sistemas energéticos, UABC.
8. Energy analysis. National renewable energy laboratory (NREL), [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)
9. Guevara Vásquez Sixto, 2003. Teoría para el Diseño de Calentadores de Agua. Lima, Perú.
10. Hipotecaria nacional, 2007. Estudio de mercado de vivienda en: Baja California 2007.
11. Homex, 2008. Característica de la vivienda de Mexicali. [www.homex.com.mx](http://www.homex.com.mx)

12. INEGI, 2005. II Censo de Población y Vivienda, Mexicali 2005.  
[www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
13. Instalaciones Fotovoltaicas. IKARUS, Solarsysteme. [www.ikarus-solar.de](http://www.ikarus-solar.de)
14. Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Cd. Juárez, Chihuahua.
15. Isee systems, Inc., 2007. Stella for education and research. [www.iseesystems.com](http://www.iseesystems.com)
16. L. Gasquet, Héctor, 2004. Manual Teórico y Práctico de Sistemas Fotovoltaicos. SOLARTRONIC S.A. de C.V.
17. Paz Gutiérrez, Jenaro Carlos, 2006. Colectores Solares Planos, Construcción vol. 2.
18. PROY-NMX-ES-001-NORMEX-2005, Energía solar-rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua-métodos de prueba y etiquetado, Febrero 2008.
19. Retscreen international, 2007. Natural Resources Canada. [www.nrcan.gc.ca](http://www.nrcan.gc.ca)
20. S. Nandwani, Shyam, 2005. Energía Solar; Conceptos Básicos y su Utilización. Costa Rica, Junio 2005.
21. Secretaría del trabajo y previsión social (STPS). Comisión nacional de salarios mínimos. Salarios mínimos vigentes 2008.
22. Solar Fotovoltaica, 2002. Manuales sobre energía renovable.
23. The optimization model for distributed power. National renewable energy laboratory (NREL), [www.analysis.nrel.gov/homer](http://www.analysis.nrel.gov/homer), 2007.
24. Tomas Perales, Benito, 2005. Guía del Instalador de Energías Renovables. Creaciones Copyright.

25. Valero Capilla, Antonio, 1998. Termoeconomía: El punto de encuentro de la termodinámica, la economía y la ecología. Centro de Investigación del Rendimiento de Centrales Eléctricas (CIRCE).

## **ANEXO 1.**

## **PASOS PARA UNA INSTALACION SEGURA DEL EQUIPO CSA.**

1. Identificar y familiarizarse con el material y partes del equipo.
2. Reunir los materiales y herramientas necesarios para realizar el armado e instalación.
3. Identificar el lugar adecuado para la instalación del equipo y las conexiones que se usarán.
4. Preparar el lugar seleccionado para colocar el CSA.
5. Llevar herramientas, materiales y partes lo más cercas del lugar de instalación.
6. Realizar el ensamble y armado del CSA.
7. Realizar el ensamble y armado de la base o soporte.
8. Orientar la base o soporte del CSA según corresponda.
9. Instalar y fijar el soporte o base del CSA.
10. Colocar el CSA sobre la base con la inclinación que corresponda.
11. Asegurar el CSA a la base.
12. Verificar que todas las partes y uniones estén bien.
13. Realizar el conexionado de tuberías entre CSA y el contenedor de agua caliente (deposito).
14. Revisar el sistema completo y realizar la prueba de este.
15. En caso de fugas o mal funcionamiento se revisa el sistema, de lo contrario se procede a aislar la tubería expuesta y asegurarla.

## **ANEXO 2.**

## ALGUNOS ANCLAJES Y SOPORTES PARA EL EQUIPO.

Para instalar el equipo solar (CSA o CFV) es necesario seleccionar un lugar, ya sea en el techo o a nivel del suelo, con las siguientes características:

- Un techo firme.
- Un área insolada.
- Un lugar libre de sombras.
- Área protegida a nivel del suelo.

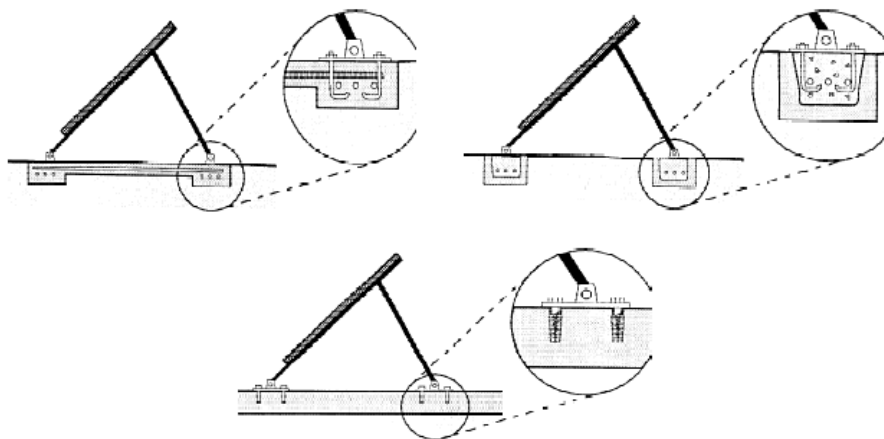


Figura A 2.1. Anclaje del soporte al suelo.  
(Fuente: [www.solartronic.com](http://www.solartronic.com))

## **ANEXO 3.**

## **PASOS PARA UNA INSTALACION SEGURA DEL EQUIPO CFV.**

1. Identificar y familiarizarse con el material y partes del equipo.
2. Reunir los materiales y herramientas necesarios para realizar el armado e instalación, así como equipo de seguridad.
3. Identificar el lugar adecuado para la instalación del equipo y las conexiones que se usarán.
4. Preparar el lugar seleccionado para colocar el CFV.
5. Llevar herramientas, materiales y partes lo más cerca del lugar de instalación.
6. Realizar el ensamble y armado del CFV.
7. Realizar el ensamble y armado de la base o soporte.
8. Orientar la base o soporte del CFV según corresponda.
9. Instalar y fijar el soporte o base del CFV.
10. Colocar el CFV sobre la base con la inclinación que corresponda.
11. Asegurar el CFV a la base.
12. Verificar que todas las partes y conexiones estén bien.
13. Realizar el conexionado de cables entre CFV y el aparato o equipo que utilizará la energía.
14. Revisar que todas las partes están en su lugar, verificar que las conexiones del cableado sean las correctas y asegurarse de que en la caja de fusibles del CFV no exista contacto entre los cables que puedan ocasionar un corto circuito.
15. Realizar la prueba del circuito, utilizando el equipo de seguridad y la secuencia indicada en el manual.

16. En caso de mal funcionamiento revisar nuevamente las conexiones del sistema fotovoltaico y verificar la secuencia de prueba del circuito.

## **ANEXO 4.**

## **EQUIPOS Y ACCESORIOS PARA UN SISTEMA CFV.**

Los dos casos anteriores de instalaciones de CFV implican la utilización de equipo y accesorios necesarios para realizar procesos de acumulación, adaptación y aplicación. Por ello el sistema tiende a volverse complejo, en consecuencia dichos procesos se dividen en varios bloques:

- **De generación.** Se constituye de la celda fotovoltaica.
- **De acumulación.** Se compone principalmente de la batería solar y algunos accesorios necesarios para su instalación y operación.
- **De monitoreo.** Es el componente que permita observar el estado de carga de las baterías.
- **De carga.** Circuitos de entrada en el interior de una casa, que se puede referir como la caja de fusibles.
- **De cableado.** Materiales y características de los cables que se necesitan para el tipo de instalación considerando las características de funcionamiento y operación del sistema [L. Gasquet, 2004, ref3].

## **ANEXO 5.**

Tabla A.5.1. Índice de claridad y radiación disponible mensual.  
Fuente: Atmospheric science data center, NASA, 2008.

Recurso solar disponible Latitud 32 norte, Longitud 114 oeste (ciudad de Mexicali)		
Mes	Índice de claridad	Radiación diaria kWh/m <sup>2</sup> /d
Enero	0.625	3.494
Febrero	0.638	4.377
Marzo	0.671	5.74
Abril	0.683	6.917
Mayo	0.694	7.709
Junio	0.691	7.927
Julio	0.669	7.537
Agosto	0.669	6.997
Septiembre	0.684	6.198
Octubre	0.683	5.014
Noviembre	0.665	3.899
Diciembre	0.615	3.189

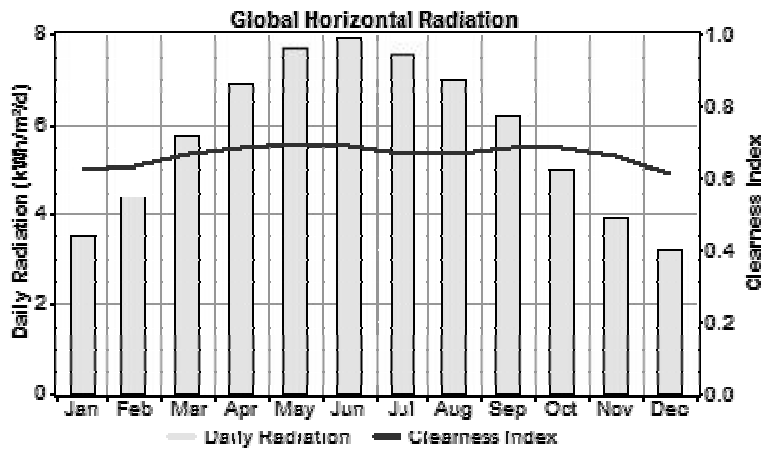


Figura A 5.1. Gráfica de radiación solar horizontal y del índice de claridad diarios de Enero a Diciembre.  
Referencia: HOMER, datos de entrada de recurso solar.

Valores utilizados por HOMER obtenidos de la base de datos de referencia de NASA, dados en base a las coordenadas latitud y longitud del lugar del proyecto (ciudad de Mexicali).

## **Anexo 6.**



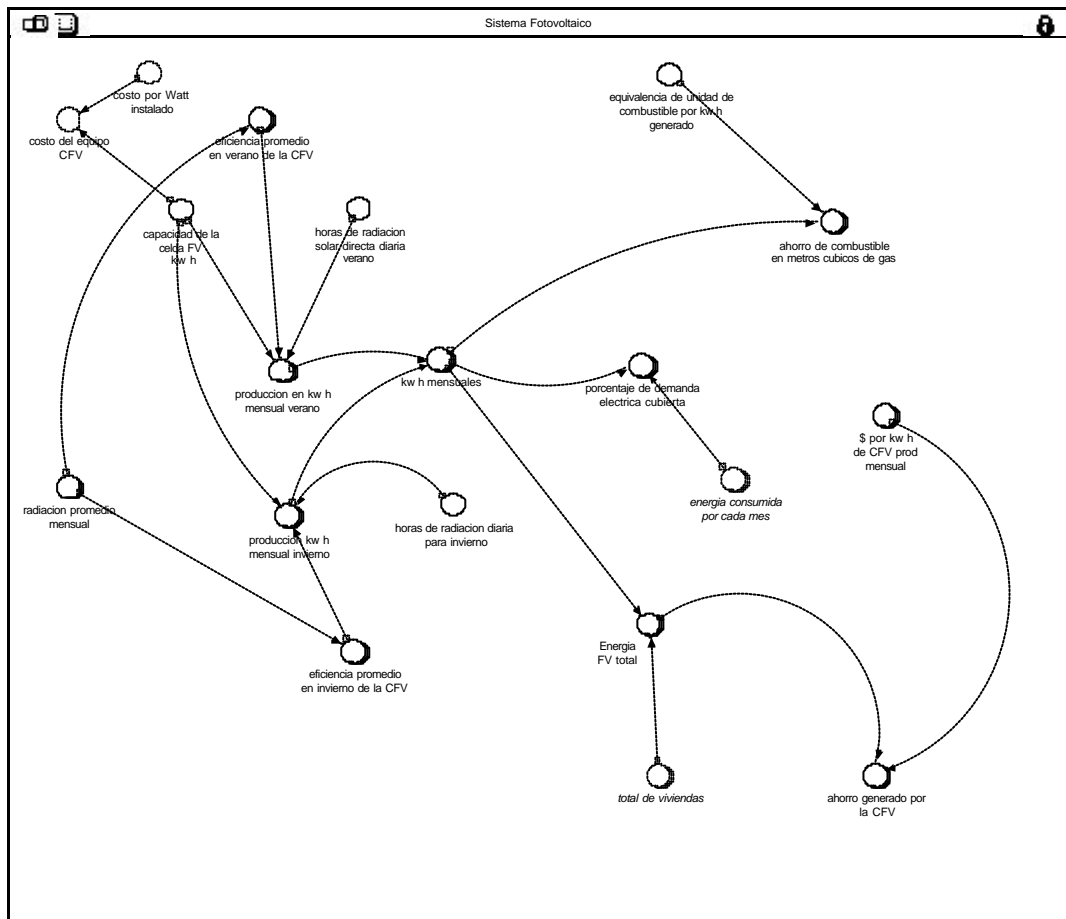


Figura A 6.2. Submodelo en STELLA del sistema fotovoltaico (CFV).  
Fuente: Este estudio.

El modelo de análisis para el CFV recopila la información del factor técnico del CFV, de demanda eléctrica y de recurso solar disponible, para determinar en base a características de capacidad y eficiencia del CFV la energía eléctrica suministrada por el sol. Además, estima el ahorro generado por el sistema CFV en base a un costo evitado por kWh.

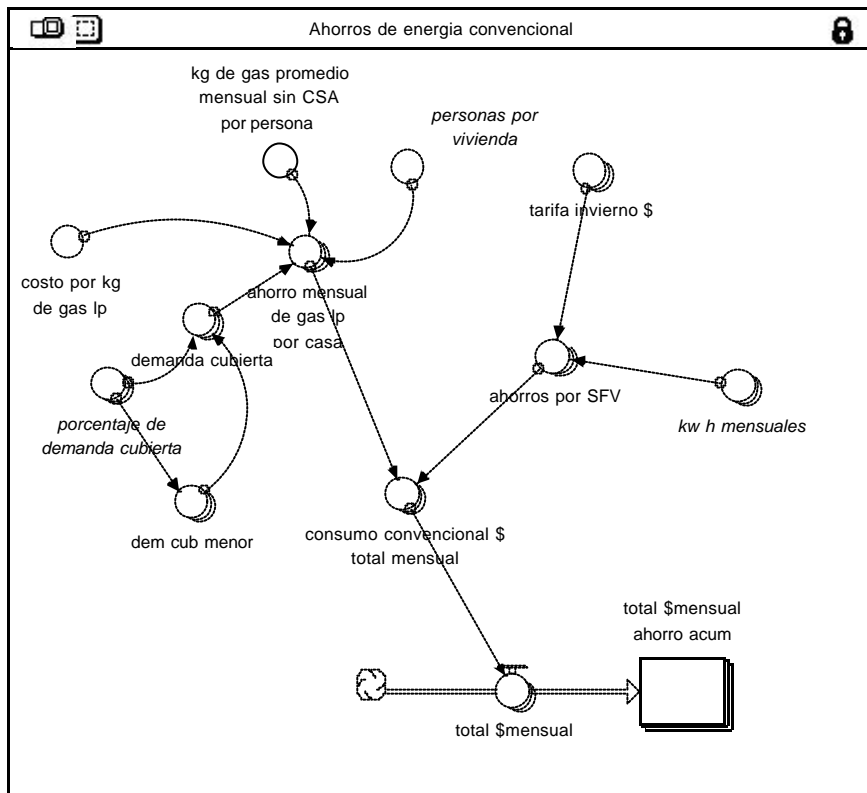


Figura A 6.3. Submodelo de ahorros generados por los sistemas solares CSA y/o CFV.  
Fuente: Este estudio.

Este modelo realiza los cálculos necesarios para estimar, en base a los costos de energía convencional (gas LP y electricidad), los ahorros generados mes a mes para los 25 años de vida que se considera para los equipos CFV y CSA. Los resultados generan una aproximación del tiempo de recuperación de la inversión, a partir del cual se concluye la "Factibilidad" o "No factibilidad" del proyecto, que en este caso se considera a una sola vivienda, que es representativa de un conjunto.

SFV= sistema fotovoltaico.

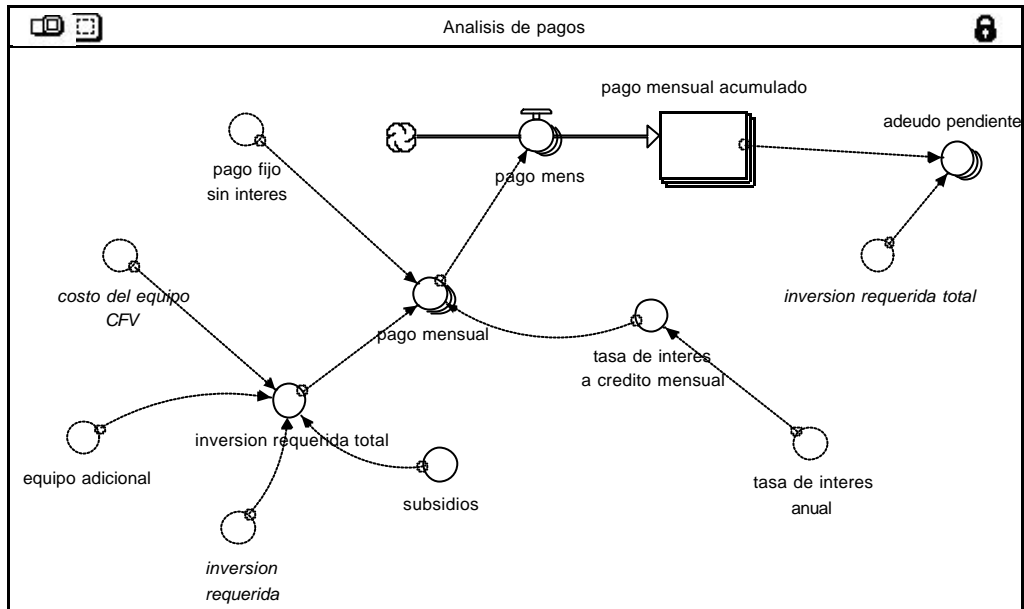


Figura A 6.4. Submodelo en STELLA . A nálisis de pagos para cubrir la inversión para los sistemas solares.  
Fuente: Este estudio.

En este modelo se ingresa la información referente al factor económico tales como inversión requerida, cantidad subsidiada o apoyo financiero, costo neto del sistema(s), tasa de interés (dado el caso de créditos), pagos sugeridos mensuales y el acumulado del pago mensual respecto a la deuda.