



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO SOLAR DE
AGUA PARA SERVICIOS COMERCIALES EN LA CD. DE MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
CLAUDIA ANGÉLICA FLORES BARRIOS

TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)
AUGUSTO SÁNCHEZ CIFUENTES, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. DICIEMBRE 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Reinking Cejudo Arturo Guillermo

Secretario: M. en I. Sánchez Cifuentes Augusto

Vocal: Dra. Escobedo Izquierdo M. Azucena

1^{ER}. Suplente: Dr. Álvarez Watkins Pablo

2^{DO}. Suplente: Dra. Moreno Coronado Tanya

Lugar donde se realizó la tesis:
MÉXICO D.F., POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

AUGUSTO SÁNCHEZ CIFUENTES

FIRMA

Agradecimientos

Con mucho amor agradezco a mi familia por darme su apoyo incondicional y acompañarme en el camino de mi vida.

A la UNAM, por brindarme los elementos para llevar a cabo mi tesis.

Al profesor Augusto Sánchez Cifuentes por su gran apoyo para lograr mi tesis.

A los miembros de mi jurado, en especial al Dr. Pablo Álvarez Watkins por sus valiosos comentarios al presente trabajo.

Al personal del restaurante que se analizó en este proyecto por abrirme sus puertas y permitirme realizar mi tesis.

Índice General

| | |
|---|-----------|
| JUSTIFICACIÓN..... | 1 |
| OBJETIVOS..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| CAPITULO 1. | |
| PANORAMA DEL CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN MÉXICO..... | 6 |
| 1.1 Energía solar..... | 6 |
| 1.1.1 Aplicaciones de la energía solar térmica..... | 6 |
| 1.1.2 Calentamiento de agua a baja temperatura..... | 7 |
| 1.1.3 Situación actual del calentamiento solar de agua en México..... | 8 |
| 1.1.4 Programas y acciones para incentivar el uso de la energía solar en México..... | 12 |
| 1.1.5 Normas aplicables en el calentamiento solar de agua..... | 15 |
| 1.2 Tecnologías para el calentamiento solar de agua..... | 19 |
| 1.2.1 Colectores solares..... | 20 |
| 1.3 Uso actual del calentamiento solar de agua en México..... | 28 |
| 1.3.1 Potencial de aprovechamiento..... | 30 |
| CAPITULO 2. | |
| DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO..... | 33 |
| 2.1 Panorama nacional del gas l.p..... | 33 |
| 2.2 Descripción del caso de estudio..... | 37 |
| 2.3 Consumo de gas l.p del restaurante..... | 38 |
| 2.3.1 Índice de consumo de gas lp por comensal..... | 41 |
| 2.3.2 Índice de consumo de agua por comensal..... | 41 |
| 2.4 Sistema convencional de calentamiento de agua..... | 43 |
| 2.4.1 Usos del agua caliente..... | 44 |
| 2.5 Estimación del volumen diario de agua caliente..... | 45 |
| 2.6 Sistema actual de calentamiento solar de agua..... | 47 |
| 2.6.2 Imágenes con cámara termográfica..... | 50 |
| 2.7 Ahorro de combustible con la instalación de calentamiento solar actual..... | 54 |
| CAPÍTULO 3. | |
| MARCO TEÓRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA..... | 59 |
| 3.1 Metodología de un proyecto de calentamiento solar de agua..... | 59 |
| 3.2 Dimensionamiento básico de instalaciones solares térmicas a baja temperatura..... | 60 |
| 3.3 Aspectos teóricos en el diseño de instalaciones solares térmicas..... | 64 |
| 3.3.1 Orientación e inclinación de los colectores..... | 64 |
| 3.3.2 Distancia entre filas de colectores..... | 64 |

| | |
|--|----|
| 3.3.3 Conexión entre colectores..... | 67 |
| 3.3.4 Conexión en serie..... | 68 |
| 3.3.5 Conexión en paralelo | 69 |
| 3.3.6 Conexiones para banco de captadores..... | 69 |
| 3.3.7 Tanque de almacenamiento | 73 |
| 3.3.8 Sistema de control | 74 |
| 3.4 Análisis del diseño del sistema actual de calentamiento solar de agua..... | 75 |

CAPITULO 4

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA AL CASO DE ESTUDIO

| | |
|--|-----|
| 4.1 Descripción de las necesidades del lugar | 78 |
| 4.2 Consumo de agua caliente sanitaria (ACS) | 78 |
| 4.3 Cálculo de la demanda energética con la metodología de la norma ambiental del DF | 80 |
| 4.4. Metodología descrita en el Código Técnico de Edificación (CTE) | 82 |
| 4.5 Cantidad de calor requerido | 84 |
| 4.6 Contribución solar | 85 |
| 4.7 Eficiencia de un colector solar plano..... | 86 |
| 4.8 Características del colector solar plano elegido | 88 |
| 4.9 Radiación solar diaria | 89 |
| 4.10 Área de captación..... | 90 |
| 4.11 Análisis de la contribución solar de los tres criterios considerados..... | 92 |
| 4.12 Volumen del depósito | 97 |
| 4.13 Resumen de los criterios analizados | 97 |
| 4.14 Método de la carta- <i>f</i> | 98 |
| 4.14.1 Cálculo del parámetro Y | 99 |
| 4.14.2 Cálculo del parámetro X..... | 101 |
| 4.14.3 Fracción <i>f</i> | 102 |

CAPÍTULO 5.

DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA PROPUESTO

| | |
|--|-----|
| 5.1 Orientación e inclinación de los colectores | 104 |
| 5.2 Distancia entre filas de colectores | 104 |
| 5.3 Conexión del campo de colectores de la propuesta | 104 |
| 5.4 Distribución de los colectores en la azotea..... | 104 |
| 5.5 Caudal del fluido de trabajo | 108 |
| 5.6 Dimensionamiento de la tubería | 109 |
| 5.7 Tanque de almacenamiento | 113 |
| 5.8 Evaluación de ahorros de la propuesta | 114 |

| | |
|---|-----|
| 5.9 Propuesta con colectores solares heat pipe | 118 |
| 5.9.1 Características del colector solar elegido..... | 119 |
| 5.9.2 Área de captación con colectores heat pipe..... | 120 |
| 5.9.3 Contribución solar | 121 |
| 5.9.4 Volumen del depósito de acumulación | 122 |
| 5.9.5 Conexión entre colectores..... | 124 |
| 5.9.6 Evaluación de ahorros de la propuesta con colectores heat pipe | 125 |
| 5.10 Comparación entre el sistema actual y las propuestas presentadas. | 128 |
| CONCLUSIONES | 131 |
| APÉNDICE 1 | 134 |
| APÉNDICE 2..... | 136 |
| APÉNDICE 3..... | 139 |
| APÉNDICE 4..... | 140 |
| APÉNDICE 5..... | 142 |
| APÉNDICE 6..... | 149 |
| BIBLIOGRAFÍA | 150 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Calentadores solares instalados en México en miles de metros cuadrados. | 28 |
| Tabla 2. Superficie instalada de calentadores solares y su participación porcentual por sector en México para 2006, 2008 y 2010. | 29 |
| Tabla 3. Oferta nacional de gas LP en México de 2000 a 2013 en miles de barriles diarios. | 33 |
| Tabla 4. Ventas por sector de gas LP en México de 2000 a 2011 en miles de barriles diarios. | 34 |
| Tabla 5. Valores promedio, máximos y mínimos del consumo de gas de noviembre de 2010 a mayo de 2013. | 40 |
| Tabla 6. Valores promedio obtenidos como porcentaje de agua caliente del total del volumen y su respectivo porcentaje de gas. LP. | 46 |
| Tabla 7. Consumos de gas LP considerando que del agua potable un cierto porcentaje es agua caliente. | 55 |
| Tabla 8. Valores promedio de algunos índices antes de la instalación del sistema de CSA. | 56 |
| Tabla 9. Valores promedio de algunos índices después de la instalación del sistema de CSA y variación. | 56 |
| Tabla 10. Ahorro de gas LP y valores asociados considerando fijo el porcentaje de agua y la temperatura que alcanza el agua almacenada en el termotanque solar. | 58 |
| Tabla 11. Ángulos de inclinación establecidos dado el periodo de utilización. | 64 |
| Tabla 12. Características del sistema actual de calentamiento. | 75 |
| Tabla 13. Extracto de la Tabla "Dotación mínima de agua potable y distribución por tipo de establecimiento" de la NADF-008 AMBT 2005 para centros de reunión. | 78 |
| Tabla 14. Valores promedio del consumo de agua potable en litros/comensal por día y de agua caliente como el 30% de ese valor. | 79 |
| Tabla 15. Extracto de la Tabla de Demanda de referencia a 60C del HE-4 del CTE español. | 79 |
| Tabla 16. Parámetros de referencia para el cálculo del consumo energético anual por utilización de agua caliente (CEA). | 80 |
| Tabla 17. Comparación entre el CEA al 100%, al 70% y al 30% obtenido con el consumo de agua de referencia en la norma y con el obtenido de los consumos del restaurante. | 81 |
| Tabla 18. Tres valores de referencia del consumo de agua caliente unitario del restaurante. | 82 |
| Tabla 19. Comparación entre los litros de agua caliente por día de acuerdo al criterio de la Norma Ambiental del DF, los consumos medidos de agua y al criterio del CTE. | 83 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 20. Comparación entre el calor total requerido mensualmente en kWh para las tres demandas unitarias de agua caliente consideradas..... | 84 |
| Tabla 21. Contribución solar al 70% de las necesidades energéticas mensuales. | 86 |
| Tabla 22. Características del colector solar CHROMAGEN CR-120 | 88 |
| Tabla 23. Dimensiones del colector solar CHROMAGEN CR-120..... | 88 |
| Tabla 24. Irradiación global promedio diaria para una superficie horizontal y para una superficie inclinada a 20 grados. | 89 |
| Tabla 25. Eficiencia teórica promedio mensual del colector solar Chromagen CR-120..... | 90 |
| Tabla 26. Área de captación para los tres criterios de consumo y un 10% más que se considera pérdidas..... | 91 |
| Tabla 27. Aporte solar con el criterio de demanda de la norma ambiental del DF. | 92 |
| Tabla 28. Aporte solar con el criterio de demanda de que el 30% del consumo total agua es agua caliente..... | 94 |
| Tabla 29. Aporte solar con el criterio de demanda del CTE..... | 95 |
| Tabla 30. Cálculo del volumen del depósito de acumulación. | 97 |
| Tabla 31. Resumen de los valores calculados para los tres criterios de consumo de agua. | 98 |
| Tabla 32. Definición de parámetros | 99 |
| Tabla 33. Cálculo del parámetro Y. | 100 |
| Tabla 34. Definición de variables para el cálculo de X | 101 |
| Tabla 35. Cálculo del parámetro X. | 102 |
| Tabla 36. Cobertura solar mensual y anual..... | 103 |
| Tabla 37. Resumen del caudal por tramo y diámetros | 110 |
| Tabla 38. Resumen de los diámetros, velocidades y pérdidas de carga para cada tramo. | 112 |
| Tabla 39. Propuesta para el volumen de acumulación del caso de estudio..... | 113 |
| Tabla 40. Resumen de la propuesta..... | 114 |
| Tabla 41. Evaluación de ahorros de la propuesta 1. | 115 |
| Tabla 42. Evaluación económica de la propuesta. | 117 |
| Tabla 43. Resumen de la demanda de agua caliente, energía total requerida y el 70% de la misma..... | 118 |
| Tabla 44. Características del colector solar He Jia HCA-58/30 | 119 |
| Tabla 45. Dimensiones del colector solar He Jia HCA-58/30..... | 119 |
| Tabla 46. Eficiencia promedio del colector solar heat pipe | 121 |
| Tabla 47. Cálculo del área de captación solar | 121 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 48. Aporte solar correspondiente a 23 colectores heat pipe en kWh/mes y en porcentaje..... | 122 |
| Tabla 49. Volumen del termotanque para el caso de colectores heat pipe..... | 122 |
| Tabla 50. Resumen de la propuesta con colectores heat pipe | 125 |
| Tabla 51. Evaluación de ahorros de la propuesta con colector heat pipe | 126 |
| Tabla 52. Evaluación económica de la propuesta. | 127 |
| Tabla 53. Comparación entre las propuestas presentas y el sistema de calentamiento solar actualmente funcionando..... | 128 |
| Tabla 54. Comparación entre las demandas de agua caliente al 30% y al 50% del consumo total del restaurante, con 10litros/comida-día. | 129 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Producción mundial de energía 2010. | 4 |
| Figura 2. Consumo energético final (2011) en México por sectores..... | 8 |
| Figura 3. Consumo energético del sector residencial, comercial y público y su participación porcentual dentro de su propio sector (2011). | 9 |
| Figura 4. Usos de la energía en la vivienda urbana per cápita en México 1996 (por usos finales)..... | 10 |
| Figura 5. Consumo de energía estimado para el calentamiento de fluidos a baja temperatura en México (2001 a 2011)..... | 11 |
| Figura 6. Dos diseños diferentes de paneles solares de plástico..... | 20 |
| Figura 7. Partes principales de un colector solar plano. | 21 |
| Figura 8. Partes principales de un tubo al vacío..... | 23 |
| Figura 9. Calentador solar de tubos al vacío con termotanque de almacenamiento integrado..... | 24 |
| Figura 10. Calentador solar de al vacío. Sistema con cabezal para grandes proyectos de abastecimiento de agua..... | 24 |
| Figura 11. Detalle de los tubos heat pipe. El de la izquierda está abierto para mostrar las partes que se alojan en su interior. | 25 |
| Figura 12. Diagrama de los tubos heat pipe cuando están dentro de un tanque térmico.. | 26 |
| Figura 13. Colector solar de tubos heat pipe con cabezal. | 26 |
| Figura 14. Gráfica de la eficiencia de conversión para varios tipos de colectores | 27 |
| Figura 15. Miles de metros cuadrados de calentadores solares instalados en México desde 2001 a 2012..... | 29 |
| Figura 16. Superficie instalada en miles de metros cuadrados de calentadores solares por tipo de aplicación para 2006, 2008 y 2010 en México..... | 30 |
| Figura 17. Estimación de la instalación anual de calentadores solares de agua en millones de metros cuadrados para 2013-2027 para los escenarios de Planeación, Alto y Bajo..... | 31 |
| Figura 18. Evolución de la capacidad acumulada de calentamientos solar de agua 2013-2027 en México (millones de m ² de calentadores solares de agua)..... | 32 |
| Figura 19. Estimación del ahorro de gas LP en el consumo residencial por mejoras técnicas y cambio en los patrones de consumo, 2002-2012 (Miles de barriles diarios). | 35 |
| Figura 20. Precio promedio nacional del gas LP en pesos por kilogramos (precios antes de IVA) para el periodo de marzo de 2001 a marzo de 2014..... | 36 |
| Figura 21. Áreas que conforman la cocina, que se ubica en la planta baja..... | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 22. Planta alta y azotea (delimitada en color azul)..... | 39 |
| Figura 23. Consumo promedio mensual de gas LP histórico de noviembre de 2010 a junio de 2013. | 40 |
| Figura 24. Litros promedio de gas LP por comensal de noviembre de 2010 a mayo de 2013. | 41 |
| Figura 25. Consumo mensual total de agua potable del restaurante (m ³). | 42 |
| Figura 26. Índice del consumo total de agua potable por comensal, valor promedio mensual..... | 42 |
| Figura 27. Diagrama de la distribución de agua potable en el restaurante. | 43 |
| Figura 28. Calentador a gas LP marca comercial MASSTERCAL similar al que tienen en el restaurante. | 43 |
| Figura 29. Imágenes del campo de colectores. Toma frontal. | 47 |
| Figura 30. Imágenes del campo de colectores. Vista frontal..... | 48 |
| Figura 31. Imágenes del campo de colectores. Vista lateral de la primera fila. | 48 |
| Figura 32. Imágenes del campo de colectores. Vista lateral..... | 49 |
| Figura 33. Imágenes de los tanques de almacenamiento. Vista superior. | 49 |
| Figura 34. Ubicación y lectura de las temperaturas medidas con el termopar. | 51 |
| Figura 35. Imágenes termograficas seleccionadas del campo de colectores y sus temperaturas..... | 52 |
| Figura 36. Tubería principal de alimentación de agua al campo de colectores. | 53 |
| Figura 37. Salida de agua de la última fila de colectores solares. | 53 |
| Figura 38. Índice del consumo total de gas LP por cliente..... | 54 |
| Figura 39. Consumo total de agua por comensal por día..... | 55 |
| Figura 40. Consideraciones básicas para el diseño de un sistema de calentamiento solar de agua..... | 60 |
| Figura 41. Angulo de inclinación de un colector solar..... | 64 |
| Figura 42. Descripción de diferentes ángulos solares..... | 65 |
| Figura 43. Distancia mínima entre filas de colectores..... | 66 |
| Figura 44. Ejemplos de casos para d y h según el PCT del IDAE. | 67 |
| Figura 45. Tipos de conexiones entre captadores..... | 68 |
| Figura 46. Conexión en serie de captadores. | 68 |
| Figura 47. Opciones de conexionado entre bancos de colectores: mixto (izq.) y en paralelo con retorno invertido (der.) | 71 |
| Figura 48. Conexión mixta, paralelo entre colectores y cada banco en serie. | 71 |

| | |
|---|-----|
| Figura 49. Tipos de válvulas, izquierda a derecha, válvula eliminadora de aire, de esfera y dos tipos de válvula check. | 72 |
| Figura 50. Conexión en serie invertida para termotanques..... | 74 |
| Figura 51. Distribución del sistema solar actual y diámetro de las tuberías de alimentación. | 76 |
| Figura 52. Distribución propuesta para la fila 1..... | 77 |
| Figura 53. Conexiones principales entre los tanques de almacenamiento. | 77 |
| Figura 54. Comparación entre la demanda de agua caliente con los tres criterios seleccionados: NADF, 30% del consumo medido de agua potable y CTE..... | 83 |
| Figura 55. Gráfica de la energía requerida para elevar la temperatura del agua a 60C para los tres criterios de demanda de agua considerados: NADF, 30% del consumo medido de agua potable y CTE..... | 85 |
| Figura 56. Curva de eficiencia para el calentador solar Chromagen CR-120. | 87 |
| Figura 57. Aporte solar de 14 colectores al total de energía requerida para calentar agua. | 93 |
| Figura 58. Variación del aporte solar (%) a lo largo del año..... | 93 |
| Figura 59. Aporte solar de 28 captadores al total de la energía requerida para calentar agua..... | 94 |
| Figura 60. Variación del aporte solar (%) a lo largo del año..... | 95 |
| Figura 61. Aporte solar de 30 captadores solares (en azul) y la energía restante (en rojo) que completa el total de la energía requerida de acuerdo a los datos de la Tabla 29. | 96 |
| Figura 62. Variación del aporte solar (%) a lo largo del año..... | 96 |
| Figura 63. Conexión propuesta entre colectores planos. | 105 |
| Figura 64. Medidas de un espacio en la azotea para la instalación..... | 106 |
| Figura 65. Distribución de los colectores y tanques de almacenamientoe en la azotea del lugar. | 107 |
| Figura 66. Tramos de los que se compone el campo de colectores..... | 110 |
| Figura 67. Pérdida de carga en mm c.a. por m para tubería de cobre..... | 111 |
| Figura 68. Aporte solar en kWh/mes para la propuesta con tubos heat pipe..... | 123 |
| Figura 69. Aporte solar (%) para la propuesta con tubos heat pipe..... | 123 |
| Figura 70. Conexión propuesta de los colectores heat pipe..... | 124 |
| Figura 71. Consumo total de gas LP con sistema de calentamiento solar y sin sistema de calentamiento solar..... | 126 |
| Figura 72. Comparación de demandas de agua caliente. | 130 |

JUSTIFICACIÓN

El método convencional de calentamiento de agua se realiza por medio de la quema de un combustible fósil como el gas LP, gas natural, diesel, combustóleo o la leña. En cambio, la energía solar representa una alternativa para obtener agua caliente con los siguientes beneficios:

- Beneficios económicos. Se aprovecha la energía gratuita del sol, que significa una disminución en los costos de combustibles para calentar agua.
- Beneficios ambientales. Una disminución en el uso de combustibles fósiles representa un menor número de emisiones de gases de efecto invernadero causantes del cambio climático global.
- Beneficios técnicos. Resulta más eficiente en términos energéticos calentar agua para uso sanitario por medio de la energía solar.

Pese a que el calentamiento solar de agua es una de las aplicaciones de la energía solar más conocidas, probadas y también de las más rentables tanto para la aplicación residencial y comercial aún no son sistemas de aplicación general en México por lo que es pertinente demostrar las bondades técnicas y económicas de estos proyectos.

El éxito de un proyecto se deberá a una correcta identificación de necesidades, un buen dimensionamiento, una adecuada elección de tecnología así como de una instalación profesional que prevenga fallas y tenga un programa de mantenimiento.

OBJETIVOS

El propósito de este trabajo consiste en analizar un sistema de calentamiento solar de agua de un restaurante ubicado en la Ciudad de México y compararlo con una propuesta desarrollada con base a la metodología aquí descrita, también realizar la evaluación económica del sistema propuesto y evaluar los ahorros energéticos obtenidos.

De forma particular se pretende:

- Determinar el volumen de agua caliente que requiere el establecimiento y los consumos de gas con un sistema convencional de calentamiento de agua.

- Caracterizar el sistema de calentamiento solar existente en el lugar.
- Mostrar la metodología para diseñar un sistema de calentamiento solar de agua y aplicarla para diseñar un sistema que abastezca las necesidades del restaurante.
- Estimar los ahorros en combustible que se obtendrían de implementar el sistema de calentamiento solar de agua propuesto.
- Comparar los resultados obtenidos con el sistema solar ya instalado en el lugar y proponer mejoras al actual en caso de encontrarse.

El presente trabajo presenta un marco de referencia del uso de las energías renovables en especial la solar, el estado del arte del calentamiento solar de agua a baja temperatura y los programas de promoción que se han llevado a cabo en México. También se brinda una descripción de las tecnologías actuales más comerciales de calentamiento solar de agua.

Más adelante se describe el panorama del uso del gas licuado de petróleo (gas LP) y la evolución histórica de los precios nacionales de este energético. Posteriormente se presenta la descripción del caso de estudio que es un restaurante y el análisis de la información con la que se cuenta como los consumos de gas LP. También se hace la caracterización del sistema de calentamiento solar que actualmente opera en el restaurante.

Posteriormente se describen los métodos de dimensionamiento y el cálculo de la fracción solar con el método de la carta- f . Se continúa con la propuesta de una instalación solar térmica incluyendo aspectos como la distribución de los colectores en la azotea y la distancia entre filas. Se presenta la evaluación económica para la propuesta en cuestión con diferentes tipos de tecnología y los ahorros que se podrían obtener en el consumo de combustibles y una comparación con el sistema solar actual.

Dado que no se conoce con exactitud el consumo de agua caliente del restaurante se presentan varias propuestas con diferentes consumos de agua caliente estimados.

Finalmente, se presentan las conclusiones de los sistemas propuestos.

INTRODUCCIÓN

Desde la época primitiva, el hombre ha aprovechado diversas fuentes de energía para satisfacer sus necesidades y facilitar sus actividades cotidianas, por ejemplo, el uso de la biomasa les sirvió para mantener el fuego, calentarse y cocer los alimentos o bien como medio de defensa de animales salvajes o el uso de la energía solar como forma de calentamiento y secado.

Con el pasar de los siglos, el hombre conoció otras formas de aprovechar la energía que se encontraba disponible a su alrededor como la energía eólica para el transporte marítimo o el aprovechamiento hidráulico en molinos.

Si bien las fuentes de energías renovables, como la biomasa, la energía eólica y la solar sirvieron para satisfacer las necesidades del hombre por muchos siglos, posteriormente su aprovechamiento se vio relegado debido al desarrollo tecnológico en la Revolución Industrial y la explotación del carbón. Ya para finales del siglo XIX comenzó la explotación industrial del petróleo y su expansión como fuente de energía primaria. Hoy en día se tiene una variedad de fuentes de energía que podemos agrupar en dos grupos, fuentes de energía renovables y no renovable.

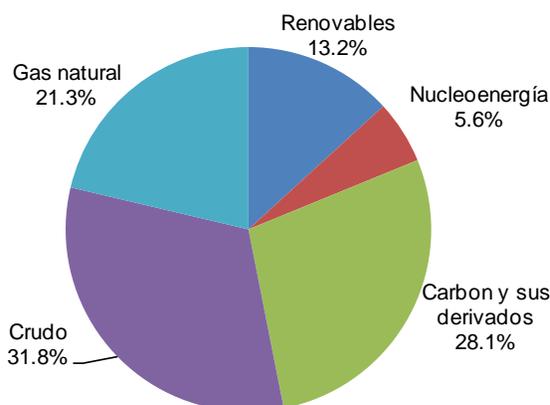
En las energías renovables podemos enumerar a la energía solar, la energía eólica, de la biomasa, hidráulica, mareomotriz, de las olas y geotérmica y de las no renovables el carbón, el petróleo, el gas natural, el gas de esquisto y la nuclear.

El desarrollo social y las actividades económicas están ligadas al uso de energía. Dado que las fuentes de energía no renovable se van agotando con su consumo y a su vez encareciéndose y que sus reservas están sujetas a la factibilidad técnica y conveniencia económica para su extracción y explotación; las energías renovables constituyen una opción ya que su disponibilidad no disminuye con su explotación y adicionalmente los impactos medioambientales de su uso son reducidos comparados con los provocados por las energías no renovables.

En el contexto mundial, el aprovechamiento de las fuentes de energía primaria (la primera utilización de una fuente antes de ser transformada en otras formas de energía) se concentra principalmente en fuentes de energía no renovables. La grafica de la **Figura 1** muestra la producción mundial total de energía primaria en 2010 que fue de 12,789.3 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo) de los cuales en promedio solo el 13.2% del total corresponde a energías renovables.

Existen varios factores para un mayor aprovechamiento de las energías renovables entre los que podemos nombrar:

Figura 1. Producción mundial de energía 2010.



Fuente. Balance Nacional de Energía 2011 a su vez de Energy Balances of OCDE countries y Energy Balances of Non-OCDE countries, AIE, edición 2012.

Nota: Renovables incluye energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica, biomasa y desechos.

◆ Factores estratégicos

- La distribución geográfica de los yacimientos de combustibles fósiles no es homogénea, mientras algunos países tienen abundancia del recurso, otros no. Gran parte de los exportadores de crudo se concentran en ciertas regiones geográficas definidas lo que lleva a la importación por parte de muchos países. En cambio, las energías renovables pueden aprovecharse en el lugar de origen, es decir son autóctonas.

- La seguridad energética, que tiene que ver con la garantía de abastecimiento o suministro de energía a precio razonable que se consigue con la diversificación de las fuentes de energía.

- La disponibilidad del recurso renovable no disminuye con su uso a diferencia de los combustibles fósiles que tardaron miles de años para su formación.

- No dependen de las condiciones geopolíticas mundiales y su mayor participación en la matriz energética de un país minimiza o atenúa las consecuencias de alza de precios del crudo o escasez del suministro.

♦ Factores económicos

- Las energías renovables pueden contribuir al desarrollo de la economía local al aprovechar los recursos en el lugar donde se producen aunque debe observarse que el aprovechamiento de estos recursos sea de forma sustentable. Adicionalmente favorecen la creación de gran número de empleos y desarrollo de infraestructura en el lugar.

♦ Factores medioambientales

- Otro factor importante para el impulso de las energías renovables es el impacto ambiental provocado por la explotación masiva de los combustibles fósiles y el consecuente aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero causantes del cambio climático. Si bien las energías renovables tienen un impacto ambiental, este es mucho menor que el de las energías no renovables.

Limitaciones

Las energías renovables representan una opción como fuente de energía para muchas aplicaciones sin embargo tienen limitaciones como:

- Intermitencia del recurso, es decir su disponibilidad no es continua.
- La satisfacción total de nuestras actuales necesidades energéticas no se puede lograr solo con energías renovables.
- Sujetas a la disponibilidad del propio recurso.
- Desfase entre captación y la demanda, costos de almacenamiento de energía.

Las energías renovables tienen sus alcances y limitaciones. En ciertas aplicaciones requieren el apoyo de sistemas basados en otras fuentes de energía o bien no son la alternativa conveniente tecnológica o económicamente sin embargo hay otras aplicaciones rentables y probadas y es precisamente una de las aplicaciones de la energía solar, el calentamiento solar de agua sanitaria, el objeto de estudio del presente trabajo.

CAPITULO 1. PANORAMA DEL CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN MÉXICO

1.1 ENERGÍA SOLAR

La energía solar se aprovecha en forma directa cuando no se requiere ningún dispositivo en específico para captar la energía del sol, lo que también se conoce como forma **pasiva**, que se ha utilizado tradicionalmente para el secado de la ropa y productos alimenticios, la iluminación de recintos, diseño bioclimático, entre otros. El aprovechamiento activo se puede clasificar en dos categorías:

- **Energía Solar Térmica.** Se aprovecha principalmente la radiación infrarroja que se transforma en calor por medio de un dispositivo que calienta un fluido.
- **Energía Solar Fotovoltaica.** La energía proveniente del Sol, en especial del espectro visible de la luz se transforma en energía eléctrica en una celda fotovoltaica en las que el principio de funcionamiento es el efecto fotoeléctrico.

1.1.1 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

Las aplicaciones de la energía solar térmica son diversas y se pueden dividir en tres categorías en función de la temperatura que alcanza el fluido de trabajo, para cada intervalo de temperatura hay diferentes sistemas de captación:

- Baja temperatura. Aplicaciones para temperaturas que van desde unos grados arriba de la temperatura ambiente a menos de 100C. En esta categoría podemos encontrar el calentamiento solar de agua sanitaria, el calentamiento de aire, la calefacción de recintos, la refrigeración solar, el secado solar, la destilación solar, entre otros. Se usan los colectores de plástico, los planos y los de tubos.
- Media temperatura. El rango de temperatura va desde 100C hasta aproximadamente 250C. Tenemos aplicaciones en procesos industriales como lavado, pasteurización, precalentamiento de agua para calderas, cocción, secado, destilación, esterilizado, etc., y tecnologías de colectores concentradores como los concentradores CPC y los concentradores de canal parabólico. En esta categoría también se encuentran otros dispositivos concentradores como las estufas solares para cocción de alimentos.
- Alta temperatura. La temperatura que alcanza el fluido de trabajo puede ser superior a 300C. Ejemplos son las tecnologías de concentración y seguimiento como la de plato parabólico y sistemas de torre central para la generación de energía eléctrica principalmente.

1.1.2 CALENTAMIENTO DE AGUA A BAJA TEMPERATURA

Tradicionalmente el calentamiento de agua es por medio de la quema de un combustible fósil como gas LP, gas natural o leña o diesel en un calentador o caldera.

Actualmente el calentamiento solar de agua es una opción cada vez más habitual ya que se trata de una tecnología probada y rentable con experiencias comerciales en el mercado superior a los 30 años. Por la naturaleza de la energía solar, las instalaciones de calentamiento solar deben tener un respaldo de equipos que queman un combustible fósil.

Algunas de las áreas de aplicación más comunes del calentamiento solar de agua a baja temperatura son:

- **Calentamiento solar de agua para uso sanitario**

La producción de agua caliente sanitaria es una de las aplicaciones más extendidas de la energía solar térmica, en sectores como el residencial, de servicios e industrial para satisfacer la demanda de agua caliente de regaderas, lavamanos, lavadoras de trastes y ropa, entre otras.

- **Calefacción de recintos**

Los sistemas de calefacción por medio de suelo radiante (circuito de tuberías empotradas en el suelo) pueden realizarse con un aporte solar térmico.

- **Calentamiento de agua para albercas**

Esta es otra aplicación ampliamente extendida y rentable. Los calentadores solares permiten lograr grandes ahorros en el consumo de combustible.

- **Calentamiento solar de agua para procesos industriales**

En el sector industrial también se pueden instalar calentadores solares como sistemas de precalentamiento del agua para proceso.

- **Calentamiento solar de agua para actividades del sector agropecuario**

En el sector agropecuario, los sistemas solares pueden precalentar agua caliente para una variedad de procesos como el de escaldado en rastros de ganado, escaldado de

frutas y verduras, en el proceso de limpieza de instalaciones, para fines de higiene y confort, en los procesos de crianza y engorda de aves y animales.

- **Calentamiento solar de agua para nixtamalización**

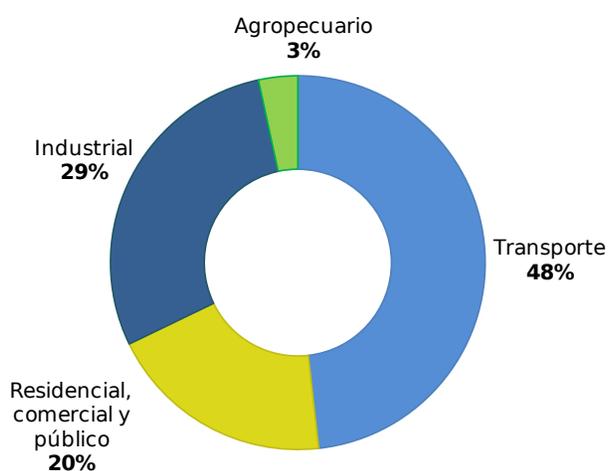
Otro nicho de aplicación con mucho potencial es el abastecimiento de agua caliente para el proceso de nixtamalización del maíz.

1.1.3 SITUACIÓN ACTUAL DEL CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN MÉXICO

Como se describió previamente, el calentamiento solar de agua para uso sanitario es una de las principales aplicaciones de la energía solar térmica. Podemos encontrar sistemas de calentamiento solar de agua en casas habitación, hoteles, clubes deportivos, restaurantes, lavanderías, gimnasios, estéticas, hospitales, escuelas, centros de readaptación social, entre otros.

De acuerdo al Balance Nacional de Energía, para el año 2011, el consumo energético total fue de 4,735.71PJ (petajoules). El sector transporte consumió el 48% del consumo energético total, le siguió el sector industrial con el 29% mientras que el conglomerado formado por el sector residencial, comercial y público tuvo un consumo del 20% y finalmente el sector agropecuario tuvo una participación del 3%. (**Figura 2**).

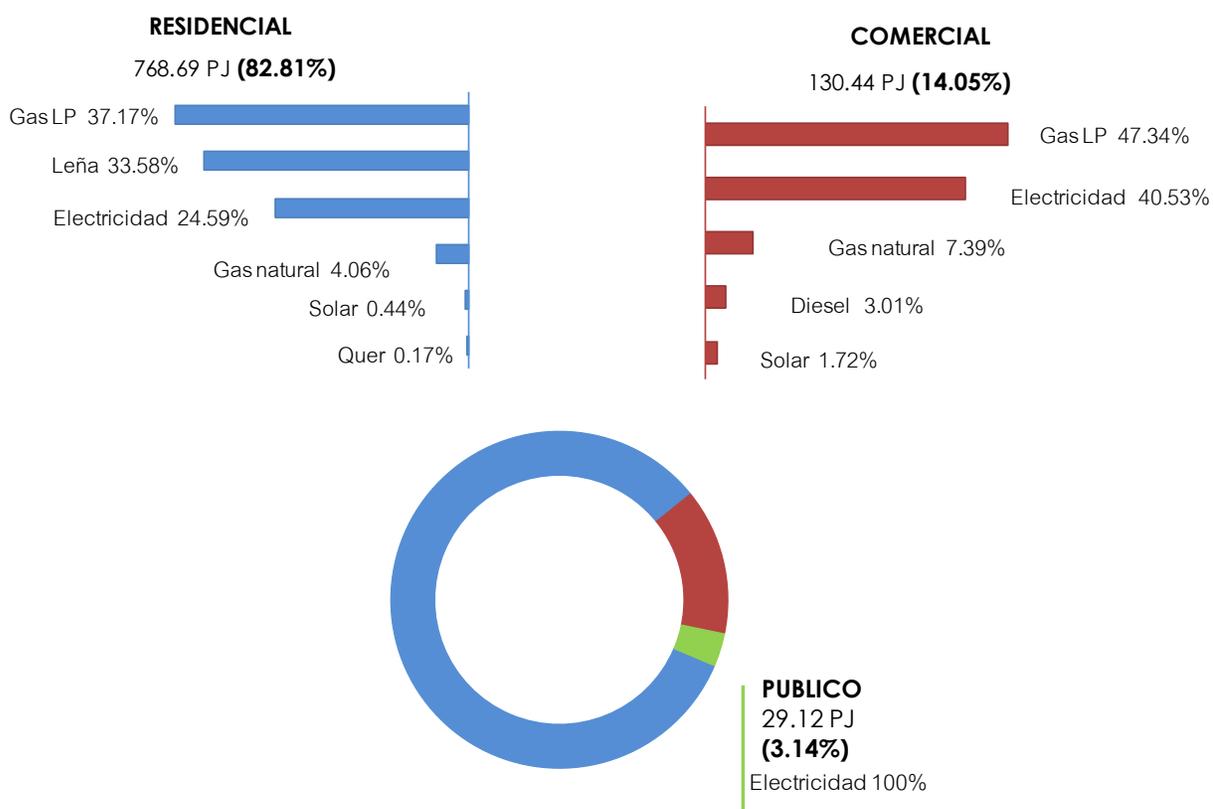
Figura 2. Consumo energético final (2011) en México por sectores.



Fuente. Balance Nacional de Energía 2011 SENER

En conjunto, el sector residencial (vivienda), comercial y público requirió de 928.25 PJ y como se indica en la gráfica de la **Figura 2**, esto representó el 20% del consumo energético final, pero si desagregamos el sector en las tres categorías que lo conforman, el sector residencial tuvo un consumo energético de 768.69 PJ, en el sector comercial el consumo fue de 130.44 PJ y para el sector público fue de 29.12PJ. En la gráfica de la **Figura 3** se puede apreciar el desglose del sector residencial, comercial y público y el porcentaje de los energéticos que cada uno consume.

Figura 3. Consumo energético del sector residencial, comercial y público y su participación porcentual dentro de su propio sector (2011).



Fuente. Elaboración propia con información del Balance Nacional de Energía 2011 SENER

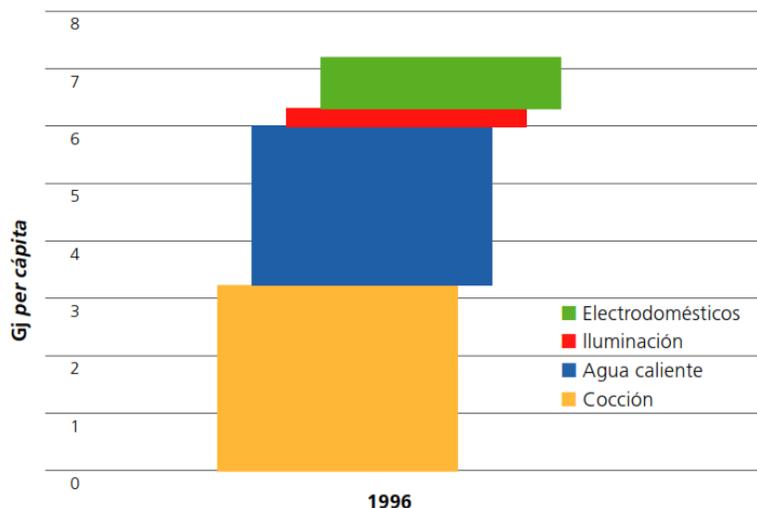
El sector residencial está compuesto de las viviendas en zonas rurales y urbanas del país donde el energético de mayor consumo a nivel nacional es el gas LP, seguido de la leña y en tercer puesto la electricidad como se aprecia en la **Figura 3**. En las viviendas los usos principales de la energía son la cocción de alimentos, el calentamiento de

agua, iluminación, uso de diversos electrodomésticos para la refrigeración, el aire acondicionado, la televisión, el lavado, el planchado, entre otros. **Figura 4.**

En el sector comercial (el consumo en locales comerciales, restaurantes, hoteles, entre otros) el energético de mayor uso es el gas LP con 47.34%, seguido de la electricidad con 40.53%, luego el gas natural con 7.39%, el diesel con 3.01% y finalmente la energía solar con 1.72%.

Como se aprecia en la **Figura 3**, tanto para el sector residencial como el comercial, el energético de mayor consumo es el gas LP y su principal uso es para la cocción y para calentar agua por lo que hay una enorme área de oportunidad para la implementación de energía solar térmica en estos sectores.

Figura 4. Usos de la energía en la vivienda urbana per cápita en México 1996 (por usos finales).



Fuente. Tomado de "Guía para el uso de la energía en la vivienda". CONAVI. 2006

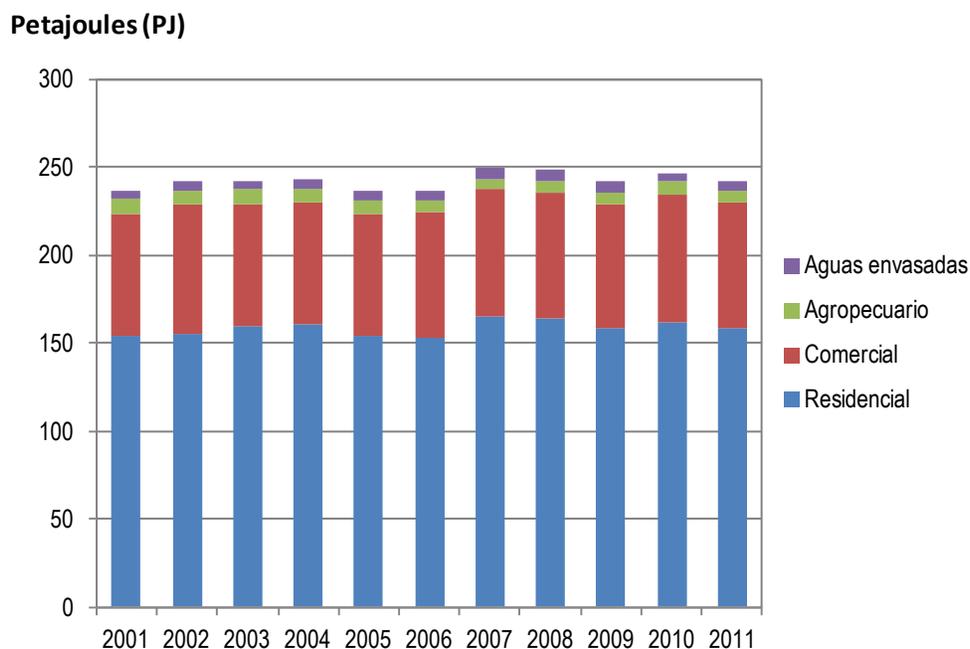
En el Programa para la Promoción de Calentadores Solares en México, PROCALSOL, del cual hablaremos más adelante, hay una estimación de la cantidad de energía utilizada para calentar fluidos a baja temperatura en México, de 1996 a 2005, resultando en promedio de 230 PJ anuales. Las consideraciones realizadas por el PROCALSOL para llegar a esa cifra fue sumar los siguientes consumos anuales reportados en el Balance Nacional de Energía y promediarlos:

- La mitad del consumo de gas LP y de gas natural del sector residencial;
- El total del consumo de gas LP y gas natural del sector comercial

- El total del consumo de gas LP, gas natural, diesel y combustóleo para la industria de aguas envasadas;
- El total del consumo de gas LP y queroseno para el sector agrícola.

La metodología para obtener la cifra es discutible y las consideraciones limitadas, a pesar de lo anterior muestra que a nivel nacional la energía empleada para calentar fluidos a baja temperatura es muy representativa. Se utilizaron las mismas consideraciones que describe el PROCALSOL para calcular la cantidad de energía utilizada para calentar fluidos a baja temperatura ahora para el periodo de 2001 a 2011 obteniendo un valor promedio de 242 PJ que representan el 5.7% del consumo energético final en México. **Figura 5.**

Figura 5. Consumo de energía estimado para el calentamiento de fluidos a baja temperatura en México (2001 a 2011).



Fuente. Elaboración propia con datos del Balance Nacional de Energía 2011.

1.1.4 PROGRAMAS Y ACCIONES PARA INCENTIVAR EL USO DE LA ENERGÍA SOLAR EN MÉXICO

En México, el uso de calentadores solares es cada vez más común y en especial en el sector residencial. La reducción en los costos de combustible ha acercado esta tecnología a otros sectores como el agrícola, comercial e industrial. Otra razón ha sido que en los últimos años se han implementado una serie de programas para promover y acrecentar el uso de la energía solar, entre los cuales podemos mencionar algunos de los más relevantes:

- **PROCALSOL, Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua (2007-2012).**

El PROCALSOL fue un programa de promoción que tenía como propósito fomentar y promocionar el uso de calentadores solares en México. Nació de la iniciativa de la CONUEE (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía) en colaboración con la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ, por sus siglas en alemán) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Entre los objetivos del PROCALSOL se encontraban:

- La instalación de 1.8 millones de metros cuadrados de calentadores solares de agua (CSA) en México durante el período 2008-2012,
- Impulsar el aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de agua en la vivienda, los comercios, la industria y los agronegocios.
- Garantizar que el crecimiento del mercado del calentamiento solar se lleve a cabo con un nivel de calidad adecuado.
- Favorecer el desarrollo de la industria nacional de calentadores solares (fabricantes, diseñadores de sistemas, distribuidores e instaladores de equipos)
- Promover la tecnología desarrollada por los centros de investigación nacionales.

Algunos resultados del programa fueron:

- Al cierre del 2011 se habían instalado 1.19 millones de metros cuadrados, se estima aproximadamente que 81% fueron instalados en construcciones nuevas y 19% en construcciones ya existentes.
- El Dictamen Técnico de Energía Solar Térmica en Vivienda.
- Apoyo en la creación del programa "Hipoteca Verde"
- Desarrollo y publicación de la "Norma Técnica de Competencia Laboral para Instalación del Sistema de Calentamiento Solar de Agua".
- Contribuyo en la Norma NMX-ES-003-NORMEX-2007 sobre requerimientos mínimos para la instalación de sistemas solares térmicos para calentamiento de agua.

La CONUEE prevé que dará continuidad y un nuevo impulso al PROCALSOL con el Programa de Calentamiento Solar de Agua en México 2013-2018.

- **Depreciación acelerada de activos fijos que aprovechan energías renovables**

Desde 2004, personas morales y personas físicas con actividad empresarial pueden deducir el 100% en el primer año de la inversión en maquinaria y equipo para generar energía de fuentes renovables (Ley del Impuesto Sobre la Renta, artículo 40 fracción XII). Este beneficio fiscal pretende estimular al sector y como condición, el equipo debe mantenerse en operación durante 5 años.

- **Dictamen Técnico de Energía Solar Térmica en Vivienda**

El Dictamen Técnico de Energía Solar Térmica en Vivienda son una serie de especificaciones que deben cumplir los sistemas de calentamiento solar de agua (que como respaldo utilice un calentador de agua, cuya fuente de energía sea el gas LP o el gas natural, energía eléctrica o cualquier otra) que sean destinados a programas como el de HIPOTECA VERDE. Fue suscrito el 25 de octubre de 2011 en el marco del PROCALSOL y establece los métodos de prueba para su verificación y los requisitos de marcado y etiquetado.

- **Programa HIPOTECA VERDE del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT)**

El programa de Hipoteca Verde fue creado en 2010 y consistía en créditos del INFONAVIT que otorgaban un monto adicional al derechohabiente que lo solicitará para la compra y uso de ecotecnologías para ahorrar agua, energía eléctrica y gas, como llaves y regaderas ahorradoras, baños, aires acondicionados, lámparas ahorradoras y calentadores solares entre otros.

A partir de 2011, el programa se generalizó y hoy en día todos los créditos son nombrados "verdes" lo que significa que ahora todas las viviendas que se compren, construyan, amplíen o remodelen con un crédito del INFONAVIT deberán estar equipadas con ecotecnologías.

- **Proyecto de Energía Renovable para la Agricultura (PERA)**

La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) por medio del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) gestionó ante el Fondo Mundial de Medio Ambiente (GEF) a través del Banco Mundial, un donativo que permitió promover el uso de tecnología solar en el campo mexicano. El convenio de donación se firmó a principios del 2000 y la iniciativa llevo por nombre Proyecto de Energía Renovable para la Agricultura (PERA) y su operación concluyó en 2006.

Los objetivos del PERA eran la instalación de sistemas demostrativos, la promoción de asistencia técnica intensiva, la capacitación de técnicos y el establecimiento de especificaciones técnicas para los proyectos.

La aplicación de tecnología de energía renovable en el campo, en especial el calentamiento solar de agua atendió aplicaciones en rastros, granjas avícolas, empacadoras de carne, establos lecheros, etc. y la solar fotovoltaica principalmente para bombeo de agua para abrevaderos. Entre los resultados obtenidos estuvo la impartición de 166 cursos y talleres de capacitación relacionados con la energía solar para funcionarios públicos, personal de empresas proveedoras de servicios y productores agropecuarios y la realización de 3,750 eventos de difusión y la distribución de material de difusión.

El PERA permitió instalar 1,545 sistemas fotovoltaicos además de otros proyectos productivos agropecuarios con energías renovables como:

- 81 sistemas de refrigeración solar para productos agropecuarios para evaluar su viabilidad y con fines demostrativos.
- Instalación de 20 sistemas de calentamiento de agua para evaluar su viabilidad y con fines demostrativos.
- Instalación de 9 motores–generadores para utilización de biogás en unidades productivas que contaban previamente con un biodigestor, para determinar su viabilidad y con fines demostrativos.

El programa también impulsó el crecimiento de la oferta de productos y servicios de energía renovable y la capacitación de técnicos y productores.

• **Programa de Vivienda Sustentable del Distrito Federal (2007-2012)**

El Instituto de Vivienda del DF (INVI) implementó el Programa de Vivienda Sustentable en el DF 2007-2012 de acuerdo al Programa General de Desarrollo del Distrito Federal en su eje 6 (Desarrollo sustentable y de largo plazo).

El objetivo general de este programa era impulsar el manejo de ecotecnologías en los programas de vivienda nueva y en las ya construidas a través de créditos accesibles.

El programa tenía diversos objetivos como reducir el porcentaje de uso de agua en el hogar a través de tazas de baño, llaves, mezcladoras y regaderas ahorradoras de agua, así como también el aprovechamiento de energía solar mediante calentadores solares de agua. Como requisito, el calentador solar debía cumplir con la norma NMX-ES-001-NORMEX-2005.

Este programa sirvió como referencia para que algunos municipios dieran créditos y apoyos para la adquisición de un calentador solar.

Otro programa fue el Programa de Diseminación de Calentadores solares, PRODICASOL, del gobierno de Guanajuato en 2007 que tenía como objetivo la promoción de sistemas de calentamiento de agua solar en los sectores doméstico, agrícola, industrial y de servicios además de brindar cursos de capacitación para los instaladores.

- **Proyecto de Vivienda Sustentable de la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) 2007-2012**

La CONAVI promovió la instalación de sistemas de calentamiento solar en ciertas localidades además de desarrollar guías con criterios y lineamientos para vivienda sustentable para desarrolladores en los rubros de agua, energía y áreas verdes.

- **Norma Ambiental NADF-008-AMBT-2005 en el DF**

El gobierno del DF publicó en abril de 2006 en la gaceta oficial de DF una norma ambiental que establece que el aporte de energía solar para el calentamiento de agua debe ser al menos el 30% del consumo energético anual para diversos establecimientos.

Aplica a establecimientos que inicien operaciones a partir del día siguiente de la publicación de la norma o remodelaciones como albercas y fosas de clavados, que sean establecimientos medianos (51 a 100 empleados) y grandes (más de 100).

La norma establece los criterios para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua en albercas, fosas de clavados, regaderas, lavamanos, usos de cocina, lavanderías y tintorerías ubicadas en el Distrito Federal.

1.1.5 NORMAS APLICABLES EN EL CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA

Hoy en día no hay normas oficiales (NOM) en materia de calentamiento solar de agua, pero si hay cuatro normas mexicanas (NMX) vigentes y de carácter voluntario aplicables a la fabricación e instalación de colectores y sistemas de calentamiento solar de agua; son las siguientes:

- **NMX-ES-001-NORMEX-2005**

Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua. Métodos de prueba y etiquetado.

Con fecha de inicio de vigencia el 14 de octubre de 2005, esta norma de carácter voluntario fue elaborada por el Subcomité de Calentadores Solares dependiente del Comité Técnico de Normalización Nacional para Energía Solar, el NESO-13, coordinado por NORMEX (Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación S.C, empresa que elabora normas mexicanas) y constituido por representantes del sector industrial, académico, organizaciones no gubernamentales y gubernamentales, entre los que

podemos nombrar la ANES, la CONUEE, el Consejo de Ciencia y Tecnología de Guanajuato (CONCYTEG) entre otros miembros participantes.

Esta norma tiene como objetivo establecer los métodos de prueba para determinar el rendimiento térmico y las características de funcionalidad de los colectores solares que utilizan como fluido de trabajo agua, comercializados en México. Aplica a los colectores que proporcionen únicamente agua caliente en fase líquida.

Las pruebas descritas en esta norma se aplican solo a la determinación de las características de colectores solares planos metálicos y de plástico.

- NMX-ES-002-NORMEX-2007

Definiciones y terminología

Con fecha de inicio de vigencia el 22 de junio de 2007, esta norma fue elaborada por el Subcomité de Terminología, dependiente del Comité Técnico de Normalización Nacional para Energía Solar, el NESO-13, coordinado por NORMEX y con la colaboración de instituciones diversas como PROCOBRE, ANES, CONUEE, CIE-UNAM (hoy Instituto de Energías Renovables, IER), el CONCYTEG además de diversas empresas participantes.

Esta norma presenta la terminología y recopila la definición de los conceptos más usados en el campo de la investigación y la tecnología solar con la finalidad de homogeneizar el lenguaje en los ámbitos científicos, técnicos y comerciales.

- NMX-ES-003-NORMEX-2007

Requerimientos mínimos para la instalación de sistemas solares térmicos, para calentamiento de agua.

Con fecha de inicio de vigencia a partir del 22 de septiembre de 2008, esta norma tiene como objetivo fijar las condiciones técnicas mínimas que deben cumplir las instalaciones de sistemas para calentamiento solar de agua, especificando los requisitos de durabilidad, confiabilidad y seguridad.

- NMX-ES-004-NORMEX-2010

Evaluación térmica de sistemas solares para calentamiento de agua – Método de ensayo

Esta norma entró en vigor el 11 de Junio de 2010, fue elaborada por el Subcomité de Evaluación Energética; del Comité Técnico de Normalización Nacional para Energía Solar, NESO-13, coordinado por NORMEX.

Establece el método de ensayo (prueba) para evaluar y comparar el comportamiento térmico de sistemas de calentamiento de agua solares, principalmente para uso

doméstico hasta una capacidad máxima de 500 litros y hasta una temperatura máxima de 90 °C como dominio de temperaturas de agua caliente.

La norma aplica a los sistemas solares domésticos para el calentamiento de agua que funcionan mediante:

- a) Circulación natural o termosifónicos; y
- b) Circulación forzada.

Los cuales pueden funcionar a partir de una o más de las siguientes tecnologías, u otras:

- a) Colectores solares planos;
- b) Autocontenidos;
- c) Colectores de tubos evacuados con o sin tubos de calor y con y sin superficies reflejantes;
- d) Colectores con concentradores tipo parabólico compuesto (CPC).

Esta prueba no puede ser aplicada a los siguientes sistemas solares domésticos para el calentamiento de agua:

- a) Colectores solares con sistemas de seguimiento,
- b) Sistemas que contengan más de un tanque térmico de almacenamiento.

Esta norma es más general y completa que la NMX-ES-001-NORMEX-2005 ya que evalúa un sistema completo conformado por el colector y el tanque, no solo el colector además toma en cuenta varios tipos de colectores y no solo los planos. La norma describe las diferentes pruebas de caracterización térmica de los sistemas de calentamiento solar de agua, en los periodos diurno y nocturno, pruebas de choque térmico externo e interno, resistencia al impacto y prueba de presión hidrostática.

LABORATORIOS DE PRUEBAS

Las normas NMX-ES-001-NORMEX-2005 y NMX-ES-004-NORMEX-2010 contienen procedimientos de pruebas específicas que deben ser aplicados a los colectores solares. Para llevar a cabo dichas pruebas, surgió la necesidad de tener laboratorios de pruebas. En México existen 2 laboratorios de pruebas que dependen de una institución de educación superior y uno privado que son:

- Laboratorio de pruebas de la Universidad de Guanajuato

En septiembre de 2006, la Universidad de Guanajuato, con apoyos federales y estatales (fondos de apoyo a la investigación), acredita un laboratorio con la capacidad para realizar las pruebas para la certificación de la norma voluntaria NMX-ES-001-NORMEX-2005.

El laboratorio es operado por la propia universidad y tiene un contrato con NORMEX que le permite realizar pruebas de certificación de calentadores solares bajo la norma.

- Laboratorio de pruebas del IER de la UNAM

El Instituto de Energías Renovables (IER) ubicado en Temixco, Morelos, cuenta con el Laboratorio de Pruebas de Equipos de Calentamiento Solar donde lleva a cabo las pruebas para calentadores de acuerdo a la norma NMX-ES-004-NORMEX-2010.

- MEXOLAB

Este es un laboratorio privado ubicado en Arandas, Jalisco que ofrece la realización de pruebas a colectores y sistemas de calentamiento solar de agua de acuerdo a las normas NMX-ES-001 NORMEX-2005 y NMX-ES-004-NORMEX-2010 para el Dictamen Técnico de Energía Solar Térmica en Vivienda.

1.2 TECNOLOGÍAS PARA EL CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA

Una instalación solar térmica se constituye de ciertos elementos que en su conjunto proveen de agua caliente que son:

- (1) Un sistema de captación formado por los colectores solares que son los encargados de captar la radiación del sol y transformarla en calor útil.
- (2) Un sistema de almacenamiento, constituido por uno o varios depósitos que almacenan el agua caliente hasta su uso. El agua se encarga de almacenar energía térmica en forma de calor sensible,
- (3) Un sistema de intercambio, cuando se tiene dos circuitos de fluidos independientes, el circuito de calentamiento solar y el agua de las aplicaciones entonces intercambian calor por medio de un intercambiador.
- (4) Un circuito hidráulico compuesto de tuberías, válvulas, accesorios y bombas.
- (5) Un sistema de control, necesario en instalaciones que requieran controlar automáticamente válvulas y/o bombas, generalmente sistemas grandes.

Los sistemas pueden ser de uso doméstico o de gran tamaño para grandes volúmenes de abastecimiento de agua caliente. Dependiendo el tipo y tamaño del sistema, puede que no sean necesarios todos los elementos enumerados arriba, por ejemplo pueden carecer de sistema de intercambio o de control.

De acuerdo al tipo de circulación del agua entre el colector y el tanque se tienen dos sistemas de calentamiento solar de agua:

- ❖ **Natural.** El tanque de almacenamiento se coloca muy cerca y a una altura mayor que los colectores, incluso el tanque puede estar integrado al colector. No requiere de bomba para que se establezca un flujo continuo a través de los colectores hacia el tanque de almacenamiento sino que la circulación se da de forma natural aprovechando el fenómeno de termosifón. El agua que se calienta en el interior del colector, sube a la parte superior del tanque, y por diferencia de densidades el agua más fría se va a la parte inferior del tanque y entra al colector estableciéndose una circulación continua entre tanque y colector.
- ❖ **Forzada** son los que utilizan una bomba para el circulamiento del fluido desde los colectores hacia el tanque y viceversa. En estos sistemas el tanque no necesita estar en la parte superior del colector, puede ubicarse en algún otro lugar. La bomba es controlada por un sistema de control automático.

De acuerdo al tipo de circuito entre el sistema de calentamiento solar y el agua de consumo, se pueden clasificar:

- ❖ Circuito **directo**, el fluido que circula por los colectores es el que se dirige hacia los servicios.
- ❖ En un circuito **indirecto**, el fluido que se calienta en los colectores intercambia calor con el agua que se usará en los servicios.

1.2.1 COLECTORES SOLARES

El colector solar es un dispositivo que capta y aprovecha la energía proveniente del Sol, transformándola en calor útil que transfiere a un fluido. Las tecnologías disponibles hoy en día son diversas, nos enfocaremos en las de baja temperatura y las más comerciales.

- Colector solar plástico

Son colectores fabricados de plástico especial que no tienen cubierta. Algunas de sus ventajas es que son muy ligeros y son fabricados en módulos individuales por lo que se pueden adaptar a las necesidades particulares de cada caso además de que son más económicos en comparación con otras tecnologías. Tienen altas eficiencias a bajas temperaturas que disminuye considerablemente para temperaturas del fluido mayores a 40C. Su uso principal es para el calentamiento solar de agua para albercas.

Los colectores plásticos deben ser de un material con protección UV para una mayor durabilidad por estar expuesto directamente a la radiación solar.

Figura 6. Dos diseños diferentes de paneles solares de plástico.



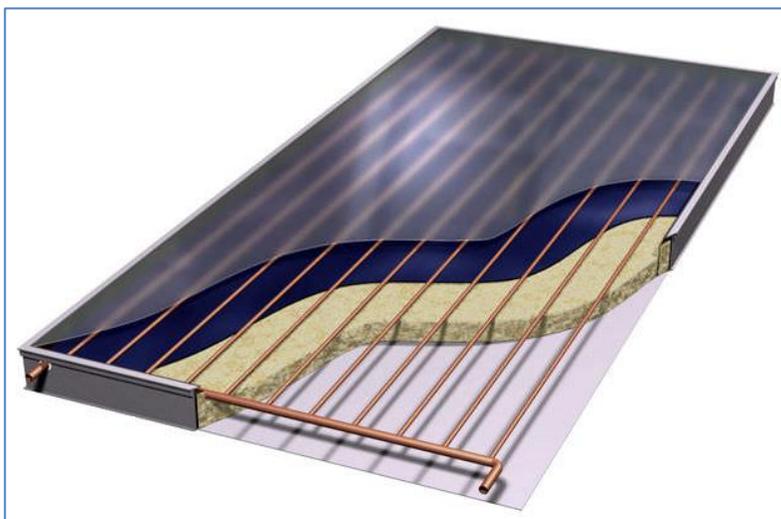
Fuente. Imagen de la izquierda de www.oku.es y la de la derecha de www.enerwork.com

- Colector solar plano

Un colector solar plano se compone de las siguientes partes:

- Cubierta transparente: La cubierta se encuentra en la parte superior del colector, generalmente es de vidrio templado.
- Placa absorbedora: Esta es una placa metálica formada por aletas típicamente de cobre unidas a tubos de cobre.
- Recubrimiento selectivo. La película selectiva depositada sobre la placa le proporciona una mayor absorción de la radiación solar y disminuye su emitancia. Hay diferentes recubrimientos como el cromo negro, el TiNOX o el CERMET (óxidos de metal en una matriz cerámica).
- Aislamiento. Un material aislante térmico se coloca por debajo de la placa absorbedora y alrededor de las paredes de la caja que contiene la placa para evitar las pérdidas térmicas por conducción.
- Caja. Normalmente es una carcasa de aluminio o de galvanizado que alberga la placa absorbedora y los demás elementos
- Marco. Normalmente de aluminio y sirve para mantener la cubierta de vidrio en su posición por la parte superior ayudado por una junta plástica.

Figura 7. Partes principales de un colector solar plano.



El funcionamiento de un colector solar plano es el siguiente: la energía solar que atraviesa la cubierta llega a la placa absorbedora, ésta se calienta y el calor se transfiere por conducción desde las aletas y las paredes de tubo al fluido que circula en el interior.

La cubierta permite el ingreso de gran parte de la radiación a la placa ya que es transparente a la longitud de onda corta de la radiación solar de entrada pero no permite la salida de la radiación de longitud de onda larga emitida por la placa, también tiene la función de reducir las pérdidas de calor por convección y por radiación desde la placa hacia el exterior.

La placa absorbedora generalmente es de cobre al igual que los tubos por ser buenos conductores del calor y resistentes. En general, las placas absorbedoras pueden estar formadas por tubos con aletas individuales (las aletas se utilizan porque aumentan el área de captación) o bien utilizando una sola placa a la cual se le integran los tubos. En ocasiones las aletas son de aluminio. Sobre la disposición de los tubos, ésta puede ser en forma de parrilla o de serpentín.

Entre las aplicaciones más frecuentes de los colectores solares planos son el calentamiento solar de agua para uso sanitario, de espacios y albercas.

- Colector solar de tubos al vacío

El colector solar de tubos se compone de una serie de tubos de vidrio montados paralelamente sobre una base.

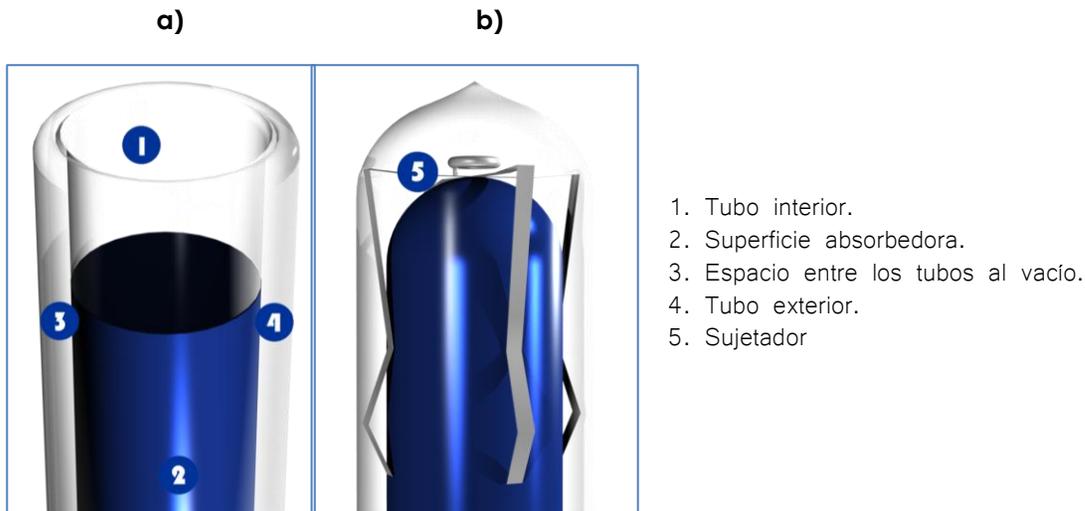
Un tubo se forma de dos tubos de vidrio transparente concéntricos, uno dentro del otro y unidos por el extremo abierto o boca del tubo. **Figura 8a**. Al espacio entre ambos tubos se le extrae el aire para hacer vacío a fin de que reducir al mínimo las pérdidas de calor.

Los tubos son de vidrio borosilicato que es transparente a la radiación, un extremo está abierto que es por donde entra el agua y el otro extremo está cerrado y termina en forma semiesférica con punta. En la superficie del tubo interior se deposita una superficie absorbedora como el nitrato de aluminio o nitrato de cobre que se encarga de absorber la radiación solar. El grado de vacío que hay entre los tubos permite conservar mejor el calor.

Se dice que son tubos **sencillos** o de flujo **directo** porque en su interior circula agua. Dependiendo la aplicación y tamaño del sistema, la boca de los tubos se inserta directamente en el tanque de almacenamiento (**Figura 9**) o bien en un cabezal para la circulación del agua (**Figura 10**). Estos calentadores solares están diseñados para

funcionar directamente cuando la presión de agua de alimentación es baja, menor a 1kgf/cm^2 .

Figura 8. Partes principales de un tubo al vacío. En la Figura 8a se observa la parte superior del tubo y en la Figura 8b, la parte inferior.



Ya sea que los tubos estén insertados dentro de un tanque o en un cabezal, tienen una inclinación específica dada por la estructura de soporte donde se coloquen.

El funcionamiento de estos colectores es el siguiente: los tubos se llenan de agua que se calienta al estar en contacto con la pared interna del tubo la cual puede alcanzar muy altas temperaturas. Se crean dos corrientes dentro del mismo tubo, la caliente que asciende por la pared superior del tubo hacia el tanque o cabezal y la inferior que es agua fría a contra flujo que entra y desciende por el centro y por la pared inferior del tubo e incrementa su temperatura conforme recorre su trayecto.

Cuando el agua caliente entra al tanque, por el principio de termosifón, sube a la parte superior desplazando el agua fría a la parte inferior del tanque por diferencia de densidades, el agua más fría se concentra en la parte baja y entra a los tubos a reemplazar el agua caliente que salió hacia el tanque. Este ciclo se repite hasta que se eleva la temperatura de toda el agua contenida.

En el fondo del tubo existe una zona de fluido estancado a temperatura de ebullición que impide que el fluido entrante llegue hasta el fondo, entonces el agua fría solo recorre una porción del tubo e intercambia calor con el agua en ebullición. Al paso de los años, es necesario sacar los tubos del tanque y lavarlos por dentro para eliminar los sedimentos que se acumularon en el fondo ya que reducen el área de transferencia de calor.

Figura 9. Calentador solar de tubos al vacío con termostanque de almacenamiento integrado.



Figura 10. Calentador solar de al vacío. Sistema con cabezal para grandes proyectos de abastecimiento de agua. El tanque de almacenamiento se encuentra aparte del campo de colectores.



Entre las aplicaciones más frecuentes de este tipo de colectores solares son el calentamiento solar de agua para uso sanitario. Algunas de sus ventajas son:

- El agua alcanza mayores temperaturas en comparación con los colectores planos debido al vacío que existe entre los tubos que reduce las pérdidas de calor y su forma cilíndrica de los tubos que brinda mayor ángulo de captación de la radiación solar.

- Más económicos que los colectores planos.

Entre sus desventajas se encuentran:

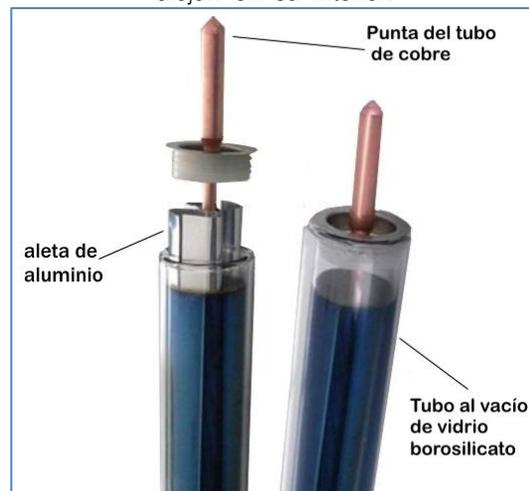
- Susceptibles a mayor cantidad de rupturas que un colector plano.

- Los sistemas con tanque integrado están limitados a aplicaciones donde el agua de alimentación es de baja presión (menor a 1 kg/cm^2) como la que da un tinaco.

- Colector solar de tubos heat pipe

Un colector de tubos heat pipe también llamado tubos de calor o caloriductos es un conjunto de tubos al vacío de flujo directo con la diferencia de que en su interior no circula agua sino que se están sellados, únicamente sobresale una punta de cobre. En su interior se encuentra una varilla de cobre rodeada por una aleta de aluminio. **Figura 11.**

Figura 11. Detalle de los tubos heat pipe. El de la izquierda está abierto para mostrar las partes que se alojan en su interior.



La varilla de cobre está hueca y sellada, en su interior contiene un líquido con bajo punto de ebullición que se evapora al calentarse por efecto de la radiación solar. El vapor sube por convección natural hasta la punta (zona de condensación) donde cede calor al agua (calor latente) que circula a su alrededor y cuando el vapor se enfría, éste se condensa y desciende de nuevo en forma líquida para empezar de nuevo el ciclo.

El fluido en el interior de la varilla de cobre no entra en contacto con el agua en la zona de condensación porque la varilla está sellada, únicamente se da el intercambio de calor entre la punta de cobre y el fluido circundante que puede estar dentro de un cabezal o bien dentro de un tanque de almacenamiento. **Figura 12.** Funcionan para sistemas de suministro de agua desde 0.5 kg/cm^2 hasta 6 kg/cm^2 y se aplican al

calentamiento de agua para uso sanitario, como precalentamiento de agua para calderas, procesos de secado, lavado, pasteurización, etc.

Figura 12. Diagrama de los tubos heat pipe cuando están dentro de un tanque térmico.

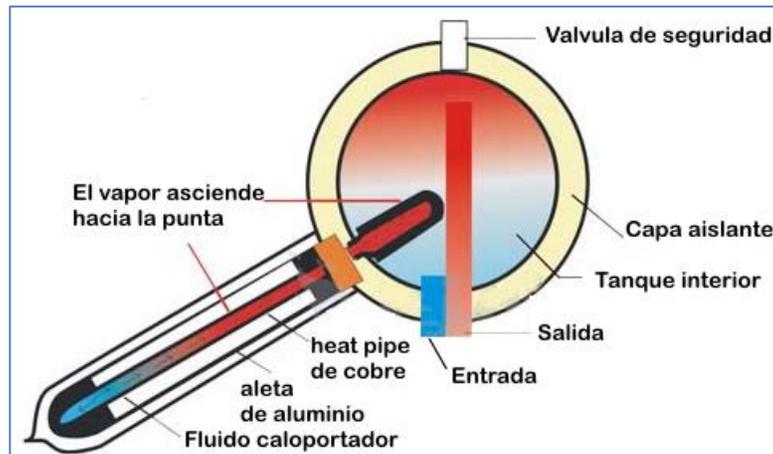


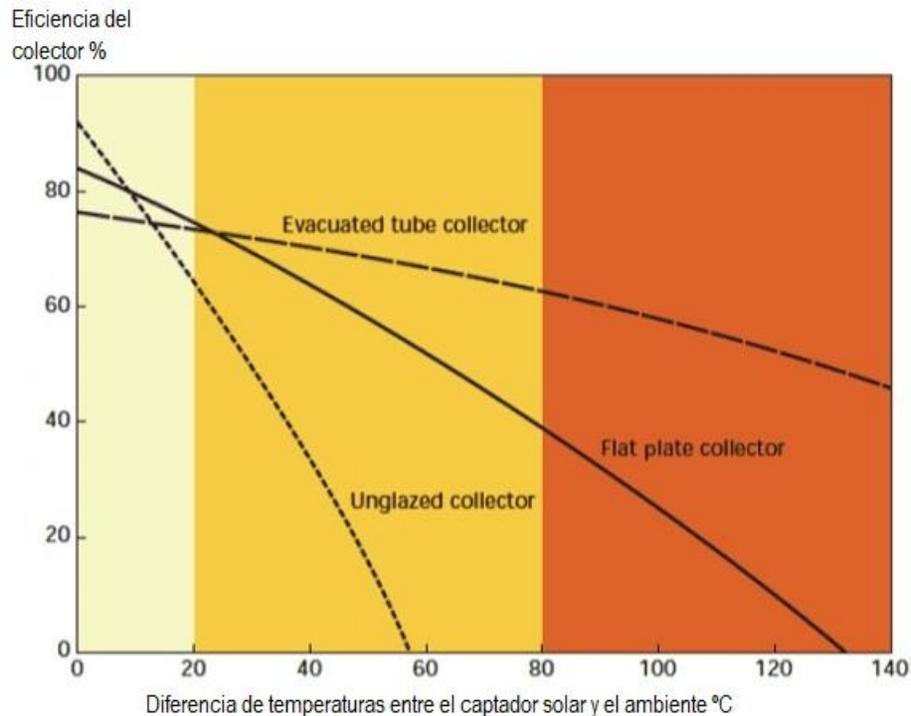
Figura 13. Colector solar de tubos heat pipe con cabezal.



En la **Figura 14** se muestra la grafica de la eficiencia de conversión para varios tipos de colectores solares. Para diferencias de temperatura pequeñas, los colectores sin cubierta tienen un rendimiento instantáneo mayor. Es por eso que se prefieren para calentamiento de albercas donde la temperatura requerida es baja. Para diferencias de temperatura medias, los colectores planos y de tubos tienen rendimientos similares, incluso colectores planos de alta selectividad pueden tener mejores desempeños.

Cuando las aplicaciones son para temperaturas mayores los colectores de tubos tienen mejor desempeño.

Figura 14. Gráfica de la eficiencia de conversión para varios tipos de colectores.



La selección adecuada del tipo de colector dependerá de varios factores como:

- Temperatura requerida. Por ejemplo, si una aplicación requiere menos de 40°C, el colector más conveniente es el desnudo de polipropileno ya que como se puede apreciar en la grafica es el colector más eficiente para ese rango de temperaturas además de que está diseñado para ese tipo de aplicación.
- Tipo de aplicación
- Región y ambiente del lugar
- Calidad de los equipos, tiempo de vida
- Necesidades especiales de cada proyecto
- Tiempo en el mercado

Cada tipo colector tiene sus desventajas y ventajas y con base en las necesidades particulares de cada proyecto se escogerá el más adecuado para cada caso.

1.3 USO ACTUAL DEL CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA EN MÉXICO

La Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) es una asociación sin fines de lucro que tiene como finalidad la promoción de la energía solar. Entre sus tareas recaba información de las ventas y proyectos de los principales fabricantes y distribuidores de calentadores solares en México.

La **Tabla 1** presenta datos reportados por ANES que muestran la capacidad total instalada en metros cuadrados de calentadores solares del año 2001 al 2012.

Tabla 1. Calentadores solares instalados en México en miles de metros cuadrados.

| Año | Miles de m ² instalados de calentadores solares | | Variación porcentual de un año a otro (%) | |
|------|--|-----------|---|-----------|
| | Instalados en ese año | Acumulado | Instalado por año | Acumulado |
| 2001 | 74.609 | 447.704 | | |
| 2002 | 50.911 | 498.615 | -31.76 | 11.37 |
| 2003 | 75.304 | 573.919 | 47.91 | 15.10 |
| 2004 | 68.725 | 642.644 | -8.74 | 11.97 |
| 2005 | 100.348 | 742.992 | 46.01 | 15.61 |
| 2006 | 96.694 | 839.686 | -3.64 | 13.01 |
| 2007 | 154.267 | 993.953 | 59.54 | 18.37 |
| 2008 | 165.633 | 1,159.586 | 7.37 | 16.66 |
| 2009 | 233.336 | 1,392.922 | 40.88 | 20.12 |
| 2010 | 272.580 | 1,665.502 | 16.82 | 19.57 |
| 2011 | 272.300 | 1,937.802 | -0.10 | 16.35 |
| 2012 | 270.400 | 2,208.202 | -0.70 | 13.95 |

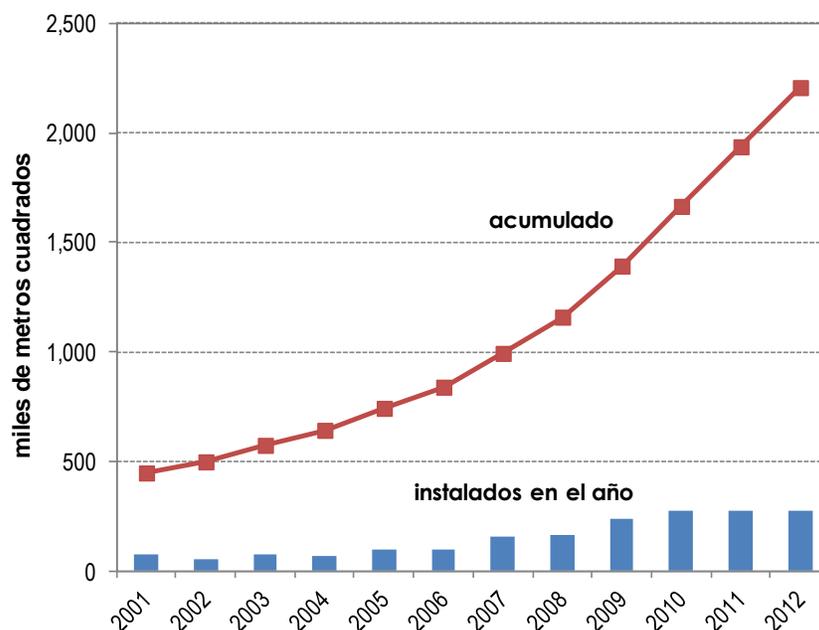
Fuente. Elaboración propia con datos de ANES.

Los datos de la **Tabla 1** se grafican en la **Figura 15**. En 2007 se aprecia el mayor incremento en la instalación de sistemas de calentamiento de agua en parte porque ese año inicio el PROCALSOL. En 2001 el total acumulado fue de 447.7 miles de metros cuadrados y llegó a 2,208.2 miles de metros cuadrados en 2012 que representa un crecimiento promedio anual del 15.6%.

En cuanto a los metros cuadrados de calentadores solares instalados, de 2007 a 2009 tuvo un crecimiento importante sin embargo, durante los años 2010, 2011 y 2012 el mercado experimento una desaceleración para luego estabilizarse con 0.27 millones de metros cuadrados en 2012, como se observa en la **Tabla 1**. La desaceleración del mercado de CSA se debió en parte a la situación del mercado de vivienda en México, ya que desde la crisis económica de 2008 éste sufrió una caída en los préstamos

hipotecarios y que ha tenido una recuperación paulatina sin llegar a los niveles anteriores a la crisis.

Figura 15. Miles de metros cuadrados de calentadores solares instalados en México desde 2001 a 2012.



Fuente. Elaboración propia con datos de la ANES.

En la **Tabla 2** se presenta la superficie instalada de calentadores solares catalogados en diferentes sectores para los años 2006, 2008 y 2010 ya que no se disponen de la información para los demás años.

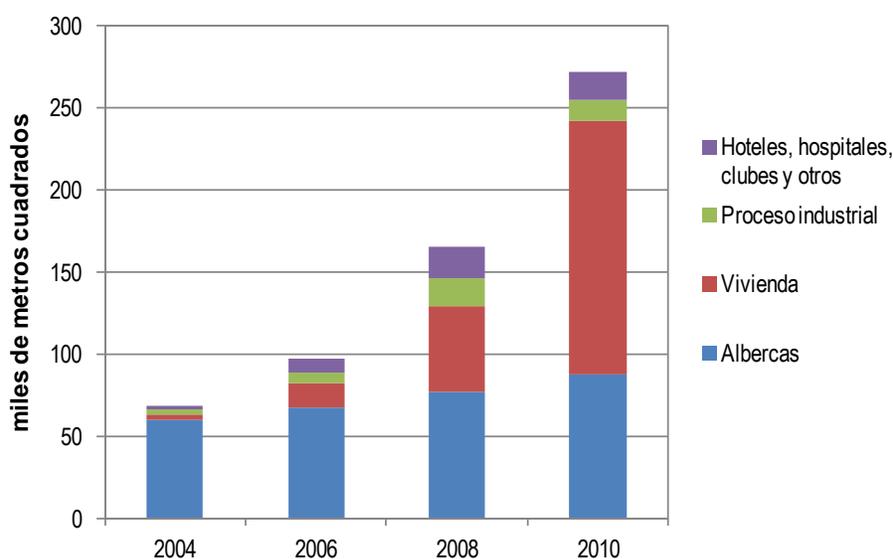
Tabla 2. Superficie instalada de calentadores solares y su participación porcentual por sector en México para 2006, 2008 y 2010.

| Calentadores solares | 2006 | | 2008 | | 2010 | |
|--|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | miles de m ² | % | miles de m ² | % | miles de m ² | % |
| Albercas | 66.91 | 69.20 | 76.49 | 46.18 | 87.46 | 32.08 |
| Vivienda | 15.78 | 16.32 | 53.18 | 32.11 | 155.29 | 56.97 |
| Proceso industrial | 5.82 | 6.02 | 16.64 | 10.05 | 12.67 | 4.65 |
| Hoteles, hospitales, clubes y otros | 8.19 | 8.46 | 19.32 | 11.67 | 17.16 | 6.30 |
| Instalados en ese año (miles de m ²) | 96.694 | 100.00 | 165.633 | 100.00 | 272.580 | 100.00 |
| ACUMULADO (miles de m ²) | 839.686 | | 1,159.586 | | 1,665.502 | |

La instalación de calentadores solares en el sector vivienda ha crecido de forma sostenida, véase **Tabla 2**. En 2006 representaba el 16.32% de superficie instalada de calentadores solares y en 2010 tan solo 4 años después ya era el 56.97%. Para el caso de albercas la superficie instalada aumentó de 2006 a 2010 pero su participación porcentual disminuyó al pasar del 69.20% en 2006 al 32.08% en 2010 por el crecimiento del sector residencial.

La **Figura 16** muestra la grafica de los datos de la **Tabla 2** y se aprecia que el sector que mostró una mayor crecimiento fue el de vivienda.

Figura 16. Superficie instalada en miles de metros cuadrados de calentadores solares por tipo de aplicación para 2006, 2008 y 2010 en México.



Fuente. Elaboración propia con datos del PROCALSOL y de la Prospectiva de energías renovables 2012-2026 SENER.

1.3.1 POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO

La Prospectiva de Energías Renovables 2013-2027 describe tres diferentes escenarios de crecimiento del mercado de calentadores solares de agua que son: Planeación, Alto y Bajo.

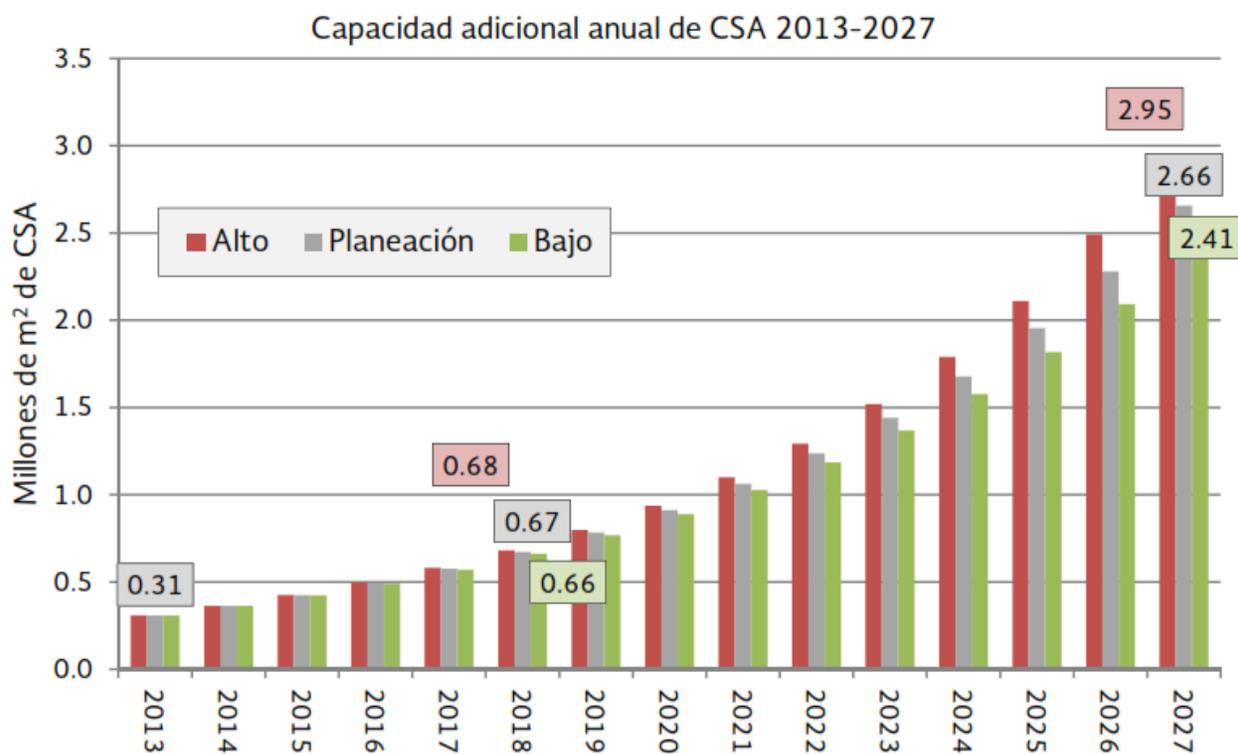
Los escenarios estiman el potencial de instalación de calentadores solares con base en los siguientes supuestos y variables: los consumos actuales de energéticos, potenciales de aprovechamiento realizados en años anteriores, estudios de potencial y rentabilidad para sectores como hoteles, hospitales, industria embotelladora y agronegocios, también para PYMES, el crecimiento de la economía y del crecimiento del sector residencial y la factibilidad de instalación por el tipo de vivienda, luego las anteriores consideraciones son sometidos a un modelo matemático.

- Escenario de planeación. Representa la base del análisis con una tasa media de crecimiento anual de la economía de 3.6% partiendo del desarrollo histórico del mercado de calentadores solares de agua.

- Escenario alto y bajo. Se estiman con base en una tasa media de crecimiento anual de la economía de 4.3% y 2.9% respectivamente, considerando una correlación directa entre el escenario macroeconómico y la variación del mercado de calentadores solares de agua.

Los escenarios descritos permiten vislumbrar el rumbo que podría seguir el desarrollo del calentamiento solar de agua en nuestro país bajo las condiciones económicas propuestas. Los tres escenarios se encuentran graficados en la **Figura 17**. Como se puede apreciar en la grafica, hasta el 2017 los tres escenarios son prácticamente iguales con una baja penetración de la tecnología. Después de ese año, con un mercado mucho más maduro, se prevé una aceleración del crecimiento, alcanzando en 2027 una instalación de 2.6 millones de metros cuadrados anuales de calentadores solares de agua en el escenario de planeación mientras que para el escenario alto y bajo de 2.95 y 2.41 millones de metros cuadrados anuales de calentadores solares de agua respectivamente frente a 0.31 millones de metros cuadros que se estiman en 2013.

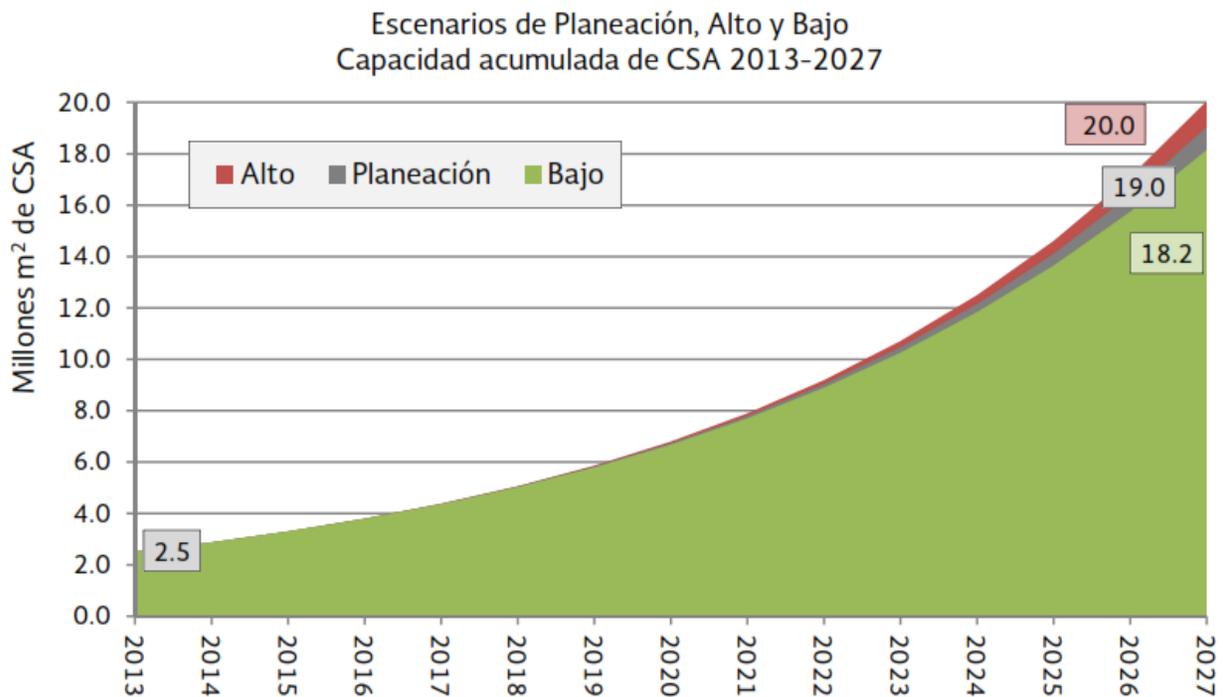
Figura 17. Estimación de la instalación anual de calentadores solares de agua en millones de metros cuadrados para 2013-2027 para los escenarios de Planeación, Alto y Bajo.



Fuente: Prospectiva de Energías Renovables de 2013-2027.

Bajo los mismos escenarios, en la **Figura 18** se presenta el área acumulada, para 2027 de acuerdo con el escenario de Planeación la capacidad total instalada alcanzará cerca de 19 millones de metros cuadrados, considerando que el 2013 inicia con un estimado de 2.5 millones de metros cuadrados. Los escenarios Alto y Bajo, tienen para 2027, 20 millones de metros cuadrados y 18.2 millones de metros cuadrados, respectivamente.

Figura 18. Evolución de la capacidad acumulada de calentamientos solar de agua 2013-2027 en México (millones de m² de calentadores solares de agua).



Fuente: Prospectiva de Energías Renovables de 2013-2027.

CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO

2.1 PANORAMA NACIONAL DEL GAS L.P.

Dada la importancia del gas LP en México y específicamente en el sector residencial y comercial, en esta sección trataremos algunos puntos relevantes del mercado nacional de gas LP del lado de la oferta, la demanda y la evolución histórica de los precios.

Oferta de gas LP

El gas LP que se distribuye en México está compuesto por una mezcla aproximada de 60% propano y 40% butano. Actualmente su oferta proviene de la producción nacional por parte de varias subsidiarias de PEMEX (PEMEX Refinación, PEMEX Exploración y Producción, PEMEX Gas y Petroquímica básica) y de las importaciones que en su mayoría provienen de Estados Unidos. En la **Tabla 3** se muestra la oferta nacional de gas LP en México de 2000 al 2013.

Tabla 3. Oferta nacional de gas LP en México de 2000 a 2013 en miles de barriles diarios.

| Origen | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Producción | 228.51 | 233.30 | 236.08 | 246.36 | 254.11 | 247.00 | 241.07 | 225.76 | 208.79 | 208.66 | 211.57 | 209.26 | 204.14 | 188.46 |
| en PR | 24.87 | 27.76 | 31.33 | 33.79 | 28.02 | 30.63 | 25.41 | 26.64 | 25.89 | 27.09 | 25.52 | 21.44 | 25.21 | 22.91 |
| en PGPB | 203.64 | 205.54 | 204.75 | 212.08 | 224.93 | 215.39 | 215.32 | 198.88 | 182.35 | 180.55 | 184.18 | 185.42 | 176.04 | 162.50 |
| en PEP | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.48 | 1.16 | 0.97 | 0.34 | 0.24 | 0.55 | 1.02 | 1.87 | 2.40 | 2.89 | 3.06 |
| Importación | 120.69 | 99.81 | 101.55 | 85.34 | 84.63 | 72.93 | 75.62 | 82.89 | 88.72 | 80.04 | 79.03 | 82.40 | 85.62 | 68.39 |
| TOTAL | 349.20 | 333.11 | 337.63 | 331.69 | 338.74 | 319.93 | 316.69 | 308.65 | 297.51 | 288.71 | 290.60 | 291.65 | 289.76 | 256.86 |

Fuente: Elaboración propia con información del SIE, Sistema de Información Energética SENER

Como se puede observar en la **Tabla 3**, en 2013 la oferta de gas LP fue de 256.86 miles de barriles diarios (mbd) de los cuales 188.46mbd, es decir el 73% correspondieron a la producción nacional y 68.39mbd, es decir el 27% a las importaciones.

La oferta de gas LP ha disminuido (en parte por el aumento en el uso del gas natural), mientras que en 2000 era de 349.20mbd en 2013 fue de 256.86mbd, lo que equivale a una disminución de 2.3% promedio anual en dicho periodo, respecto a la producción nacional pasó de 228.51mbd en 2000 a 188.46mbd en 2013 y las importaciones de 120.69mbd en 2000 a 68.39mbd en 2013.

Ventas de gas LP

A nivel mundial, en 2010 México ocupó el segundo lugar en el consumo per cápita de gas LP, al ubicarse aproximadamente en 65 kg por habitante. México ocupó el quinto lugar mundial en términos de consumo doméstico y el primero de Latinoamérica.

La demanda interna de gas LP se integra por el consumo de los sectores residencial, servicios, autotransporte, industrial y agropecuario que se muestra en la **Tabla 4** del año 2000 al 2011.

Tabla 4. Ventas por sector de gas LP en México de 2000 a 2011 en miles de barriles diarios.

| Sector | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Residencial | 214.2 | 209.3 | 209.2 | 208.2 | 210.1 | 200.1 | 198.1 | 196.0 | 191.5 | 183.5 | 188.3 | 186.2 |
| Servicios | 46.3 | 45.7 | 48.2 | 45.8 | 44.4 | 44.1 | 45.8 | 42.5 | 39.9 | 39.6 | 40.5 | 40.2 |
| Industrial ¹ | 31.1 | 28.8 | 29.5 | 27.5 | 28.3 | 28.3 | 29.8 | 29.1 | 27.8 | 27.4 | 28.9 | 27.1 |
| Autotransporte | 33.1 | 35.4 | 39.4 | 40.2 | 39.8 | 35.4 | 28.1 | 30.5 | 28.3 | 26.8 | 26.6 | 27.9 |
| Agropecuario | 5.5 | 6.1 | 6.3 | 5.7 | 5.5 | 6.2 | 4.2 | 3.3 | 4.6 | 4.4 | 4.4 | 4.3 |
| TOTAL | 330.3 | 325.3 | 332.6 | 327.5 | 328.2 | 314.1 | 306.0 | 301.3 | 292.1 | 281.8 | 288.8 | 285.8 |

¹ Incluye ventas de butano, isobutano y propano como materia prima en la región Centro.

Fuente: Prospectiva del Mercado de Gas Licuado de Petróleo 2012-2026, con datos de IMP, con base en PEMEX y SENER.

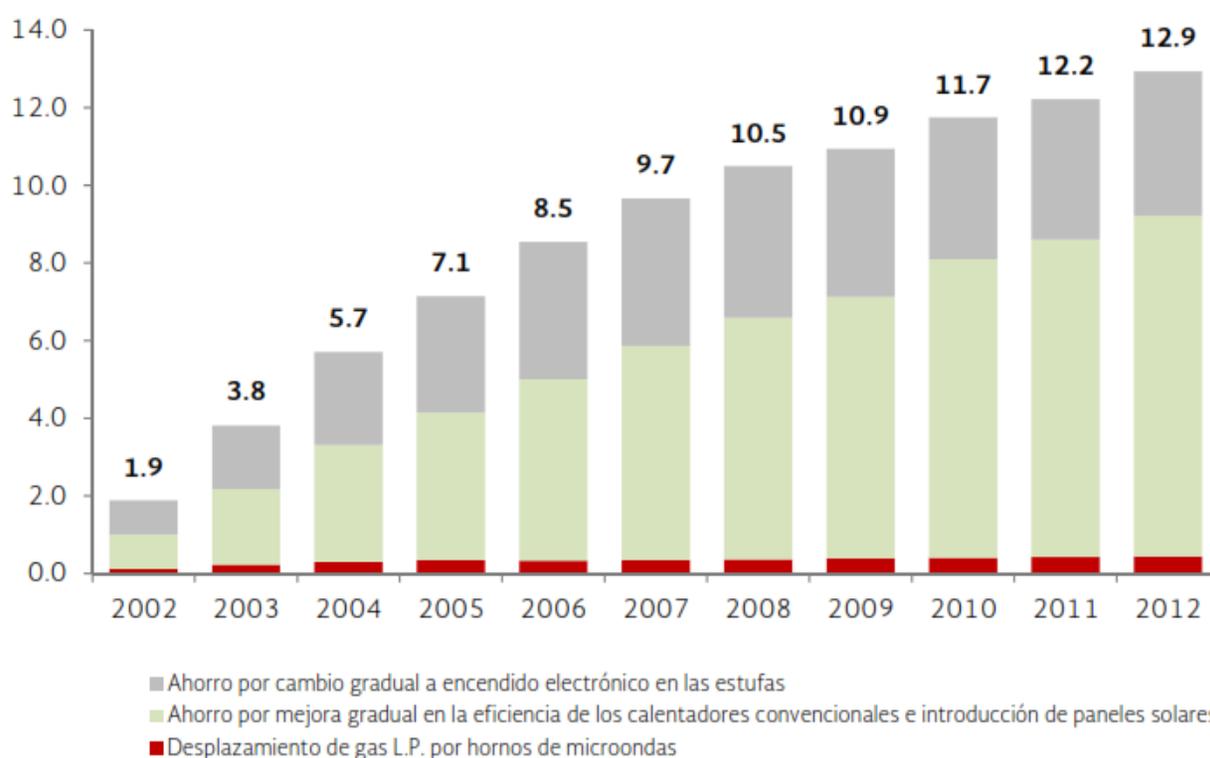
El sector residencial es el principal consumidor de gas LP en México. Durante 2011, consumió 65.2% del total, el segundo lugar lo ocupó el sector comercial o de servicios, con 14.1% del total. Los sectores autotransporte e industrial representaron 9.8% y 9.5%, respectivamente. El sector con menor consumo fue el agropecuario con el 1.5%.

Por otro lado, es importante mencionar que el consumo de gas LP tiene un componente estacional relevante y está asociado a las condiciones climáticas en las distintas regiones del país. El consumo de gas LP aumenta cuando las temperaturas disminuyen. En los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero el consumo de gas LP se incrementa mientras que en los meses restantes el consumo promedio es menor a los meses de invierno.

La relevancia del gas LP en el sector residencial es indiscutible y su análisis de gran importancia, su uso principal en las viviendas es para el calentamiento de agua, la cocción de alimentos y la calefacción de interiores. Aunque la leña y el gas natural también se utilizan en las viviendas con los mismos fines aún no tiene una participación tan extendida como el gas LP. Por ejemplo para 2011, en el sector residencial si consideramos solo 3 energéticos, la leña, el gas natural y el gas LP, el gas LP tendría una participación porcentual del 55.8%, la leña un 38.0% y el gas natural un 6.1%.

Con respecto a la demanda interna durante 2011 fue de 285.8 mbd, 1% menor con respecto a 2010. Diversos factores han ocasionado que la demanda de gas LP se mantenga estable aunque con ligeras disminuciones al paso de los años, uno muy importante ha sido la mejora en la eficiencia de los calentadores de agua y otros como la preferencia por el uso del horno de microondas, la mejora de estufas y la introducción de calentadores solares que ha venido ocurriendo en los últimos años. También ha contribuido un incremento en el consumo del gas natural, principalmente en la región Noreste debido a la disponibilidad de infraestructura. Véase **Figura 19**.

Figura 19. Estimación del ahorro de gas LP en el consumo residencial por mejoras técnicas y cambio en los patrones de consumo, 2002-2012 (Miles de barriles diarios).



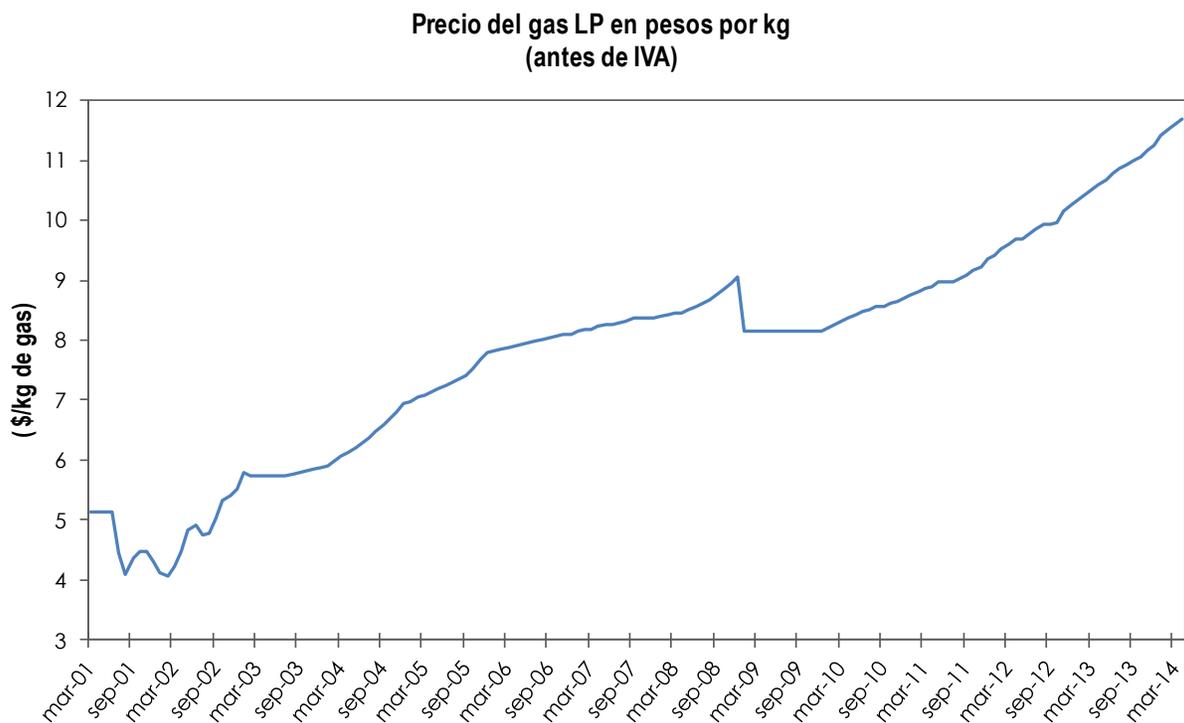
Fuente: Prospectiva de Gas LP 2013-2027

La Prospectiva de gas LP 2013-2027 contempla que los sectores residencial y servicios se mantendrán como los más importantes en cuanto a consumo de gas LP. También continuará el proceso de sustitución de gas L.P. por gas natural en algunas zonas del país. Las mejoras en eficiencia de calentadores de agua y el crecimiento de calentadores solares contrarrestará significativamente el incremento de la demanda de combustibles derivada del aumento de la población. Se espera un incremento en la demanda interna de gas LP de 0.3% anual de 2012 a 2027.

En cuanto a los precios de gas LP, el país se divide en regiones y a cada una se les asigna un precio. En el caso de los precios al público se encarga la Secretaría de

Economía. En la grafica de la **Figura 20** se observa el precio ponderado nacional al público del gas LP para el periodo 2001-2013, en pesos por kilogramo y antes de IVA. Se puede observar cómo ha ido incrementando el precio por kilogramo de gas LP, tendencia que continuará al paso de los años.

Figura 20. Precio promedio nacional del gas LP en pesos por kilogramos (precios antes de IVA) para el periodo de marzo de 2001 a marzo de 2014.



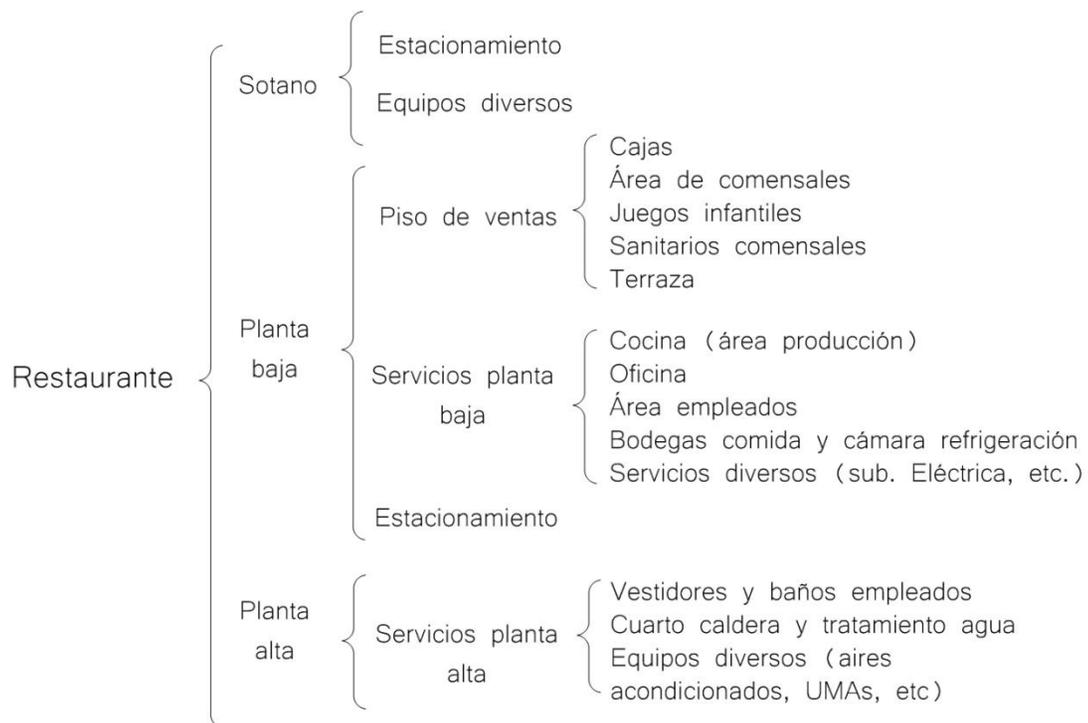
Fuente: Elaboración propia con datos de la SENER

2.2 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El análisis y propuesta de un sistema de calentamiento solar de agua se realizará a un restaurante ubicado en la Ciudad de México, en la delegación Benito Juárez. El restaurante inicio operaciones en octubre de 2010 y su instalación de calentamiento solar de agua comenzó a funcionar en junio de 2013.

Las coordenadas del establecimiento son 19°21' latitud Norte, 99°09' longitud con una altitud de 2261 msnm. La delegación Benito Juárez se asienta sobre terreno plano, el clima de la zona es templado sub-húmedo con lluvias en verano de menor humedad y de humedad media con un rango de temperatura de 12 a 18°C.

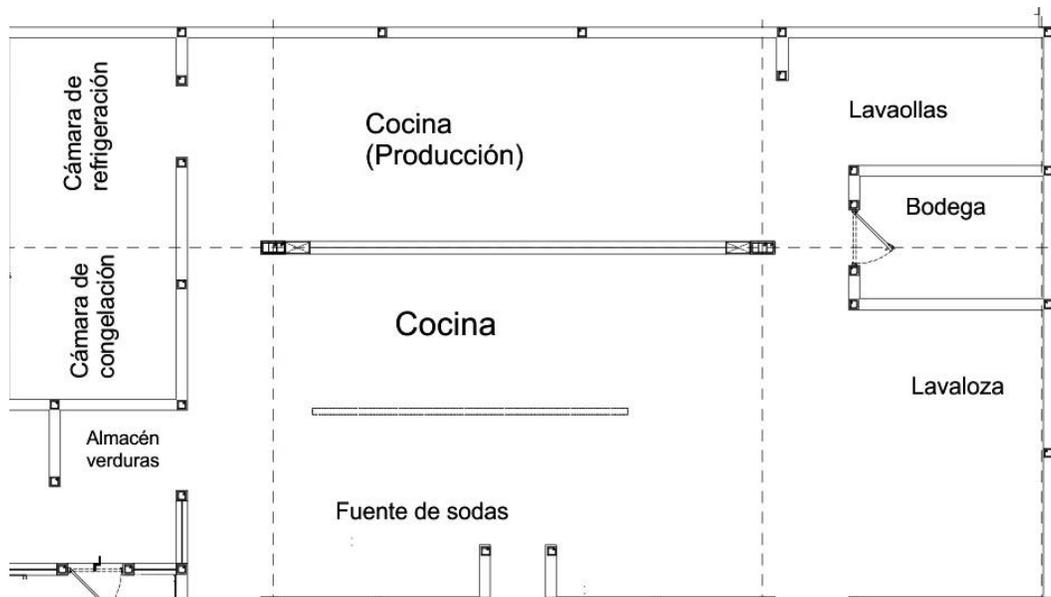
En cuanto al restaurante cuenta con planta baja, planta alta, azotea y sótano, el área total construida son 2,517.88m². Las áreas del restaurante se distribuyen de la siguiente forma:



La **Figura 21** muestra una distribución de la cocina y en la **Figura 22** se ve el primer piso y la azotea que está delimitada en color azul y que se encuentra a una altura de 3.05m sobre el nivel del primer piso.

Los metros cuadrados disponibles en azotea y aptos (es decir sin sombras ni obstáculos) son aproximadamente 300m².

Figura 21. Áreas que conforman la cocina, que se ubica en la planta baja.

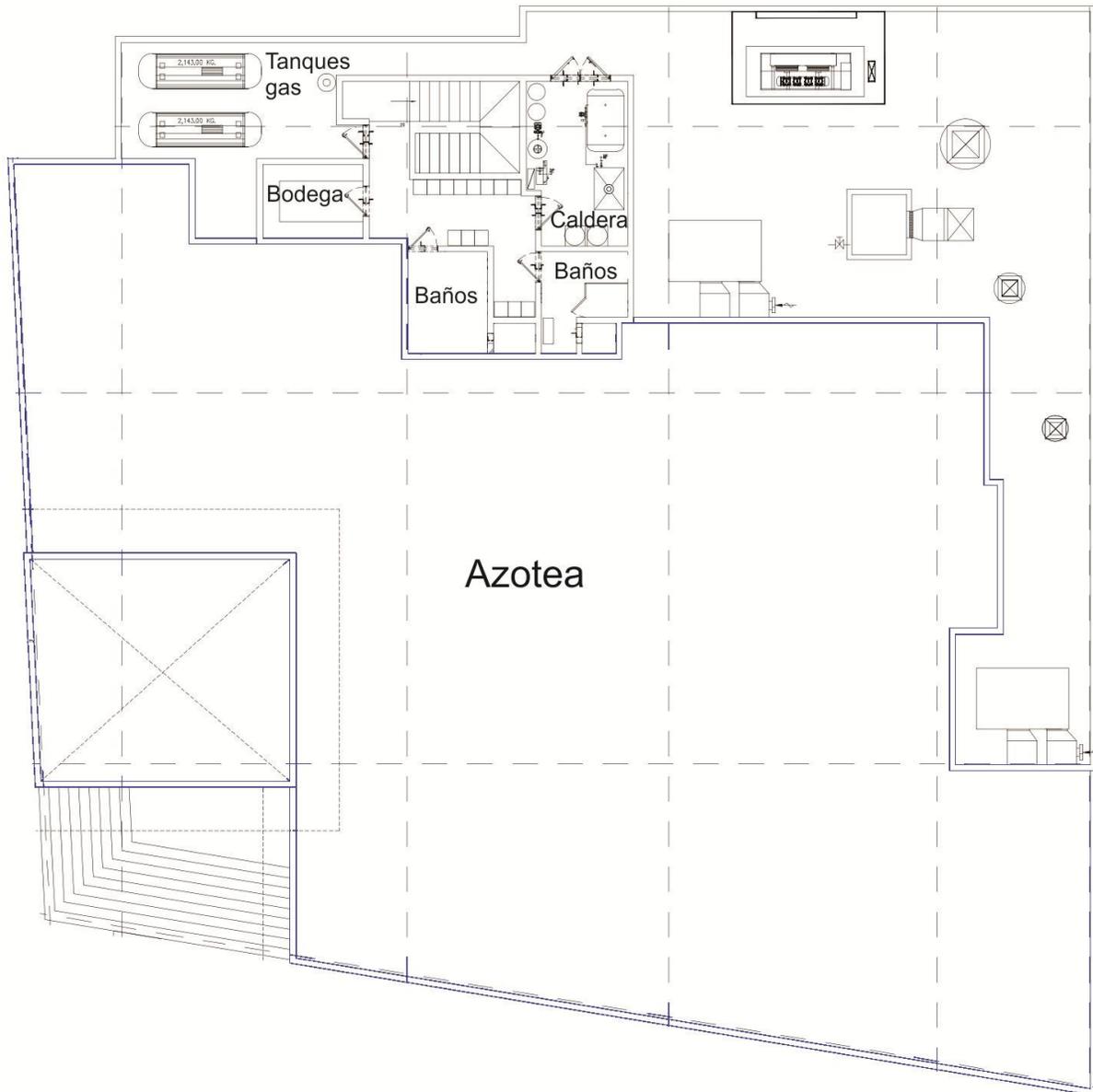


2.3 CONSUMO DE GAS L.P. DEL RESTAURANTE

El restaurante tiene 2 tanques estacionarios para el almacenamiento de gas LP con capacidad de 2,800 litros al 100% de agua cada uno. Están ubicados en la azotea del restaurante. Los usos del gas LP en restaurante son para:

- **Cocina**, en los quemadores de estufas, parrillas, hornos, baños maría, etc.
- **Calentador** para agua caliente.

La medición del suministro de gas LP es a través de un solo medidor y la instalación no está dividida por usos, es decir ambos tanques distribuyen gas a todos los usos indistintamente. De acuerdo a datos proporcionados por la empresa, en otras sucursales similares ubicadas en DF tiene separado el consumo de gas LP para cada uso y para el calentador de agua caliente destinan en promedio el 43% y para la cocina del 57% sin embargo se desconoce si los equipos de cocina son los mismos y en las mismas cantidades que la sucursal en cuestión o si la afluencia de clientes es similar entre otros que impiden tomar este dato como general y aplicable a este lugar.

Figura 22. Planta alta y azotea (delimitada en color azul).

En esta sección se analizará el consumo total de gas LP a partir de la facturación desde noviembre de 2010 hasta el mes anterior a la puesta en marcha del sistema de precalentamiento solar (mayo 2013).

El periodo entre recargas de gas LP es variable, en promedio cada 7 días. Se calculó el consumo promedio diario dividiendo los litros de gas LP recargados entre el número de días del mismo periodo y con ese dato se obtuvo el consumo promedio mensual Véase

Figura 23. En la grafica se puede apreciar que en los meses de noviembre y/o diciembre se presenta un consumo mayor que en el resto del año.

En la **Tabla 5** se presentan los valores máximos, mínimos y promedio de varios parámetros obtenidos a partir del consumo total de gas LP para el periodo de noviembre de 2010 a mayo de 2013.

Figura 23. Consumo promedio mensual de gas LP histórico de noviembre de 2010 a junio de 2013.

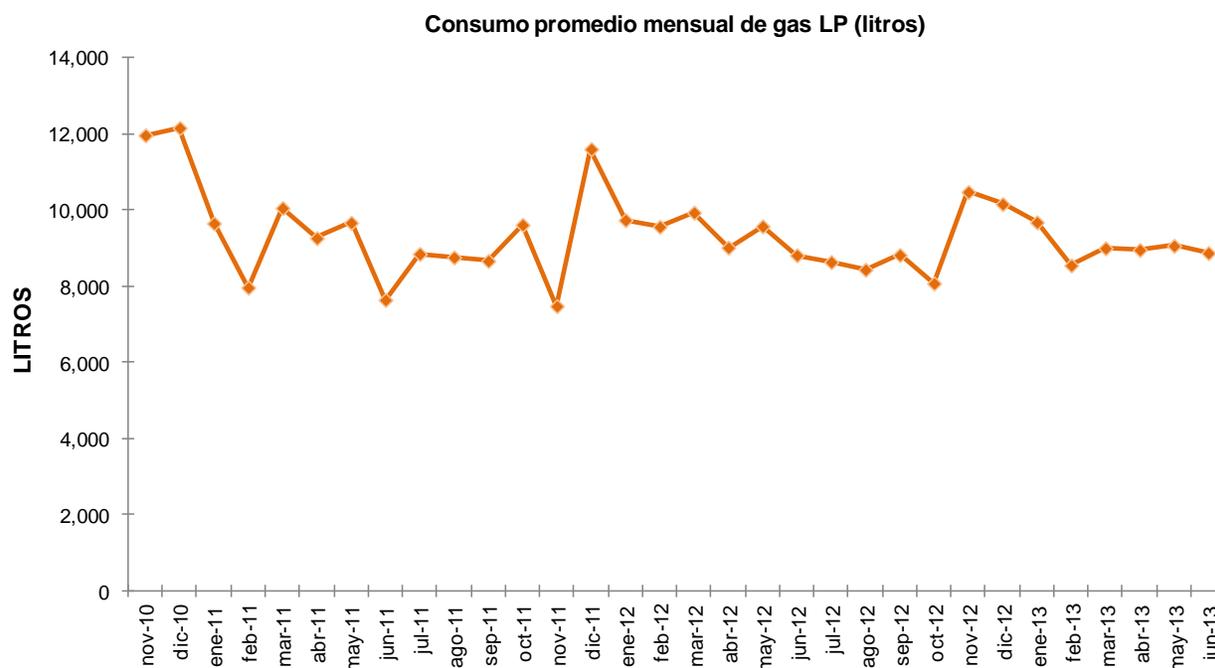


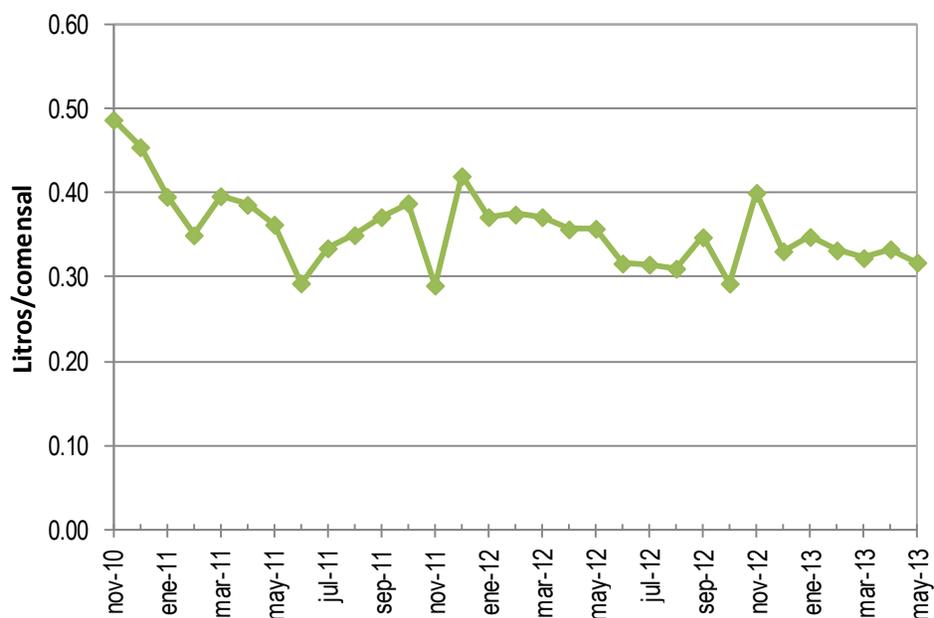
Tabla 5. Valores promedio, máximos y mínimos del consumo de gas de noviembre de 2010 a mayo de 2013.

| Valor | Consumo promedio (Its/día) | Its/cliente | MJ/cliente | Lts/mes |
|----------|----------------------------|-------------|------------|----------|
| Promedio | 307.0 | 0.358 | 9.5 | 9,341.7 |
| Máximo | 398.6 | 0.487 | 13.0 | 12,151.1 |
| Mínimo | 249.0 | 0.290 | 7.7 | 7,470.9 |

2.3.1 ÍNDICE DE CONSUMO DE GAS LP POR COMENSAL.

Al relacionar el consumo promedio mensual de gas LP con el número de clientes o comensales en el mismo periodo de tiempo, se obtiene un índice de consumo total de gas LP por cliente, como se aprecia en la **Tabla 5**, el valor promedio es 0.358 lts/cliente, con un máximo de 0.487 lts/cliente y un mínimo de 0.290 lts/cliente que se grafica para el periodo de análisis en la **Figura 24**.

Figura 24. Litros promedio de gas LP por comensal de noviembre de 2010 a mayo de 2013.



2.3.2 ÍNDICE DE CONSUMO DE AGUA POR COMENSAL.

El consumo mensual de agua potable del restaurante se grafica en la **Figura 25**. El agua fría se utiliza para limpieza en general, en sanitarios, llaves, etc. y cuando se calienta se ocupa en cocina para baños maría, lavado de loza y ollas, etc. Si el consumo mensual de agua potable se divide entre el número de comensales para ese mes, se obtiene el índice promedio de litros de agua potable por comensal, este índice se grafica en la **Figura 26**. Consideramos que cada comensal representa una comida.

Figura 25. Consumo mensual total de agua potable del restaurante (m³).

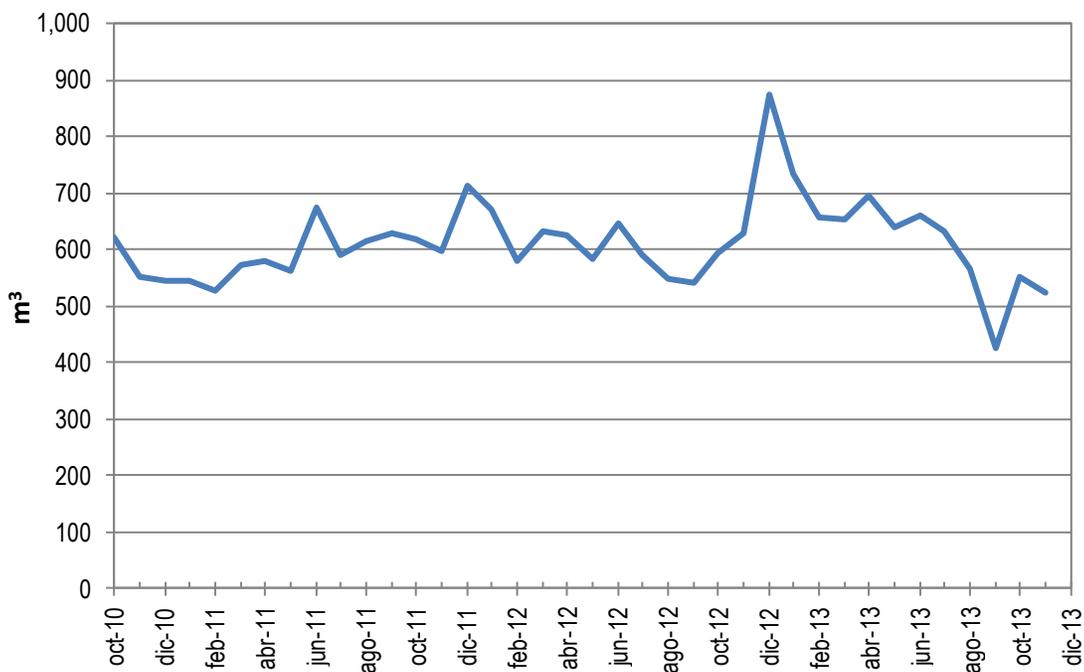
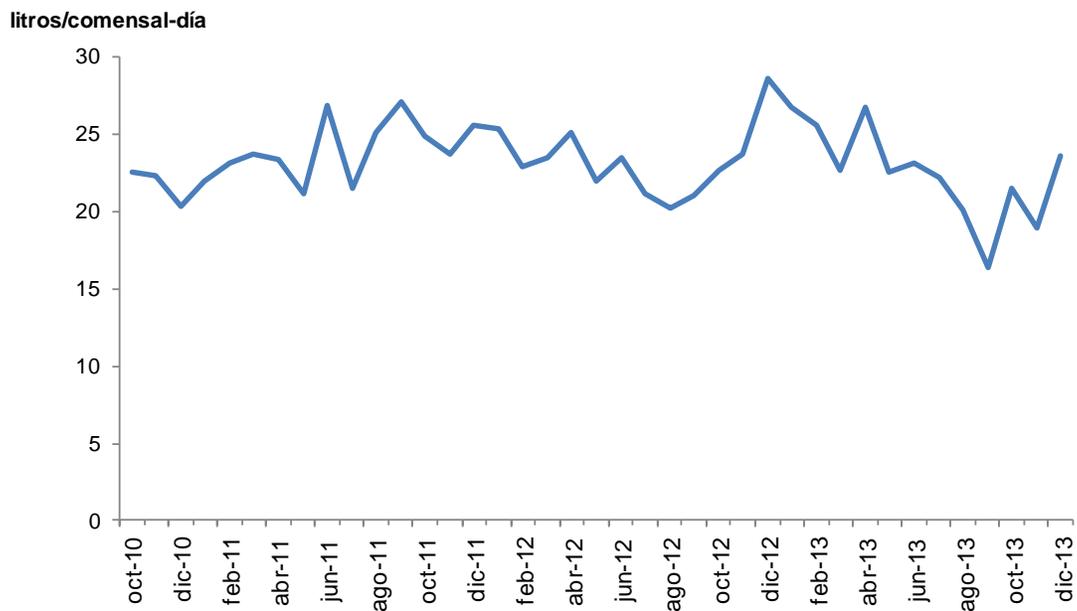


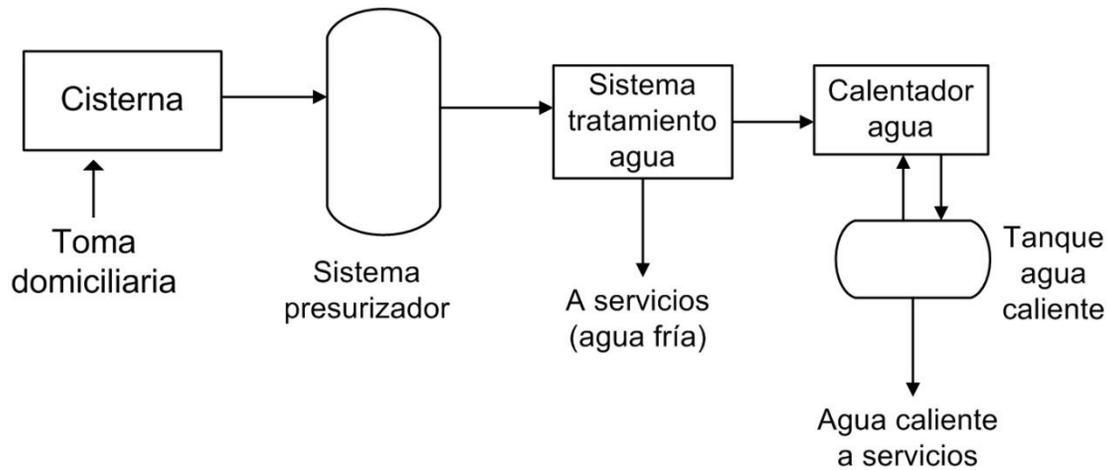
Figura 26. Índice del consumo total de agua potable por comensal, valor promedio mensual.



2.4 SISTEMA CONVENCIONAL DE CALENTAMIENTO DE AGUA

La **Figura 27** muestra un diagrama esquemático del sistema de distribución de agua potable del restaurante.

Figura 27. Diagrama de la distribución de agua potable en el restaurante.



El sistema de generación convencional de agua caliente es por medio de un calentador para agua marca MASSTERCAL modelo: LCII 450-C EI/IO que funciona con gas LP y tiene 113,400 kilocalorías/hr de entrada y 98,658 (salida).

Figura 28. Calentador a gas LP marca comercial MASSTERCAL similar al que tienen en el restaurante.



Nota: Las kilocalorías por hora disminuyen un 4% por cada 300 metros de altura sobre el nivel del mar.

Fuente. Imagen de la izquierda de <http://www.indmass.com.mx/productos>

La instalación hidráulica del calentador consiste en un circuito cerrado en el cual, la entrada y la salida de agua del calentador deben conectarse a su propio tanque de almacenamiento de agua, para su recirculación. El tanque de almacenamiento de agua del calentador tiene una capacidad de 1500 litros y la temperatura del agua se mantiene a 60°C.

2.4.1 USOS DEL AGUA CALIENTE

El restaurante usa agua caliente para:

- **Cocina:** Lavado de loza, ollas y demás trastes, baño maría y lavamanos como uso principal.
- **Regaderas:** para empleados, en menor proporción.

Procedimiento en el lavado de loza.

El lavado de loza se realiza mediante el siguiente proceso:

- Prelavado manual. Se retiran restos de comida y basura que haya en platos y vasos y posteriormente se enjabonan y enjuagan con agua fría o tibia.
- Lavado con máquina. Se ocupa una maquina lavadora de loza marca FERCO que utiliza productos sanitizantes que requieren que la temperatura del agua sea de 65°C para la primera etapa de lavado y de 75°C en una segunda etapa. El agua que viene calentador se encuentra a 60°C y para conseguir la temperatura deseada, la lavadora de loza cuenta con su propio quemador para que el agua alcance la temperatura requerida en cada etapa, de 65 y 75°C respectivamente.

Lavado de ollas

En el lavado de ollas se requiere agua caliente aproximadamente a 60°C y el lavado es manual. En fregaderos y tarjas, la temperatura de uso del agua caliente es aproximadamente de 40°C ya que se usan como lavamanos y para lavar frutas y verduras.

Regaderas

Según el personal del restaurante, solo de 5 a 6 empleados al día hacen uso del servicio de regaderas del restaurante. Cuentan con 2 regaderas para empleados, una en el baño de hombres y otra en el baño de mujeres.

2.5 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DIARIO DE AGUA CALIENTE

El restaurante no tiene medición del consumo de agua caliente y para dimensionar un sistema de calentamiento solar, es crucial conocer el volumen de agua caliente requerido. Existen alternativas para estimar el volumen de agua caliente como son:

1) Medición empírica del gasto volumétrico de las regaderas y llaves de los muebles del establecimiento con un recipiente de volumen conocido y cronómetro. Una vez conocido el gasto volumétrico se multiplica por el tiempo de uso tomando en cuenta su frecuencia de uso y un factor de coincidencia entre equipos. Se debe considerar la capacidad de los equipos y si cuentan con ficha técnica que indique su consumo promedio de agua.

2) Tomar un valor promedio estándar y unitario para la aplicación a la que está destinada el agua caliente multiplicado por el número de usuarios.

Este valor puede deberse al conocimiento de los hábitos de consumo de los usuarios, la observación y la experiencia del instalador o remitirse a normas o reglamentos de Instalaciones que brindan consumos unitarios de agua caliente. Por ejemplo en España existe el Reglamento de instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y el Código Técnico de Edificación (CTE) que en su apartado HE-4 proporcionan una tabla de demandas de agua caliente de referencia. Los valores de consumo que se presentan en las normas no necesariamente deben adoptarse rigurosamente al dimensionamiento de todo sistema de calentamiento de agua con energía solar, son valores de referencia y cada caso tiene que tomar en cuenta los hábitos de consumo del usuario y las condiciones particulares del lugar.

3) Estimación del consumo de agua caliente a partir del consumo de combustible, si se dispone de los consumos de combustible para calentar agua y la eficiencia media del calentador convencional. Se puede emplear la siguiente ecuación del balance de energía en condiciones de estado estable:

$$Q_{\text{proporcionada por el gas LP}} = Q_{\text{agua}} \quad (2.1)$$

$$m_{\text{gas}} \times PC_{\text{gas}} \times \eta_{\text{calentador}} = m_{\text{agua}} \times c_p \times (T_f - T_i) \quad (2.2)$$

Donde:

m_{gas} ; consumo de gas LP en litros

PC_{gas} ; poder calorífica del gas LP igual a 26.61 MJ/lt

η ; eficiencia del calentador de gas igual al 83%

m_{agua} ; producción de agua caliente en litros

C_p ; capacidad calorífica del agua igual a 4.18 kJ/kg K

T_f ; temperatura final del agua caliente en el tanque de almacenamiento del calentador, 60°C

T_i ; temperatura inicial del agua, 15.45°C (dato de la norma ambiental NADF-008-AMB-2005)

En nuestro caso de estudio enfrentamos el problema de que no se tienen los consumos de gas LP exclusivos del calentador de agua. Como forma de ejercicio, con la ecuación 2.1 se puede estimar el volumen de agua caliente suponiendo un consumo de gas y viceversa. Se hizo este procedimiento para el periodo de noviembre de 2010 a mayo de 2013, antes de la entrada del sistema de calentamiento solar. En la **Tabla 6** se presentan el promedio general del periodo analizado.

Tabla 6. Valores promedio obtenidos como porcentaje de agua caliente del total del volumen y su respectivo porcentaje de gas. LP.

| % de agua caliente | % gas LP |
|--------------------|----------|
| 30.0 | 17.0 |
| 35.0 | 19.8 |
| 40.0 | 22.7 |
| 45.0 | 25.5 |
| 50.0 | 28.3 |
| 54.2 | 30.0 |
| 55.0 | 31.1 |
| 61.4 | 34.0 |

2.6 SISTEMA ACTUAL DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA

El sistema de calentamiento solar de agua del restaurante comenzó a operar en junio de 2013. El campo de colectores se compone de 32 colectores planos de la marca Chromagen modelo CR-120, orientados al sur, dispuestos en 5 filas, tres de ellas compuestas por 6 colectores, una por 5 y una más con 9 unidades. El sistema solar cuenta con su propio tanque de almacenamiento de agua caliente que en este caso son tres tanques horizontales de 3,000 litros cada uno. Se trata de un sistema de captación de energía solar y acumulación de agua caliente centralizado, es decir, un solo sistema distribuye a todos los usos del agua caliente. El tipo de circuito es directo, es decir, que el agua que se calienta en los colectores es la que se destina a los usos finales. Además el encargado de mantenimiento reporta que no hay recirculación de agua caliente.

Durante el recorrido y visita al lugar se tomaron algunas imágenes del campo de colectores instalado en el restaurante, se presentan a continuación. En el próximo capítulo se hará un análisis de este sistema de calentamiento solar.

Figura 29. Imágenes del campo de colectores. Toma frontal.



Figura 30. Imágenes del campo de colectores. Vista frontal.



Figura 31. Imágenes del campo de colectores. Vista lateral de la primera fila.



Figura 32. Imágenes del campo de colectores. Vista lateral.



Figura 33. Imágenes de los tanques de almacenamiento. Vista superior.



2.6.2 IMÁGENES CON CÁMARA TERMOGRÁFICA

En las visitas al restaurante se tuvo la oportunidad de medir la temperatura en las superficies expuestas en el campo de colectores con los siguientes instrumentos:

- Medidor termopar incorporado a cámara termográfica FLUKE modelo Ti125.
- Termómetro infrarrojo marca AVALY.

Las mediciones de temperatura fueron puntuales, no son un perfil de temperaturas del campo de colectores, sin embargo se presentan para apreciar la temperatura registrada en el campo.

Las mediciones de temperatura se realizaron de la siguiente forma:

- Mediciones puntuales sobre la superficie de la tubería de cobre en partes desnudas, normalmente en las conexiones entre colectores. Se supondrá que la temperatura de la superficie es la temperatura del agua.
- Para la toma de temperatura, el termopar se puso en contacto directo sobre la superficie de cobre, una vez que la lectura se estabilizó se guardó el dato y se procedió a tomar la lectura en otro punto.
- La fecha de medición fue el día 10 de marzo de 2014 e inicio a las 11:20am.

Los tanques de almacenamiento de agua caliente cuentan con su propio medidor de temperatura. Se tomó la lectura de 2 días, el 21 de febrero a las 13:59 marcaba 30°C y el 10 de marzo de 2014 a las 12:05 se podía leer 28.9°C.

La **Figura 34** presenta la conexión en el campo de colectores y con etiquetas se muestran los puntos donde se tomó la lectura de temperatura promedio con el termopar marca FLUKE para el día 10 de marzo de 2014.

De la **Figura 35** a la **37** se aprecian las imágenes captadas con la cámara termográfica para algunas de las ubicaciones señaladas en la imagen anterior.

Figura 34. Conexión del campo de colectores y ubicación y lectura de las temperaturas medidas con el termopar.

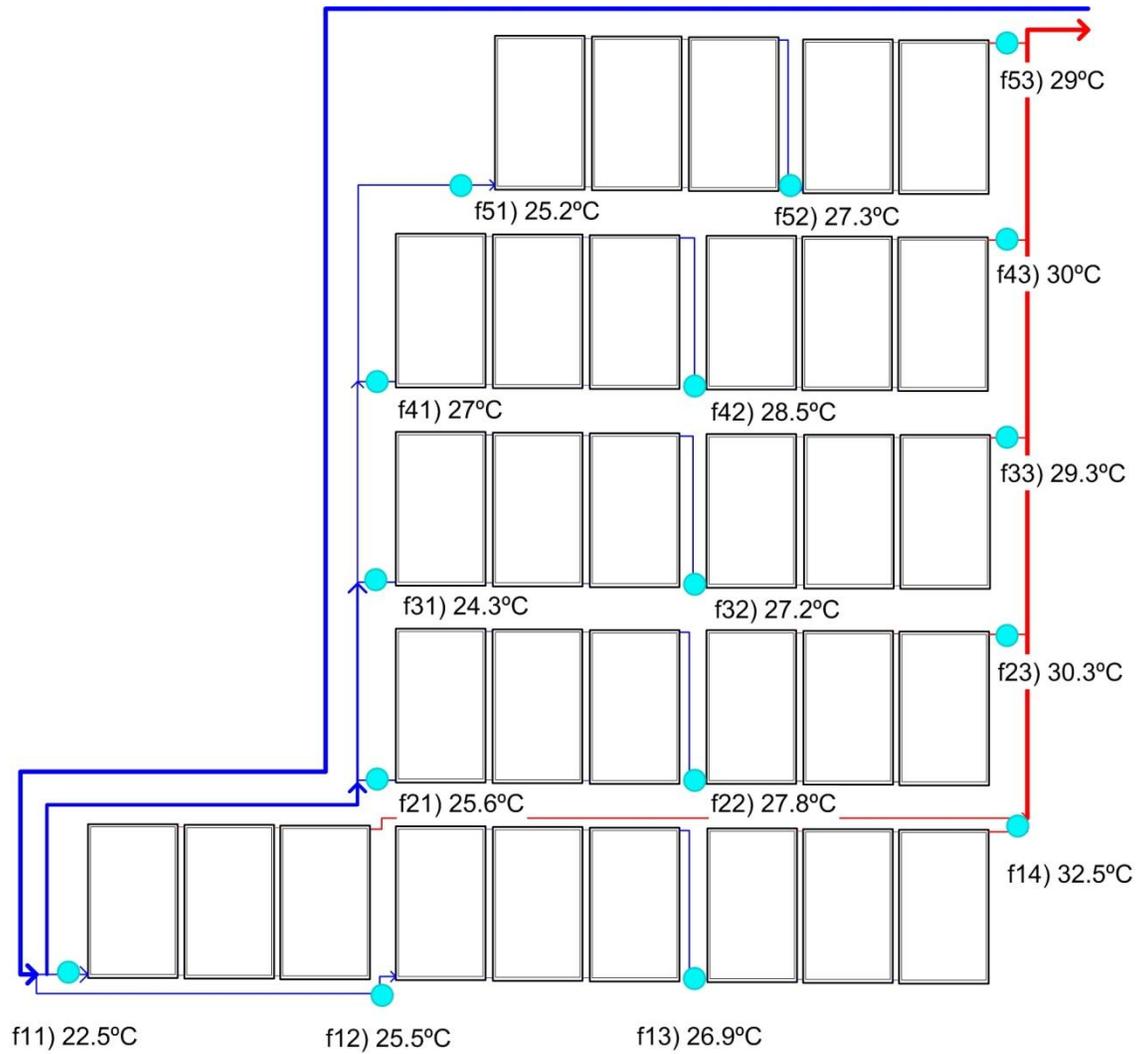


Figura 35. Imágenes termograficas de las fila 2, 3 y 4, las tres imágenes de la fila superior corresponden a temperaturas fila 2, f21, f22 y f23, el siguiente renglón muestra temperaturas fila 3, posiciones f31, f32 y f33 por último la temperaturas de la fila 4 posiciones f41, f42 y f43.



Figura 36. Tubería principal de alimentación de agua al campo de colectores.



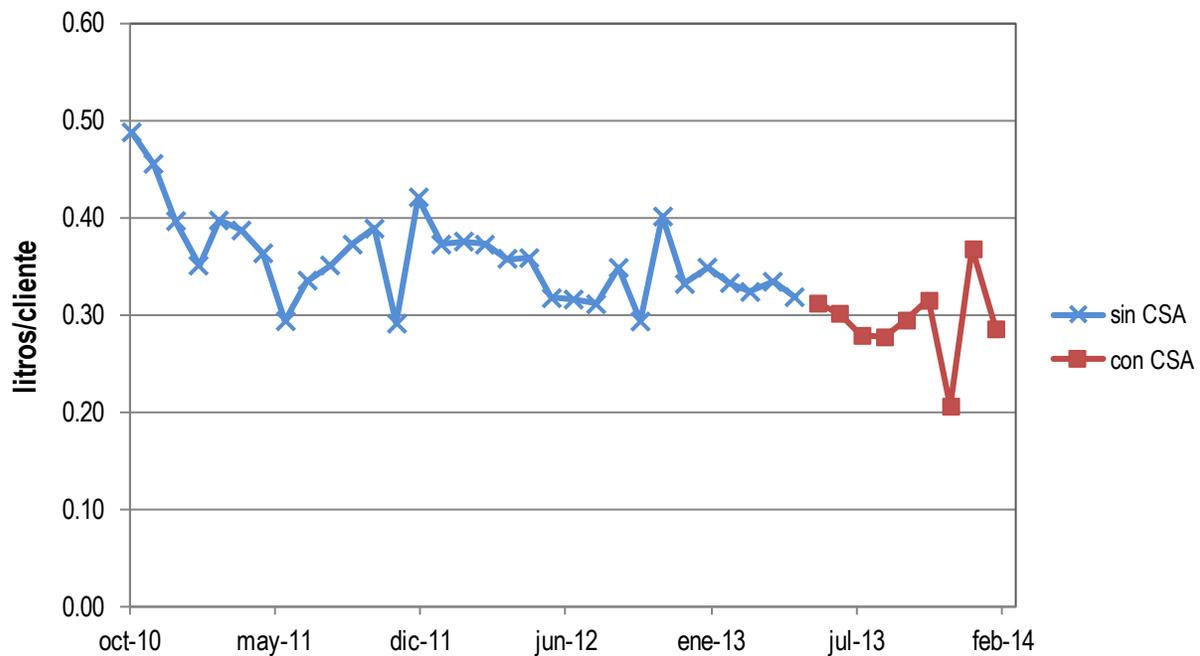
Figura 37. Salida de agua de la última fila de colectores solares.



2.7 AHORRO DE COMBUSTIBLE CON LA INSTALACIÓN DE CALENTAMIENTO SOLAR ACTUAL.

La **Figura 38** es la grafica del índice del consumo total de gas LP por cliente. En la sección 2.2.2 ya se había presentado este índice, la diferencia es que ahora se grafican los datos antes del sistema de calentamiento solar actual y los datos después de la puesta en marcha de este sistema (se tiene información hasta febrero de 2014). Podemos observar que ha habido un decremento en el consumo global de gas LP por cliente.

Figura 38. Índice del consumo total de gas LP por cliente.



Solo se conoce el consumo de agua potable y el consumo total de gas LP y como muestra del consumo de gas LP que representaría determinado consumo de agua en la Sección 2.3.2 se calculó cual sería el consumo de gas LP (como porcentaje del total) para calentar un determinado volumen de agua caliente (tomado como un porcentaje del consumo de agua potable) de varias opciones y con una eficiencia de calentador del 83% y un poder calorífico para el gas LP de 26.6 MJ/litro. **Tabla 7.**

Para estimar el ahorro de combustible que se ha logrado con el sistema de calentamiento solar de agua se hará de forma indirecta considerando dos índices, el índice de litros totales de gas LP por litro de agua y el índice de litros totales de gas LP por comensal (ambos índices son sobre el total del consumo de agua y gas por qué no se tienen datos específicos) luego se compararán los valores de cada índice antes y después del sistema solar.

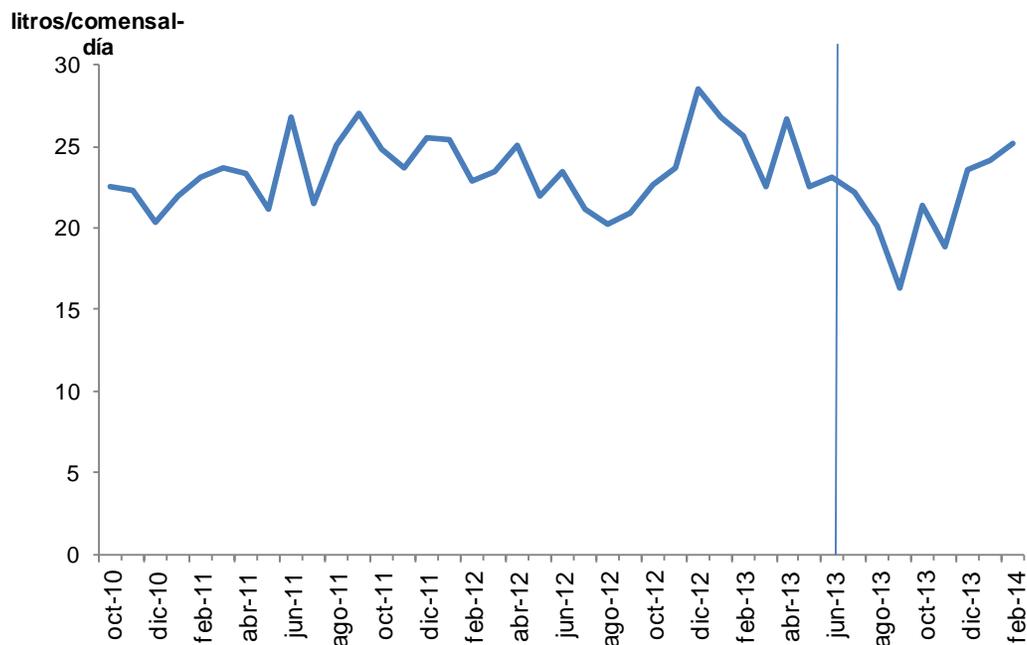
Tabla 7. Consumos de gas LP considerando que del agua potable un cierto porcentaje es agua caliente.

| % de agua caliente | % gas LP |
|--------------------|----------|
| 30.0 | 17.0 |
| 35.0 | 19.8 |
| 40.0 | 22.7 |
| 45.0 | 25.5 |
| 50.0 | 28.3 |
| 54.2 | 30.0 |
| 55.0 | 31.1 |
| 61.4 | 34.0 |

El índice de consumo total de agua por comensal por día no se usó para estimar el ahorro de gas LP por no estar relacionado directamente. Este tenía un valor promedio de 23.7 litros/comida antes de la implementación del sistema de CSA y pasó a 21.7 litros/comida. Se desconocen las causas de la disminución del consumo global de agua potable por comensal aunque parece que empezó a repuntar al final del periodo.

Figura 39.

Figura 39. Consumo total de agua por comensal por día



En las **Tablas 8 y 9** se indica el valor promedio, máximo y mínimo de varios índices (se resaltaron con café los que se usan para estimar el ahorro de gas LP), antes del sistema de calentamiento solar de agua y después de su implementación.

Tabla 8. Valores promedio de algunos índices antes de la instalación del sistema de CSA.

VALORES PROMEDIO
Periodo de noviembre de 2010 a mayo de 2013.

| Litros de agua al mes | Comidas al mes | Litros totales de agua por comida | Litros de gas LP por litros de agua | Consumo de gas LP (lts/mes) | lts gas LP por comida |
|-----------------------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 620,083 | 26,092 | 23.7 | 0.0151 | 9,341.7 | 0.357 |

Tabla 9. Valores promedio de algunos índices después de la instalación del sistema de CSA y variación.

Periodo de junio 2013 a febrero de 2014

| Litros totales de agua | Comidas al mes | Litros totales de agua por comida | Litros de gas LP por litros de agua | Consumo de gas LP (lts/mes) | lts gas LP por comida | |
|----------------------------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|--------|
| 594,426 | 27,381 | 21.7 | 0.0135 | 8,012.5 | 0.2922 | |
| Variación del promedio (%) | -4.1 | 4.9 | -8.54 | -10.53 | -14.23 | -18.10 |

A partir de las tablas anteriores podemos comentar que:

- 1) La información disponible es insuficiente para calcular el ahorro promedio mensual de gas LP. Se usaron dos índices para estimar el ahorro, litros totales de gas LP por litro de agua y litros de gas LP por comida. Si consideramos que la disminución en estos índices se deba únicamente al ahorro de gas LP por el sistema de calentamiento solar, entonces el ahorro mensual de gas LP tendría el valor límite de 18.10%.
- 2) Como los índices fueron calculados con el total de gas LP y con los litros totales de agua potable, la disminución que presentan podría ser por otras causas y no deberse exclusivamente al sistema de calentamiento solar de agua. Algunas de las causas podrían ser:
 - Reparación de fugas de gas y/o agua.
 - Cambio de algún quemador y/o equipo en cocina.
 - Cambio en los hábitos de uso del agua caliente
 - Instalación de dispositivos ahorradores de agua en llaves de tarjas y fregaderos.

No fue posible confirmar alguna de las opciones con el personal del restaurante por lo que queda indeterminada la o las causas reales de la disminución de los índices.

- 3) Suponiendo que el ahorro de gas LP sea del 18.10% debido al sistema de CSA, este equivaldría a un consumo de gas LP de 1,690.85 litros al mes que corresponderían a un consumo de agua caliente a 60C de 200,000 litros al mes, es decir 32.3% del total del agua potable. El cálculo se realiza con la ecuación 2.2 que se vuelve a presentar a continuación.

$$m_{\text{gas}} \times PC_{\text{gas}} \times \eta_{\text{calentador}} = m_{\text{agua}} \times c_p \times (T_f - T_i) \quad (2.3)$$

donde:

m_{gas} ; consumo de gas LP en litros, en este caso el ahorro de gas LP

PC_{gas} ; poder calorífica del gas LP igual a 26.61 MJ/lt

η ; es la eficiencia del calentador de gas igual al 83%

m_{agua} ; producción de agua caliente en litros

c_p ; capacidad calorífica del agua igual a 4.18 kJ/kg K

T_f ; temperatura final del agua caliente que viene de los colectores, 60°C

T_i ; temperatura inicial del agua, 15.45°C (dato de la norma ambiental NADF-008-AMB-2005).

- 4) La superficie colectora existente es de 83.2m², por lo que el volumen de acumulación (75litros/m²) correspondiente sería de 6,240 litros. Al tener un volumen de acumulación mayor (9,000 litros) la demanda de agua caliente podría ser mayor a 6,240 litros diarios. La instalación solar no tiene medidor de caudal por lo que no sabemos cuántos litros de agua caliente son en realidad consumidos.
- 5) En las 2 visitas realizadas al lugar, se observó que la temperatura del agua en los tanques de almacenamiento era de 30C.
- 6) En instalaciones con colectores planos, normalmente la temperatura promedio que alcanza el agua es 50C. Además como el volumen de los tanques de almacenamiento es 9,000 litros, la temperatura debe ser menor a 50C al contar con un área de captación calculada para 6,240 litros, aproximadamente estaría de 35 a 40 C.
- 7) El ahorro de gas LP debe ser menor al 18.10% del total. El sistema solar no abastecería el 100% de la demanda de agua caliente.

Generalmente la temperatura con un sistema de calentamiento solar con colectores planos no alcanza 60C por lo que se hizo el ejercicio de calcular el ahorro de gas LP suponiendo ciertas condiciones. En la **Tabla 10** se muestran algunos ejemplos de cálculos fijando un porcentaje de agua caliente con diferentes temperaturas promedio en el tanque de almacenamiento la cual varía la eficiencia del colector y así ver qué porcentaje de gas se ocuparía para calentar agua y que ahorro de gas LP se obtiene.

Por ejemplo, si el consumo de agua caliente fuera del 50% del total mensual, de acuerdo a la **Tabla 10**, el consumo de gas para calentar agua sería del 28.32% del total

mensual y si fijamos la temperatura del agua en 40C y el aporte solar en 55%, el ahorro en gas sería del 15.6% respecto al total.

Tabla 10. Ahorro de gas LP y valores asociados considerando fijo el porcentaje de agua y la temperatura que alcanza el agua almacenada en el termotanque solar.

| % agua caliente | % gas LP para calentar agua | T(°C) del CSA | % aporte solar | % gas LP ahorrado con CSA |
|-----------------|-----------------------------|---------------|----------------|---------------------------|
| 50 | 28.32 | 40 | 55 | 15.60 |
| 50 | 28.32 | 45 | 66 | 18.78 |

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA

En este capítulo se presentará información que nos ayude a conocer como calcular el número de colectores solares para satisfacer las necesidades de agua caliente de un establecimiento y la aplicaremos al caso de estudio para después realizar una comparación entre el número de colectores obtenido y el que ya se encuentra en el lugar.

3.1 METODOLOGÍA DE UN PROYECTO DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA

El dimensionamiento de un sistema de calentamiento solar de agua adecuado a las necesidades de los usuarios implica disponer de cierta información básica como el perfil de uso de agua caliente, hábitos de consumo de los usuarios, la disponibilidad del recurso solar en el lugar de instalación, factores climáticos locales, análisis del tipo de edificación, entre otros sin embargo uno de los más importantes es la demanda de agua caliente requerida. La evaluación precisa de estos parámetros proporcionará la cantidad de colectores necesarios y el volumen del tanque de acumulación de agua caliente a fin de lograr una instalación con desempeño óptimo y también rentable.

Para realizar un proyecto de calentamiento solar de agua se proponen una serie de etapas, que pueden ser flexibles y adaptarse a cada caso:

1) Trabajo de campo

En esta etapa se sugiere recopilar información con actividades como:

- 1.1) Recorrido por el lugar y ubicación de áreas.
- 1.2) Levantamiento de los principales equipos consumidores de agua, solicitud de información como recibos de combustible y de los planos del lugar (ubicación cuarto de maquinas, espacio disponible en azotea).
- 1.3) Identificar los usos del agua caliente, entrevista con el personal del lugar para conocer horarios y hábitos así como las expectativas del interesado en cuanto a nivel de comodidad y economía del proyecto. Por medio de cuestionarios se pueden clarificar las aplicaciones ejemplo si es para regaderas, cuantas personas se duchan por día, el perfil de uso (si es en la mañana, en la tarde, o al término de un turno, etc.). Si es para una lavandería, cuantos kilos de ropa se lavan por día, etc.
- 1.4) Medición o toma de datos de parámetros tales como flujos de agua caliente general y por equipo, la temperatura requerida. Se sugiere como periodo mínimo de medición una semana típica completa.

2) Trabajo de gabinete

En este paso se analiza la información recopilada en el paso previo:

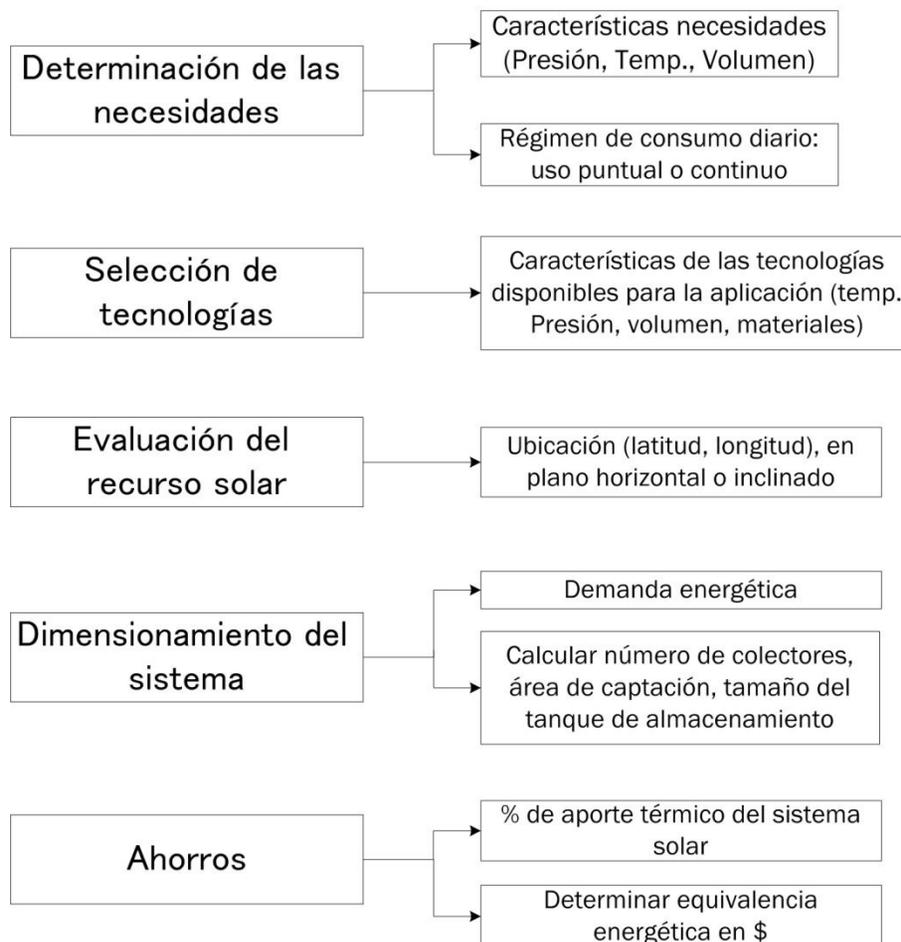
- 1.5) Análisis de los consumos del combustible que se usa para calentar agua.
- 1.6) Diseño y dimensionamiento del sistema de calentamiento solar de agua.
- 1.7) Realización del proyecto o memoria.

3) Presentación y entrega de la propuesta a los encargados de la toma de decisiones.

3.2 DIMENSIONAMIENTO BÁSICO DE INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS A BAJA TEMPERATURA

Una vez que se realizó el trabajo de campo, los pasos para el dimensionamiento de una instalación solar térmica se muestran de forma esquemática en la **Figura 40**. A continuación se describen brevemente:

Figura 40. Consideraciones básicas para el diseño de un sistema de calentamiento solar de agua.



A) DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES DEL USUARIO

La determinación acertada de las necesidades del usuario son clave para un dimensionamiento óptimo y los parámetros más representativos son:

① Temperatura requerida.

Es la temperatura del agua caliente que requiere la aplicación. Dependerá de cada caso particular. Por ejemplo la temperatura que requiere el agua caliente será diferente si es para un hospital, una lavandería o un restaurante.

② Presión de operación.

La presión de operación corresponde a la presión manométrica a la cual estará sometido el sistema. Generalmente se expresa en kilogramo fuerza por centímetro cuadrado (kgf/cm²).

Existen diferentes presiones de operación o trabajo en los sistemas solares que se pueden catalogar en:

Presión baja. La presión es menor a 1 kgf/cm². Se presenta principalmente en uso residencial.

Presión media. Comprende el intervalo de 1-3 kgf/cm² que puede ser proporcionado por una bomba presurizadora o recirculadora o un sistema hidroneumático. Se presenta en una gran variedad de aplicaciones como son fosas de clavados, albercas medianas y grandes, regaderas de uso doméstico y en centros deportivos, uso sanitario para procesos industriales medianos, entre otros.

Presión de trabajo alta. Comprende el intervalo de 3-6 kgf/cm², proporcionado por un hidroneumático. Se presenta en aplicaciones para albercas, conjuntos de regaderas de centros deportivos medianos y grandes, para uso sanitario de media temperatura grandes y para procesos industriales, entre otros.

③ Volumen de agua caliente

El consumo de agua caliente es uno de los factores que más influyen para el correcto dimensionamiento de una instalación. En muchas ocasiones, es el factor menos conocido y es variable dependiendo el lugar de uso por el cambio de comportamiento de los usuarios. Por ejemplo, no es el mismo consumo unitario para ducha en casa habitación que en un hotel, en un hospital o en un gimnasio.

El método más preciso para determinar la demanda de agua caliente es la medición del flujo, sin embargo en construcciones nuevas o en las ya existentes en las que no se pueda llevar a cabo se puede estimar el flujo de agua caliente. En la sección 2.5 se describieron algunas opciones para estimar el flujo de agua caliente.

④ Perfil de uso diario

El régimen de consumo diario se refiere a la forma en cómo se consume el agua caliente a lo largo del día y que puede ser:

- Puntual. Sucede cuando la mayor parte del volumen se consume en un período corto y específico del día.

- Continuo. Sucede cuando el volumen del agua caliente se utiliza de forma constante o aleatoria a lo largo del día.

B) SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

De acuerdo a las necesidades particulares de nuestro proyecto se escoge la tecnología que mejor cumpla esas necesidades teniendo en cuenta la calidad del colector, su eficiencia térmica, la seguridad y el cumplimiento de las normas, los costos y si se adapta a nuestro proyecto.

C) EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR Y DATOS METEOROLÓGICOS

Para el dimensionado de una instalación solar se necesita conocer la radiación solar global sobre la superficie de captación y temperatura de ambiente del lugar.

- Los datos de radiación solar se pueden conocer ya sea por medio de cálculos con modelos matemáticos, consultando datos medidos que publican centros de investigación como el Instituto de Geofísica de la UNAM, el Servicio Meteorológico Nacional o el sitio especializado de la NASA o a través de software comercial. Lo más común es emplear valores diarios representativos (medios) de cada mes. Según el método de cálculo a emplear puede ser necesario utilizar valores menos agregados (valores diarios e incluso horarios).

Normalmente los datos reportados en diversos sitios web son para una superficie horizontal y los colectores están inclinados a cierto ángulo por lo que ese valor debe corregirse para el ángulo al cual este colocado el colector.

- La temperatura ambiente se publica por el Servicio Meteorológico Nacional para diversas localidades. En el DF, la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) de la Secretaría del Medio Ambiente del DF también publica la temperatura ambiente.

D) MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO

Demanda energética

A partir de los datos de consumo de agua caliente obtenidos por mediciones (para establecimientos existentes) o previstos en el proyecto (en construcciones nuevas), de la temperatura requerida del agua caliente y de la temperatura inicial del agua de la red, se calcula la cantidad de calor que se tiene que suministrar.

En este trabajo dimensionaremos una instalación térmica con un método muy común que consiste en calcular la cantidad de calor requerida para calentar un volumen de agua determinado y en base a ella, obtener el número de colectores necesarios que la satisfagan.

- La norma ambiental NADF-008-AMBT-2005 para el aprovechamiento de la energía solar en establecimientos e inmuebles nuevos en el Distrito Federal brinda una metodología para calcular el consumo de energía **anual** para calentamiento de agua.
- Dimensionamiento con base a la norma española a través del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y el Código Técnico de Edificación (CTE) sobre una base mensual.

Diversas guías de recomendaciones de instalaciones térmicas sugieren que lo más conveniente es que el aporte solar no sea del 100 % porque la ocupación y/o utilización de los establecimientos no es siempre a plena carga, adicionalmente en meses de mucha insolación puede producirse más energía de la necesaria y llevar a sobrecalentamientos indeseados que reduzcan la vida útil de los equipos. También las normas especifican que la instalación térmica siempre debe tener el respaldo de un sistema convencional de calentamiento de agua.

Cuando se ha determinado el número de colectores y el volumen del tanque de almacenamiento, se configura el acomodo de los colectores conforme al espacio y condiciones disponibles. Después se realiza el diseño de la instalación hidráulica del sistema.

D) AHORROS

Una vez que se determino el área de captación, la contribución solar a la demanda energética mensual y el volumen de almacenamiento, se pueden calcular los ahorros de gas LP y su traducción económica.

3.3 ASPECTOS TEÓRICOS EN EL DISEÑO DE INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS

En el acomodo de un conjunto de colectores es necesario tomar ciertos criterios en cuenta como son la orientación e inclinación de los colectores, la distancia entre una fila y otra y la conexión entre colectores.

3.3.1 ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN DE LOS COLECTORES

La orientación óptima de los colectores en el hemisferio norte es hacia el sur geográfico. En el caso del restaurante, la azotea es plana y existe espacio suficiente para orientar adecuadamente los colectores. Otra ventaja es que no hay sombras de edificios sobre la azotea que pudieran obstaculizar la radiación solar a alguna hora del día.

El ángulo de inclinación de los captadores respecto a la horizontal β , **Figura 41**, dependerá del periodo de utilización de la instalación solar. Por ejemplo, la normativa española (CTE) establece que para la inclinación óptima deberá elegirse un valor en función de las tres condiciones presentadas en la **Tabla 11**.

Figura 41. Ángulo de inclinación de un colector solar.

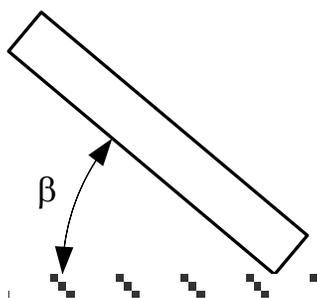


Tabla 11. Ángulos de inclinación establecidos dado el periodo de utilización.

| Periodo de utilización | Ángulo de inclinación |
|-------------------------------|------------------------|
| Consumo constante todo el año | Latitud del lugar |
| Preferentemente en invierno | Latitud del lugar +10° |
| Preferentemente en verano | Latitud del lugar -10° |

3.3.2 DISTANCIA ENTRE FILAS DE COLECTORES

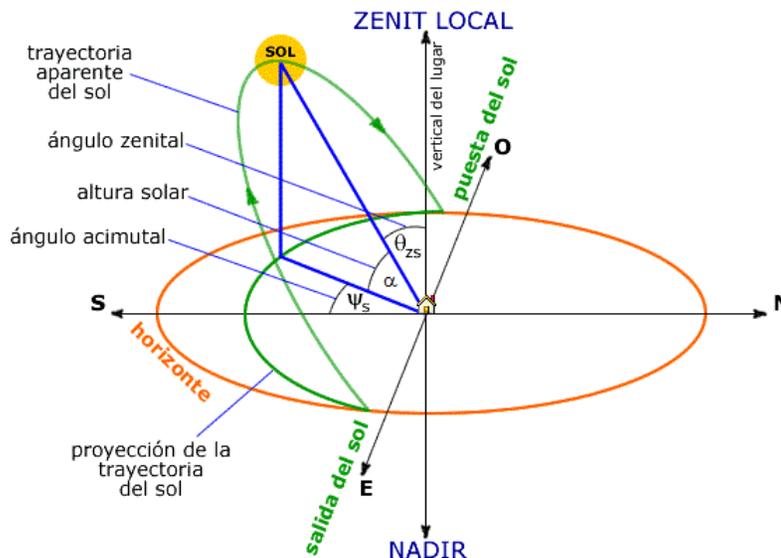
En el arreglo o sembrado de los colectores surge la necesidad de conocer la distancia mínima entre filas de colectores para aprovechar al máximo la radiación solar con el menor impacto de sombras debidas a la fila de enfrente. Un criterio habitual es calcular

la distancia considerando que durante el mediodía solar del día más desfavorable (altura solar mínima) del periodo de utilización, la sombra de la arista superior de una fila se proyecte, como máximo, sobre la arista inferior de la fila siguiente.

Para los equipos instalados en el hemisferio norte que se utilizan todo el año, el día más desfavorable es el 21 de diciembre (solsticio de invierno, las sombras son más largas ya que es el día más corto del año y cuando el sol está más bajo sobre el horizonte), ya que en ese día la altura solar es mínima. En la **Figura 42** se definen algunos ángulos solares, entre ellos la altura solar. Para el 21 de diciembre, la altura solar mínima al mediodía solar se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\alpha_{\min} = (90^\circ - \text{latitud del lugar}) - \text{declinación solar} \quad (3.1)$$

Figura 42. Descripción de diferentes ángulos solares.



NOTA: En este sistema el origen está situado en la posición del observador. El plano fundamental es el horizontal, tangente a la superficie terrestre.

Fuente. Tomado de "http://www.ujaen.es/

La declinación solar se puede calcular por medio de fórmula o consultar de tablas que la reportan para todos los días del año.

Para el 21 de diciembre la declinación solar es -23.45. Así la ecuación 3.1 queda como:

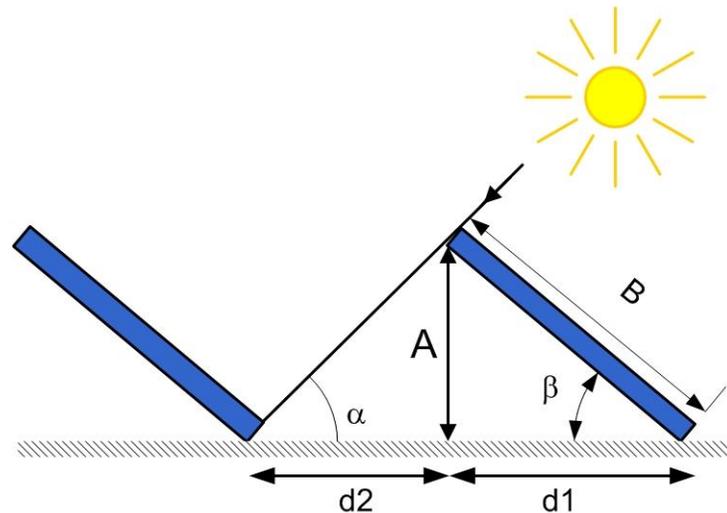
$$\alpha_{\min} = (90^\circ - \text{ABS}(\text{latitud del lugar})) - 23.5 \quad (3.2)$$

ABS es valor absoluto

La fórmula para calcular la distancia mínima entre filas, d_2 , **Figura 52**, se define por:

$$d2 = \frac{B \cdot \text{sen } \beta}{\tan \alpha_{\min}} \quad (3.3)$$

Figura 43. Distancia mínima entre filas de colectores.



A partir de ecuación 3.2 se obtiene la altura solar a mediodía solar para el 21 de diciembre. A continuación, se ejemplifica el cálculo de la distancia mínima para colectores con inclinación de 20 grados y una longitud de 2.18 metros:

| | |
|--------------|--------|
| Latitud | 20 |
| Declinacion | -23.45 |
| altura solar | 46.55 |
| inclinacion | 20 |
| Longitud (m) | 2.18 |

$$d2 = \frac{2.18 \text{sen}(20)}{\tan(46.55)} = 0.7063\text{m}$$

Luego la distancia $d1$, que es igual a:

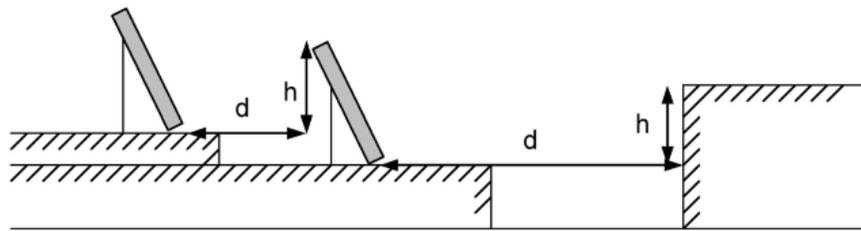
$$d1 = B \cos \beta = 2.18 \cos(20) = 2.0485\text{m}$$

Otro criterio para calcular la distancia entre filas lo da el Pliego de Condiciones Técnicas para Instalaciones Solares Térmicas del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía de España), que son una serie de recomendaciones no obligatorias, indicando que la distancia d (en el diagrama de la **Figura 44** corresponde a $d2$), medida sobre la horizontal entre una fila de captadores y un obstáculo de altura h que pueda

producir sombras sobre la instalación deberá garantizar un mínimo de 4 horas de sol en torno al mediodía del solsticio de invierno. Esta distancia d será superior al valor obtenido por la expresión:

$$d = h / \tan(61^\circ - \text{latitud}) \quad (3.4)$$

Figura 44. Ejemplos de casos para d y h según el PCT del IDAE.



Fuente. Pliego de Condiciones Técnicas del IDAE

Cuando todos los captadores se encuentran sobre la misma horizontal, la distancia mínima según el IDAE será:

$$d = 0.7456 / \tan(61 - 20) = 0.8577\text{m}$$

3.3.3 CONEXIÓN ENTRE COLECTORES

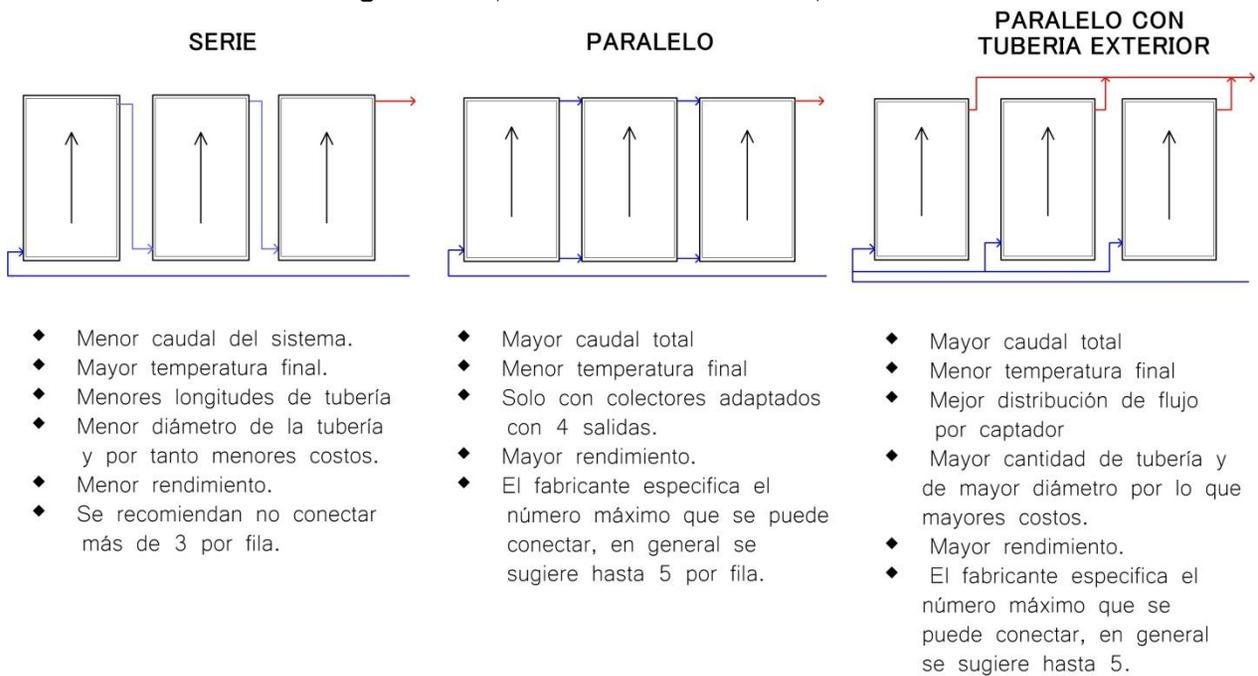
Los colectores solares se pueden conectar entre sí en serie o en paralelo. En la **Figura 45** se enumeran algunas de las características para cada tipo de conexión.

Generalmente se considera que todos los colectores que componen un campo tienen la misma eficiencia pero esto depende de que haya un flujo uniforme por cada uno de ellos, que está directamente relacionado en cómo están conectados.

Cuando se conectan varios colectores entre sí, hay que asegurarse de:

- Lograr un **flujo equilibrado** en todos los colectores
- Minimizar pérdidas de carga totales.

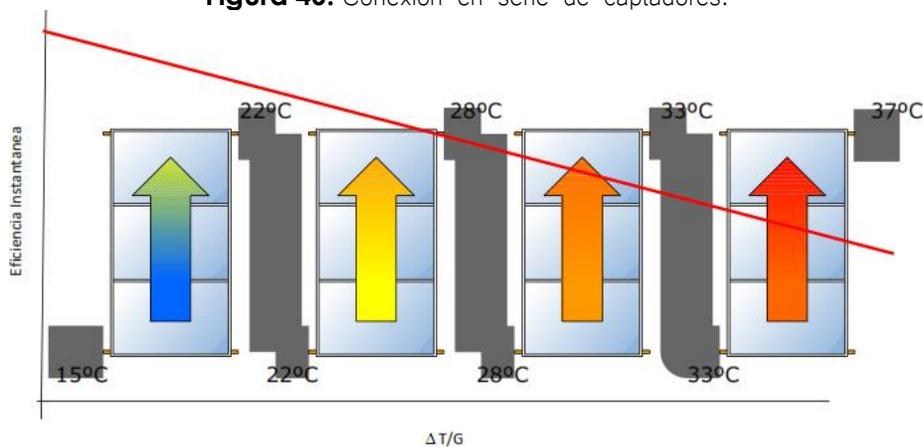
Figura 45. Tipos de conexiones entre captadores.



3.3.4 CONEXIÓN EN SERIE

En la conexión en serie, el caudal total es igual al caudal que pasa por cada colector; se alcanza una temperatura final más elevada que la conexión en paralelo, pero con un menor rendimiento en los colectores, especialmente en aquellos situados cerca de la salida ya que al entrar el fluido a una temperatura cada vez más alta, el efecto de calentamiento conseguido es menor como se aprecia en la **Figura 46**.

Figura 46. Conexión en serie de captadores.



Teniendo en cuenta que los últimos colectores de una conexión en serie pueden tener bajas eficiencias y en consecuencia desaprovecharse, el número óptimo de colectores que se pueden conectar en serie está determinado por cada fabricante.

El CTE indica que para una instalación solar exclusivamente para ACS se pueden conectar en serie hasta 10m² para zonas climáticas en España con radiación solar promedio de hasta 4.2kWh/m², hasta 8m² para zonas con radiación solar promedio de 4.2 a 4.6kWh/m² y de hasta 6m² para zonas con radiación mayor a 4.6kWh/m².

3.3.5 CONEXIÓN EN PARALELO

En la conexión en paralelo el caudal total de diseño es igual al caudal específico por la superficie total de captadores.

Deben observarse los **caudales** (litros/m²-min) **recomendados por el fabricante** para evitar zonas muertas y garantizar un flujo en régimen turbulento que permite mejorar la transferencia de calor.

Los colectores con 2 entradas y 2 salidas en los lados se pueden conectar entre sí sin tuberías de distribución externa (llamada también **conexión en cascada**) tienen la ventajas de reducir costos relativos a la tubería. No obstante, este conexionado es apropiado solo para un número limitado de captadores, aproximadamente de cinco a seis por batería. Ver **Figura 45** centro. Si los colectores se conectan en paralelo por medio de tubería exterior se conoce como **paralelo real** o verdadero, **Figura 45** extremo derecho.

3.3.6 CONEXIONES PARA BANCO DE CAPTADORES

Un conjunto de colectores conectados entre sí y bien delimitados forma una batería o banco. La conexión entre baterías es uno de los aspectos más relevantes del diseño de una instalación de calentamiento solar de agua ya que de eso depende la temperatura que alcanza el sistema, su caudal de operación y en consecuencia el diámetro y configuración de tuberías y demás accesorios.

La eficiencia de un conjunto de colectores solares depende de la eficiencia térmica que alcanza cada uno cuando están interconectados entre sí. El objetivo es establecer un flujo uniforme a través de cada colector para que cada uno opere con el mayor rendimiento. Una distribución de flujos desigual, origina zonas con un flujo débil o deficiente en los tubos elevadores (tubos internos de un colector que se denominan elevadores porque la temperatura del agua se incrementa cuando pasa por estos), donde no se dan condiciones de turbulencia y se tendrán factores de remoción de calor pequeños por lo tanto esas zonas quedan desaprovechadas lo que disminuye la eficiencia de esos colectores y por ende la eficiencia de todo el conjunto.

Garg H.P. cita un estudio experimental realizado por Dunkle y Dave que consistió en conectar de diferentes modos 12 colectores con absorbedores de superficie selectiva y

midieron la temperatura de la placa absorbadora de cada colector como indicativo de la efectividad de la remoción de calor. Observaron que en la conexión de 12 colectores en cascada había zonas de sobrecalentamiento en los colectores del centro por falta de un caudal adecuado mientras que en una conexión serie-paralelo de los 12 colectores, la distribución de flujo era mucho más uniforme para todos los colectores; razón por la cual la conexión en cascada también está limitada a un número máximo de colectores que indique el fabricante, comúnmente de 5 a 6 colectores por banco es el máximo permitido.

Domínguez realizó un estudio numérico para diferentes configuraciones de colectores solares conectados en paralelo real y en cascada obteniendo el número de Reynolds y los factores de fricción para las configuraciones propuestas y sugiere que un flujo más uniforme se establece cuando los colectores se conectan entre sí por medio de tubería exterior, es decir en lo que se conoce como paralelo auténtico ya que en la conexión en cascada llegan a aparecer zonas de estancamiento. Según Guerrero Gesto, uno de los factores que más influye para que haya estas zonas de bajo flujo es la relación entre el diámetro de los tubos elevadores y los cabezales, es la longitud de los tubos y la cantidad de estos. Algunos fabricantes de captadores planos se han dado a la tarea de mejorar estos puntos con colectores de mayor área, con tuberías internas de distribución de mayor diámetro y diferentes disposiciones de los tubos elevadores. Normalmente estos están en parrilla vertical pero los hay también parrilla horizontal, en serpentín o meandro vertical u horizontal y doble arpa cada uno con sus ventajas y desventajas dependiendo el tipo de conexión.

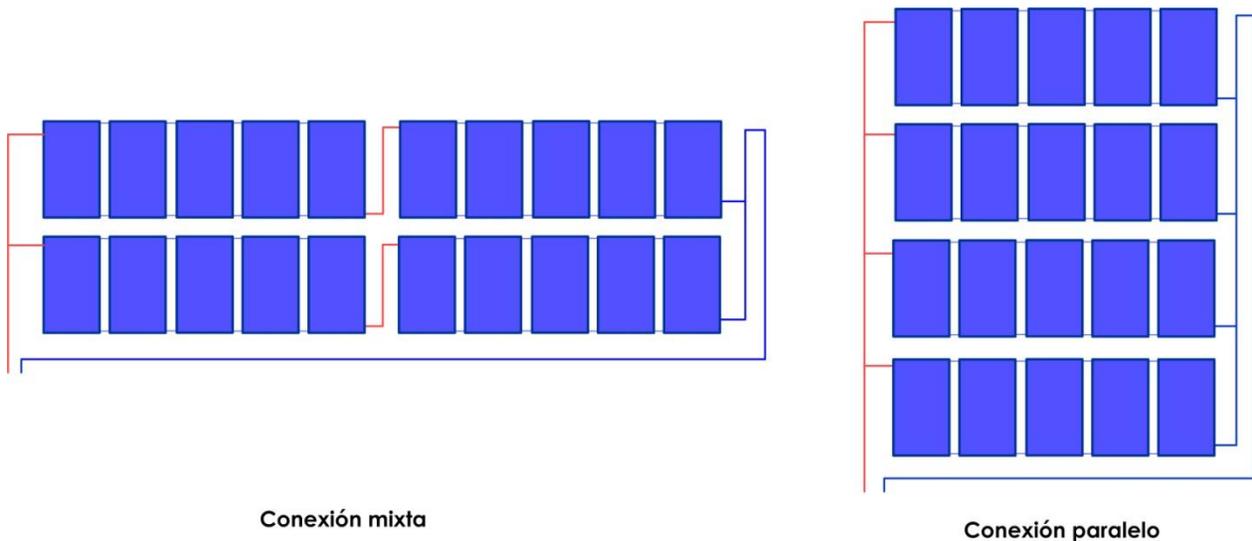
Para baterías de captadores, la configuración de tuberías exteriores puede hacerse por medio del retorno invertido (la distribución del agua fría a las baterías empieza en la batería más lejana y después hacia el resto, terminando por la batería más cercana a la alimentación que será la primera donde se recoge el agua caliente, es decir, obteniendo para cada banco la misma longitud total de tubería que es la suma de ida y retorno con los mismos diámetros de tuberías) para obtener las mismas pérdidas de carga por cada tramo y un equilibrio hidráulico o bien mediante retorno directo usando válvulas de equilibrado hidráulico.

Según el CTE, la conexión entre captadores y entre filas se realizará de manera que el circuito resulte equilibrado hidráulicamente recomendándose el retorno invertido frente a la instalación de válvulas de equilibrado.

Para grandes instalaciones de colectores solares planos, tradicionalmente se ha usado la conexión en paralelo entre colectores y entre baterías como se muestra en la **Figura 47** (der.) respetando los números máximos recomendados por cada fabricante. En este tipo de conexión el caudal es más elevado pero el rendimiento es similar para cada captador siempre y cuando tengamos flujos uniformes en cada uno de ellos.

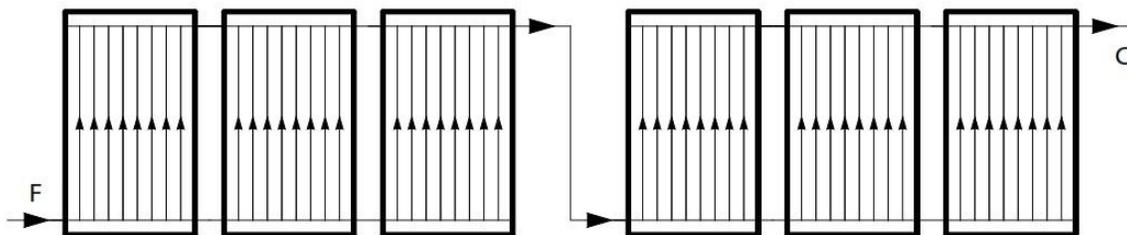
Otro tipo de arreglo es la conexión **mixta**, colectores conectados entre sí en serie y las baterías en paralelo o colectores conectados en paralelo con conexión en serie de baterías. Ver **Figura 47** (izq.).

Figura 47. Opciones de conexionado entre bancos de colectores: mixto (izq.) y en paralelo con retorno invertido (der.)



La conexión mixta paralelo-serie tiene la ventaja de que su rendimiento es más equilibrado, el flujo es menor que una conexión en paralelo y la temperatura de salida es mayor por lo que esta conexión se recomienda para grandes aplicaciones industriales o comerciales que requieren mayor temperatura o cuando el espacio disponible no sea suficiente para un arreglo totalmente en paralelo. **Figura 48.**

Figura 48. Conexión mixta, paralelo entre colectores y cada banco en serie.



En general, el arreglo de baterías debe considerar:

- * El mismo número de captadores por banco y fila, de preferencia.
- * Todos los captadores del campo deben ser del mismo modelo y marca.

- * Instalar válvulas de corte a la entrada y salida de cada banco para aislarlos en caso de mantenimiento, sustitución, etc.
- * Instalar un purgador de aire en el punto más alto de cada fila, normalmente a la salida.
- * Instalar válvula de drenado en la parte inferior de cada batería (por ejemplo con válvula de esfera)
- * Instalar válvula de alivio de presión y temperatura en cada fila.
- * Sonda de temperatura a la salida del campo de colectores.
- * La longitud de las tuberías debe ser lo más corto posible para disminuir las pérdidas de carga así como también los menores accesorios posibles.
- * Válvula de alivio de presión y temperatura, en tanque.
- * Válvula check o antiretorno antes del campo de colectores.
- * Válvula check en la alimentación de agua fría al tanque y en la línea de retorno.

Figura 49. Tipos de válvulas, izquierda a derecha, válvula eliminadora de aire, de esfera y dos tipos de válvula check.



Ejemplos de valvulas de alivio y purgadora de aire en la instalacion de colectores solares.



3.3.7 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

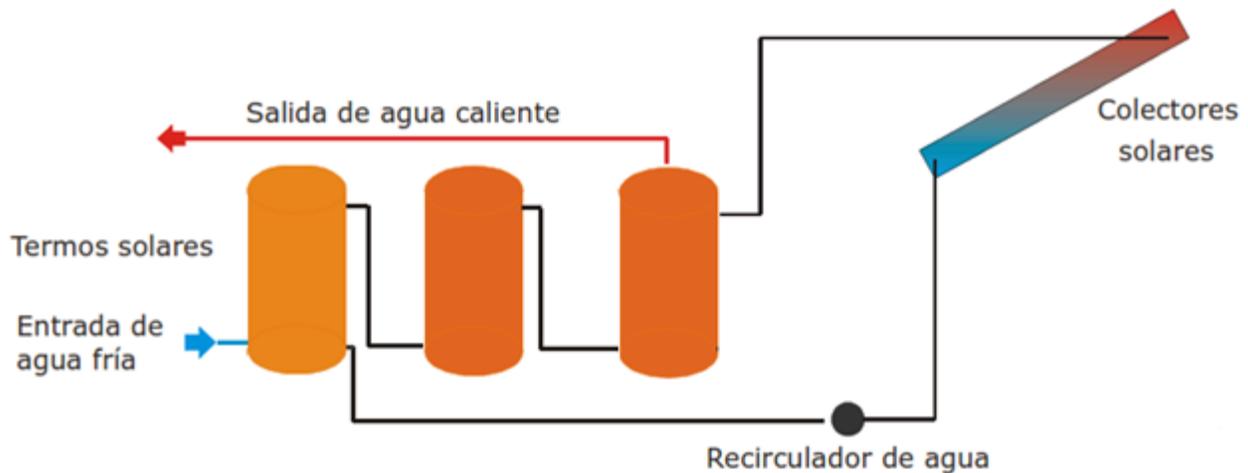
El dimensionamiento del tanque de almacenamiento de agua es un factor muy importante para el diseño de la instalación. Si la acumulación es menor a la óptima, se consiguen mayores temperaturas, conllevando la reducción del rendimiento del campo, y si es mayor, aunque sube el rendimiento del campo, puede que no se alcance la temperatura de uso.

Algunos criterios de FIRCO y de la NADF exponen que:

- Los tanques de almacenamiento o termos, deben estar aislados.
- Se prefiere el uso de un solo termotanque, siempre que sea posible.
- Se prefiere el uso de termotanques verticales, los cuales permiten una mejor estratificación de temperaturas en el agua almacenada por encima del tipo horizontal. Sólo en caso de restricción de poca altura del techo del inmueble donde se aloje o alguna restricción técnica justificable se pueden usar del tipo horizontal.
- Los termotanques deberán tener difusores en la entrada del agua fría de alimentación, para reducir la velocidad y no romper la estratificación de temperaturas. Dichos difusores deben estar en la parte inferior del termotanque.
- Deberá contar con válvula de corte a la entrada y a la salida, válvula de drenado en la en la parte más baja del termotanque para drenar periódicamente los sedimentos y válvulas de seguridad en la parte superior. Deberán contar con un orificio exclusivo para venteo, que garantice la purga de aire en la parte más alta del tanque
- Los termotanques deberán estar provistos de orificios adecuados en la(s) entrada(s) y en la(s) salida(s); en el drene (con o sin sumidero), en los venteo(s) y en las conexiones para sensores por ejemplo de temperatura, indicadores de presión y/o controles de nivel.
- Con el propósito de evitar la pérdida de la estratificación de temperatura se deberá asegurar que el regreso de agua caliente proveniente de los colectores solares ingrese al termotanque en un punto localizado entre el 50% y 75% de la altura del tanque de almacenamiento, o bien incorporar difusores interiores en el termotanque.
- La toma del agua caliente se ubicará entre el 90% al 100% de la altura en la parte superior del tanque y la toma del agua fría se ubicará en la parte inferior entre el 5% y 10% de la altura del tanque.
- Si por razones de espacio o costo se requieren conectar varios termotanques para cumplir con el volumen de acumulación, se prefiere la conexión en serie, con el objeto de lograr una estratificación adecuada de temperaturas, tal como se muestra en la **Figura 50**. También se pueden conectar en paralelo con los circuitos primarios y secundarios equilibrados aunque en este caso todos los depósitos estarían a igual temperatura y no garantiza la carga o descarga equilibrada (solamente se logra con válvulas de equilibrado).

Adicionalmente se recomienda colocar un caudalímetro en la línea de entrada de agua fría a los tanques de almacenamiento, lo que permitirá llevar un registro de los caudales que maneja la instalación. Esto sería de mucha utilidad para el restaurante, que no cuenta con medición del flujo de agua caliente.

Figura 50. Conexión en serie invertida para termotanques.



3.3.8 SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control se requiere para la operación automática del paro/encendido de las bombas y en dado caso de la apertura de ciertas válvulas. Un sistema de control diferencial de temperatura se basa en la diferencia entre la temperatura del líquido almacenado en el termotanque y la de la línea de descarga de los colectores solares. Esta se determinará, por sensores térmicos que mandan señales electrónicas al sistema de control diferencial de la bomba que debe operar automáticamente. El sistema de control diferencial debe de contar por lo menos con dos sensores de temperatura, uno se coloca en la parte inferior del tanque de almacenamiento solar para detectar la temperatura del agua a calentar y el otro se coloca en la parte superior de los colectores solares.

Entre paro y encendido del sistema se deberá considerar un rango de temperatura específico para dicho control. Para sistemas a temperaturas altas, se recomienda una diferencia mínima de 8 a 10°C para encender y de 2 a 3°C para detener el flujo en el sistema. En aplicaciones a temperaturas bajas, se considerará un rango menor de temperaturas.

El sistema de control también arrancará o parará la bomba cuando los sensores de nivel lo marque además controlará que la temperatura del fluido de transferencia térmica no exceda el límite fijado en ninguna parte del circuito accionando la conexión de puenteo.

3.4 ANÁLISIS DEL DISEÑO DEL SISTEMA ACTUAL DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA.

El restaurante ya tiene un sistema de calentamiento solar de agua. Inicio operaciones en junio de 2013. Las características del sistema instalado se describieron en la Sección 2.6. Un resumen se presenta en la **Tabla 12** y los diagramas de conexión en el campo de colectores y entre los tanques de almacenamiento en la **Figura 51** y **52**.

Tabla 12. Características del sistema actual de calentamiento.

| SISTEMA ACTUAL | Descripción |
|--------------------------|----------------------------|
| Tipo | Circuito directo o abierto |
| Fluido de trabajo | Agua |
| Circulación | Forzada |
| Acumulación solar | Centralizada |
| No de captadores | 32 |
| Tipo de colector | Plano |
| Marca y modelo | Chromagen CR-120 |
| Arreglo entre colectores | Serie-Paralelo |
| Colectores por banco | 3 |
| Banco por fila | 2 |
| Filas por campo | 5 |
| Distancia entre filas | 0.60 m |
| No. de Termotanques | 3 |
| Capacidad termotanques | 3,000 litros cada uno |

Los colectores son equipos importados y según la ficha técnica cuentan con diversas certificaciones de calidad de otros países donde se han comercializado. No se encontró que tengan certificación mexicana de la norma voluntaria NMX-004-ES-NORMEX-2005.

Por la investigación realizada para este trabajo, en la instalación actual se pueden encontrar aspectos positivos y otros que requieren de mejoras.

Aspectos positivos

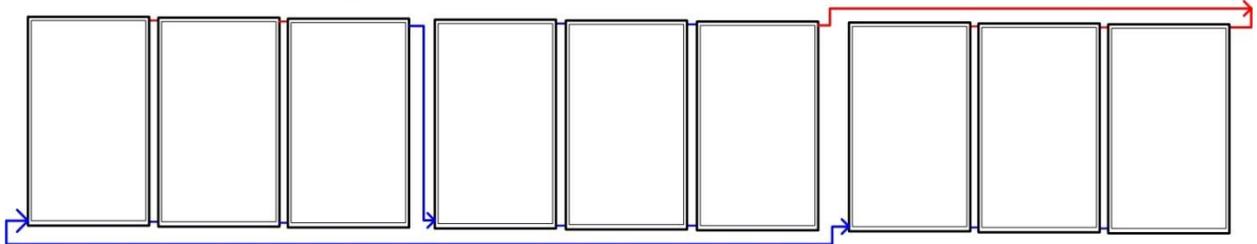
- Tipo de conexión entre colectores. Los colectores están conectados en serie paralelo. Es una configuración apropiada para obtener un caudal regular en todos los equipos.
- Colectores orientados al sur geográfico.
- Tubería en cobre en el campo de colectores y con retorno invertido.

Aspectos que requieren mejoras

- La tubería hacia los colectores procedente de los termotanque (ida) se encuentra desnuda. Por ejemplo desde los tanques hasta la primera fila son aproximadamente 30 metros de longitud, la tubería es de cobre de 2". Los tramos que alimentan a las filas subsecuentes también están desnudos. Es necesario aislar toda la tubería de alimentación y los tramos desnudos para reducir las pérdidas de calor.

También se sugiere una conexión diferente en la fila 1 que tiene 9 colectores ya que la salida de agua caliente del primer banco recorre la mayor distancia, es mejor cambiar el orden de la conexión como se muestra en la **Figura 66** para que el agua caliente recorra la menor distancia y evitar pérdidas de calor.

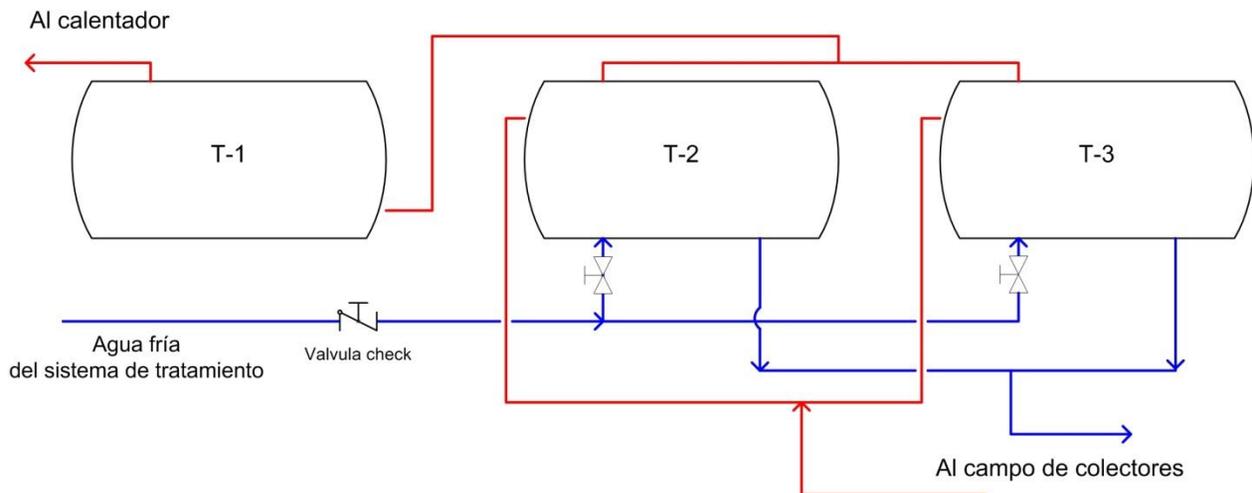
Figura 52. Distribución propuesta para la fila 1.



Mención aparte merece el volumen de almacenamiento de agua. Zabalza recomienda el cálculo de 75 litros de acumulación por metro cuadrado, el volumen de almacenamiento para 32 paneles sería de 6,240 litros mientras que el volumen de los tanques suma 9,000 litros. El instalador refiere que optó por tener un volumen de almacenamiento mayor porque el uso del agua es continuo e ideó tener reserva y poder alternar el uso de cada tanque de almacenamiento cada medio día, sin embargo al aumentar el volumen de acumulación arriba de 75 litros por metro cuadrado de área de captación disminuye la eficiencia del sistema y también la temperatura que alcanza.

Las mediciones de temperatura en los tanques fueron de 30C y se estima que no llega más allá de los 40C por el volumen adicional de almacenamiento. Un cambio importante sería agregar cierto número de colectores solares para compensar este hecho lo que llevaría a un análisis del beneficio costo para ver si es conveniente esa opción.

Figura 53. Conexiones principales entre los tanques de almacenamiento.



CAPITULO 4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA AL CASO DE ESTUDIO

4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS NECESIDADES DEL LUGAR

- Agua caliente para uso en cocina.
- La presión de operación del sistema de abastecimiento de agua es de 2kg/cm^2 y como máxima de 4kg/cm^2 . El sistema de calentamiento solar de agua debe soportar ese intervalo de presión.
- El diámetro de tubería del sistema actual de calentamiento es de 2 pulgadas.
- Temperatura requerida del agua caliente, 60°C .
- Perfil de uso continuo.
- Horario del personal de operaciones restaurante: de 7am a 11pm.
- Volumen de agua caliente dependiente de los comensales que haya en el restaurante.

4.2 CONSUMO DE AGUA CALIENTE SANITARIA (ACS)

El flujo de agua en el restaurante es variable, depende del número de comensales que asisten al lugar, así como de los hábitos de los usuarios de agua caliente. No hubo la posibilidad de medir el consumo de agua de los equipos de la cocina, por lo tanto se eligió emplear un valor promedio unitario del consumo de agua caliente para estimar el volumen de agua requerido.

Se tomaron 3 referencias para estimar la demanda diaria de agua caliente del restaurante:

1) Norma Ambiental del DF, NADF-008 AMBT 2005.

La norma presenta una tabla que da la dotación mínima de agua potable que deben tener diferentes establecimientos. Para restaurantes, clasificados en "Servicios de alimentos y bebidas" establece 12 litros de agua potable por comida por día (**Tabla 13**) y especifica que el 30% de la dotación de agua potable es para agua caliente, es decir 3.6 litros por comida por día.

Tabla 13. Extracto de la Tabla "Dotación mínima de agua potable y distribución por tipo de establecimiento" de la NADF-008 AMBT 2005 para centros de reunión.

| Tipo | Dotación mín.de agua | Unidades |
|----------------------------------|----------------------|--------------|
| Servicios de alimentos y bebidas | 12 | l/comida día |

2) Consumo de agua potable.

Esta referencia procede de información del restaurante, con base al consumo medido de agua potable se calculó los litros promedio por comensal por día, ver Sección 2.3.2 Se considera que el 30% de ese consumo será agua caliente tomando el mismo

porcentaje que marca la norma ambiental del DF. **Tabla 14.** El valor promedio anual obtenido es de 6.98 litros/comida-día, 1.938 veces más que el valor de la norma ambiental de 3.6 litros/comida-día.

Tabla 14. Valores promedio del consumo de agua potable en litros/comensal por día y de agua caliente como el 30% de ese valor.

| Mes | Agua potable en litros/comensal-día (valor promedio) | Agua caliente (el 30% del total) |
|-----------------|--|----------------------------------|
| Enero | 24.69 | 7.41 |
| Febrero | 23.89 | 7.17 |
| Marzo | 23.27 | 6.98 |
| Abril | 25.02 | 7.51 |
| Mayo | 21.90 | 6.57 |
| Junio | 24.46 | 7.34 |
| Julio | 21.62 | 6.48 |
| Agosto | 21.80 | 6.54 |
| Septiembre | 21.47 | 6.44 |
| Octubre | 22.99 | 6.90 |
| Noviembre | 22.09 | 6.63 |
| Diciembre | 25.87 | 7.76 |
| Promedio | 23.26 | 6.98 |

3) Código Técnico de Edificación (CTE)

El CTE tiene por objetivo regular los requisitos que se han de cumplir en las edificaciones en España e incluye un capítulo dedicado a la producción de agua caliente sanitaria por medio de energía solar térmica, dentro del Documento de aplicación del Código sobre Ahorro de Energía, que forma parte de los Requisitos Básicos de Habitabilidad de los Edificios (HE). En su apartado HE-4, presenta la Tabla "Demanda de referencia a 60°C de Agua Caliente Sanitaria" con consumos de referencia de agua caliente para establecimientos diversos y para el caso de restaurantes da un consumo de 5 a 10 litros de agua caliente por comida por día. Se toma el valor promedio de 7.5 litros de agua caliente por comida por día.

Tabla 15. Extracto de la Tabla de Demanda de referencia a 60C del HE-4 del CTE español.

| Criterio de demanda | Litros ACS/día a 60°C |
|---------------------|------------------------|
| Gimnasios | 20 a 25 por usuario |
| Lavanderías | 3 a 5 por kilo de ropa |
| Restaurantes | 5 a 10 por comida |

4.3 CALCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA CON LA METODOLOGÍA DE LA NORMA AMBIENTAL DEL DF

La norma ambiental NADF-008 AMBT 2005 establece que la contribución de energía solar para satisfacer los requerimientos de agua caliente debe ser como mínimo el 30% del Consumo Energético Anual por utilización de agua caliente (CEA).

La norma especifica que el cálculo del CEA sea **anual** y se determina mediante la siguiente fórmula y con los valores de referencia dados por la norma:

$$CEA = P \cdot DA \cdot PAC \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \cdot t \quad (4.1)$$

La **Tabla 16** define los parámetros de la fórmula 3.1.

Tabla 16. Parámetros de referencia para el cálculo del consumo energético anual por utilización de agua caliente (CEA).

| PARÁMETRO | DESCRIPCIÓN | VALOR DE REFERENCIA |
|-----------|--|---------------------------------------|
| CEA | Consumo energético anual por utilización de agua caliente en cocina(s), regadera(s) y/o lavamanos | Por determinar en kJ/año |
| P | Cantidad de usuarios: puesto, persona, trabajador, bañista, sitio, cama, empleados, trabajadores, alumnos, asistentes, comidas, huéspedes, internos, etc, según sea el caso; | El que corresponda al caso de estudio |
| DA | Dotación mínima de agua potable , obtenida de la Tabla "Dotación mínima de agua potable y distribución por tipo de establecimiento", de la norma. | Ver valores en Tabla |
| PAC | Porcentaje de agua caliente utilizada con relación a la dotación mínima diaria de agua. Para fines de esta norma: 30%; | 30% |
| ρ | Densidad del agua | 1 kg/l |
| C_p | Calor específico | 4.19 kJ/kg°C; |
| T1 | Temperatura del agua de la red pública | 15.5°C |
| T2 | Temperatura del agua caliente requerida para el uso específico | 50°C |
| t | Días de operación del establecimiento por año (días/año). | (días/año). |

Para nuestro caso:

- **T2** es la temperatura requerida del agua, 60°C.
- **P** se refiere al número de comidas o comensales por día, en nuestro caso el promedio es de 872 comidas/día.
- Los días de operación por año son 365.

Se sustituyen los valores anteriores en la ecuación 4.1:

$$CEA = 872 \times 12 \times 0.3 \times 4.19 \times (60-15.5) \times 365 = 213,641,631 \text{ kJ/año}$$

El cálculo del CEA da como resultado que se requieren 213,614,631 kJ/año para elevar la temperatura del volumen de agua estimado de 15.5°C a 60°C. El sistema de calentamiento de agua por medio del aprovechamiento de la energía solar para dicho restaurante deberá proveer como mínimo el 30% del CEA, es decir:

$$(213,641,631 \text{ kJ/año}) \times (0.30) = 64,092,489.3 \text{ kJ/año.}$$

El CEA se puede calcular utilizando el valor de 6.98 litros/comida-día que es el 30% del agua potable que se ocupa en el restaurante de acuerdo a la **Tabla 14** en vez de tomar 3.6 litros/comida-día como consumo unitario de agua caliente. En la **Tabla 17** se presenta una comparación entre los resultados de estos dos cálculos.

Tabla 17. Comparación entre el CEA al 100%, al 70% y al 30% obtenido con el consumo de agua de referencia en la norma y con el obtenido de los consumos del restaurante.

| PARÁMETRO | VALOR REFERENCIA NORMA | VALOR CONSUMO AGUA RESTAURANTE | UNIDADES |
|-------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------|
| P | 872 | 872 | comidas/día |
| DA | 12 | 23.25 | litros/comida-día |
| PAC | 30 | 30 | % |
| ρ | 1 | 1 | kg/l |
| Cp | 4.19 | 4.19 | kJ/kg°C |
| T1 | 15.5 | 15.5 | °C |
| T2 | 60 | 60 | °C |
| t | 365 | 365 | días/año |
| CEA (100%) | 213,641,631 | 413,930,659 | kJ/año |
| CEA (70%) | 149,549,141 | 289,751,462 | kJ/año |
| CEA (30%) | 64,092,489 | 124,179,198 | kJ/año |

4.4. METODOLOGÍA DESCRITA EN EL CÓDIGO TÉCNICO DE EDIFICACIÓN (CTE)

Con el requerimiento energético anual ya se podría calcular el número de colectores, sin embargo en este caso se hará el cálculo del requerimiento energético **mensual** conforme al CTE a diferencia de la norma ambiental del DF que realiza el cálculo anual.

La **Tabla 18** presenta los tres criterios de consumo unitario de agua caliente que se usarán para el cálculo de la demanda energética mensual. Recordemos que la "NADF" considera el valor de la dotación mínima de agua potable para un restaurante de 12 litros/comida-día y que el 30% de ese valor es para usos de agua caliente. En "Consumos" se calculó el consumo de agua potable por comensal del restaurante siendo el promedio 23.25 litros/comida-día y que el 30% de ese valor sea para usos de agua caliente. Finalmente el "CTE" da un valor para el consumo de agua caliente a 60C de 5 a 10 litros por comida por día y se usó el promedio entre ambos.

Tabla 18. Tres valores de referencia del consumo de agua caliente unitario del restaurante.

| Criterio unitario | Litros/comida-día |
|-------------------|-------------------|
| NADF | 3.60 |
| Consumos | 6.98 |
| CTE | 7.50 |

Con los valores de referencia unitarios se calculan los litros totales de agua caliente por día de la siguiente manera:

$$\frac{\text{litros totales}}{\text{día}} = \frac{\text{litros}}{\text{comensales-día}} \times \text{comensales promediodiarios}$$

La **Tabla 19** muestra la demanda total diaria mensual de agua caliente para los tres criterios de la **Tabla 18**.

Ahora ya se tienen tres estimaciones de la demanda diaria de agua caliente, sin embargo se carecen de los medios para conocer cuál de los tres criterios da el valor más cercano al consumo real del restaurante, por lo que estamos sujetos a subdimensionar o sobredimensionar el proyecto. Se hará el dimensionamiento con los tres criterios considerados pero tomando en cuenta que el más acertado está relacionado con el consumo registrado de agua potable del restaurante.

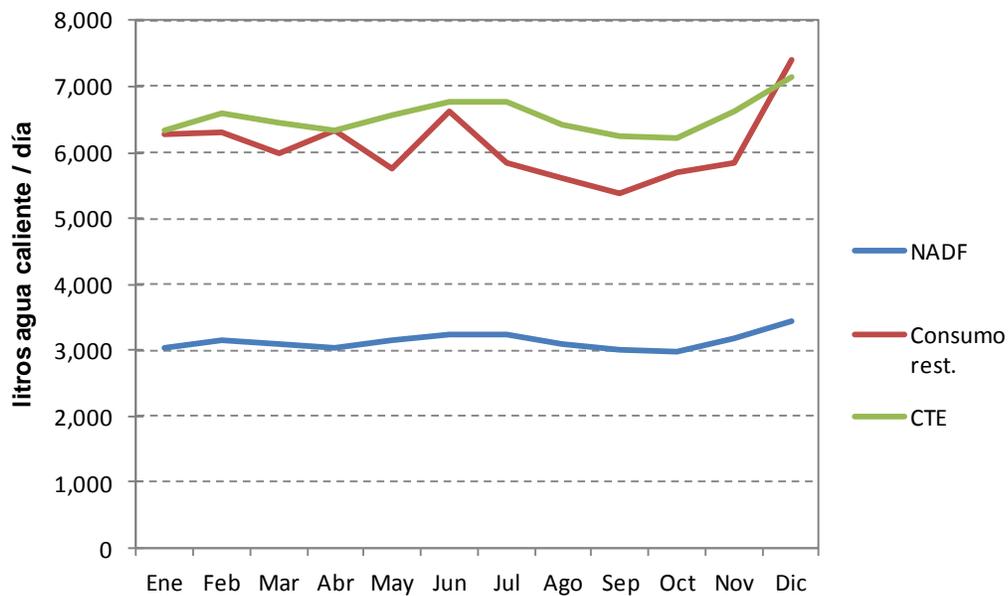
Con la demanda de agua para los tres casos se calculará la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura del agua.

Tabla 19. Comparación entre los litros de agua caliente por día de acuerdo al criterio de la Norma Ambiental del DF, los consumos medidos de agua y al criterio del CTE.

| Mes | Litros / día NADF | Litros / día Consumos | Litros / día CTE |
|----------|----------------------|--------------------------|---------------------|
| Ene | 3,044 | 6,263 | 6,341 |
| Feb | 3,162 | 6,297 | 6,588 |
| Mar | 3,094 | 5,999 | 6,445 |
| Abr | 3,037 | 6,334 | 6,328 |
| May | 3,156 | 5,760 | 6,574 |
| Jun | 3,252 | 6,629 | 6,776 |
| Jul | 3,249 | 5,853 | 6,770 |
| Ago | 3,085 | 5,606 | 6,428 |
| Sep | 3,001 | 5,369 | 6,252 |
| Oct | 2,979 | 5,708 | 6,206 |
| Nov | 3,180 | 5,853 | 6,626 |
| Dic | 3,430 | 7,396 | 7,146 |
| Promedio | 3,139 | 6,089 | 6,540 |

Los datos de la **Tabla 19** se grafican en la **Figura 54**.

Figura 54. Comparación entre la demanda de agua caliente con los tres criterios seleccionados: NADF, 30% del consumo medido de agua potable y CTE.



4.5 CANTIDAD DE CALOR REQUERIDO

Se refiere a la energía necesaria para elevar la temperatura del agua de la temperatura inicial a la requerida que en este caso es 60°C. Se calcula con la siguiente expresión:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_{ACS} - T_{in}) \cdot n \cdot \text{días} \quad (4.2)$$

donde:

Q cantidad de calor requerido mensualmente en kWh/mes

m masa de agua a calentar (kg/día)

c_p es el calor específico del agua 4.18 kJ/kg C

T_{ACS} es la temperatura requerida, en este caso es de 60°C

T_{in} es la temperatura diaria media del agua de la red de suministro

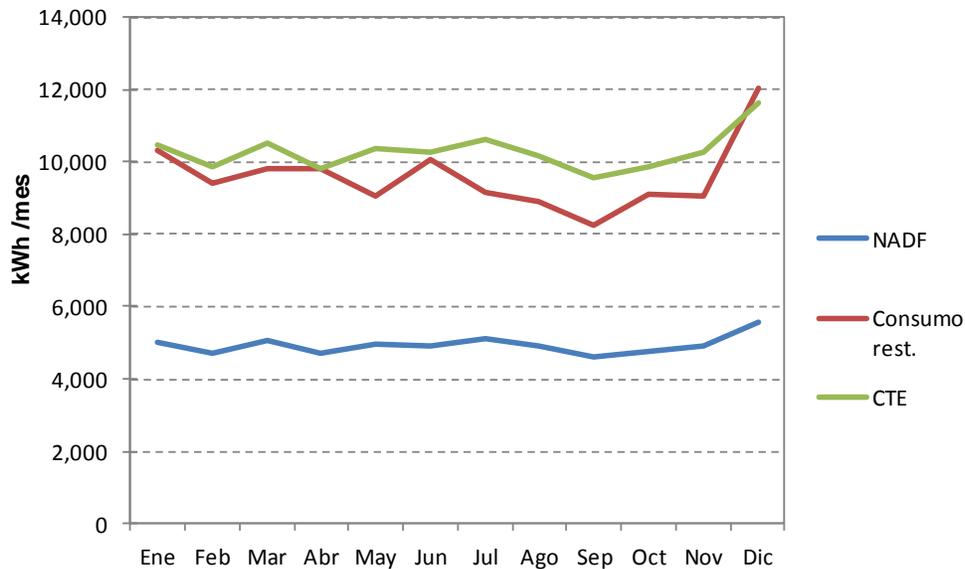
n . son los días del mes

En la **Tabla 20** presenta el calor total requerido para las tres diferentes opciones de demanda de agua caliente de la **Tabla 19** resultado de la ecuación 4.2 (el procedimiento de cálculo de la temperatura media del agua que viene de la red pública se encuentra en el APÉNDICE 2). El valor anual de la energía requerida en el caso de "NADF" y "Consumos" es muy similar al CEA y varía por los redondeos mensuales y que la norma toma 4.19 kJ/KgC mientras que en este caso tomamos el valor de 4.18.

Tabla 20. Comparación entre el calor total requerido mensualmente en kWh para las tres demandas unitarias de agua caliente consideradas.

| Mes | Días mes | T in agua (C) | (kWh/mes) NADF | (kWh/mes) Consumos | (kWh/mes) CTE |
|-------------------|----------|-----------------|-------------------|-----------------------|------------------|
| Ene | 31 | 14.2 | 5,023 | 10,335 | 10,464 |
| Feb | 28 | 14.0 | 4,726 | 9,411 | 9,847 |
| Mar | 31 | 14.7 | 5,049 | 9,792 | 10,520 |
| Abr | 30 | 15.5 | 4,709 | 9,820 | 9,811 |
| May | 31 | 16.2 | 4,971 | 9,073 | 10,355 |
| Jun | 30 | 16.5 | 4,929 | 10,047 | 10,270 |
| Jul | 31 | 16.4 | 5,099 | 9,184 | 10,623 |
| Ago | 31 | 15.9 | 4,893 | 8,889 | 10,193 |
| Sep | 30 | 16.0 | 4,600 | 8,231 | 9,584 |
| Oct | 31 | 15.8 | 4,741 | 9,085 | 9,878 |
| Nov | 30 | 15.5 | 4,931 | 9,076 | 10,273 |
| Dic | 31 | 14.7 | 5,588 | 12,050 | 11,642 |
| Promedio | | 15.5 | 4,938 | 9,583 | 10,288 |
| Total anual (kWh) | | | 59,260 | 114,993 | 123,459 |
| Total anual (kJ) | | | 213,337,570 | 413,973,720 | 444,453,271 |

Figura 55. Gráfica de la energía requerida para elevar la temperatura del agua a 60C para los tres criterios de demanda de agua considerados: NADF, 30% del consumo medido de agua potable y CTE



4.6 CONTRIBUCIÓN SOLAR

La norma ambiental del DF establece que el aporte solar anual mínimo debe ser del 30%. Según el CTE, a cada región en España se le asigna una contribución solar mínima anual que varía del 60% al 80% y que depende de la radiación solar en la región y otras consideraciones especificadas en sus reglamentos.

Según la opinión de diseñadores e instaladores con amplia experiencia, un proyecto de este tipo resulta rentable en porcentajes que van del 70 al 80% de contribución solar. Cada caso es diferente así que este porcentaje debe tomarse con reserva, como una regla empírica. Para este caso consideramos que de la energía total requerida para calentar el agua a 60C, el 70% tendrá que satisfacerse por medio de energía solar. Los resultados se listan en la **Tabla 21**.

En estas aplicaciones, los colectores comúnmente usados son los colectores de tubos al vacío y los planos. Vamos a calcular el número de colectores usando ambas tecnologías, en la próxima sección se realizará el dimensionamiento usando colectores planos.

Tabla 21. Contribución solar al 70% de las necesidades energéticas mensuales.

| Mes | 70% de la energía total (kWh/mes) | | |
|----------|-----------------------------------|--------------|--------------|
| | NADF | Consumos | CTE |
| Ene | 3,516 | 7,234 | 7,325 |
| Feb | 3,309 | 6,588 | 6,893 |
| Mar | 3,535 | 6,855 | 7,364 |
| Abr | 3,297 | 6,874 | 6,868 |
| May | 3,479 | 6,351 | 7,249 |
| Jun | 3,451 | 7,033 | 7,189 |
| Jul | 3,569 | 6,429 | 7,436 |
| Ago | 3,425 | 6,223 | 7,135 |
| Sep | 3,220 | 5,762 | 6,709 |
| Oct | 3,319 | 6,359 | 6,914 |
| Nov | 3,452 | 6,353 | 7,191 |
| Dic | 3,912 | 8,435 | 8,150 |
| Promedio | 3,457 | 6,708 | 7,202 |

4.7 EFICIENCIA DE UN COLECTOR SOLAR PLANO

La ecuación de la eficiencia térmica instantánea de un colector o captador se puede expresar como:

$$\eta = \frac{Q_u}{A \cdot H_T} \quad (4.3)$$

La ecuación 4.3 describe el desempeño del captador como el cociente de la energía útil obtenida Q_u en kJ y la energía total suministrada que se define como el producto de la superficie de captación A en m^2 por la irradiación solar global recibida H_T en kJ/m^2 en el mismo periodo de tiempo.

Cada colector solar tiene su curva de eficiencia característica que depende de los materiales y de su diseño propio. Estas curvas se determinan por medio de pruebas bajo procedimientos específicos en bancos de pruebas de laboratorios certificados.

La eficiencia térmica instantánea de un colector solar también se puede expresar como una ecuación lineal de la forma:

$$\eta = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n - F_R \cdot U_0 \frac{T_m - T_a}{G} \quad (4.4)$$

donde:

η_i ; es la eficiencia del colector solar

$F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n$; factor de eficacia y ordenada al origen

$F_R \cdot U_0$; factor que mide el coeficiente global de pérdidas y gráficamente es la pendiente, este parámetro y el anterior son dados por el fabricante.

T_m es la temperatura media del agua, es decir el promedio entre la temperatura de entrada y salida del agua.

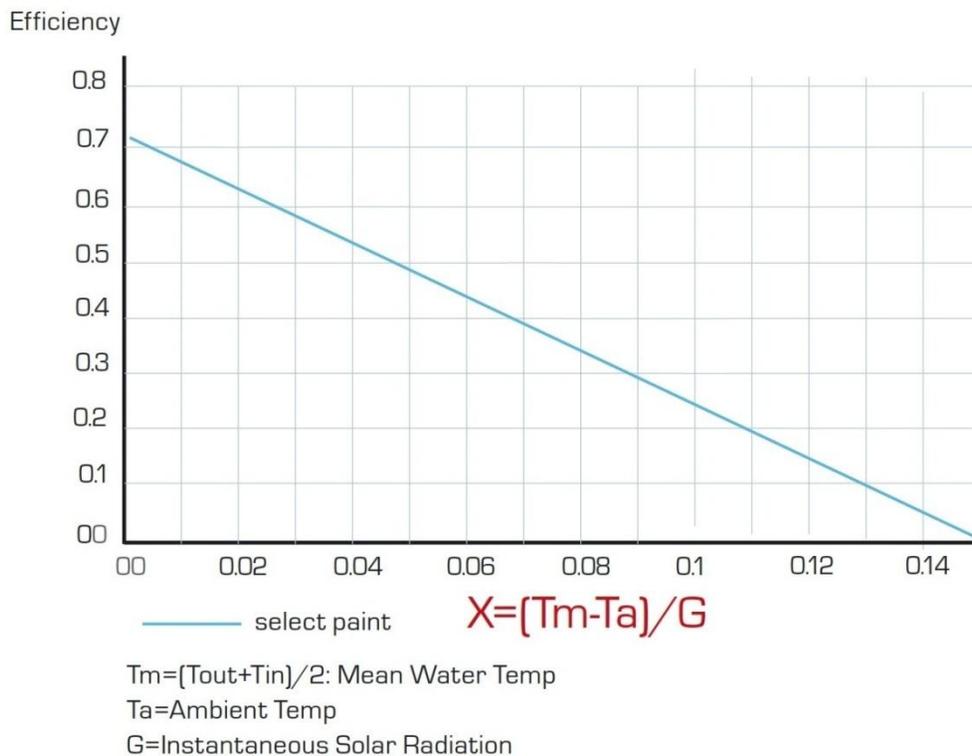
T_a es la temperatura ambiente

G es la irradiancia o potencia solar en W/m^2 .

La **Figura 56** presenta la gráfica de la ecuación característica del colector solar Chromagen modelo CR-120 de acuerdo a la ecuación 4.4.

Una evaluación breve de la **Figura 56** muestra que cuanto menor es el valor de la abscisa X mayor es la eficiencia térmica del colector. Así para valores conocidos de la temperatura ambiente y de la radiación solar incidente, el valor de X es menor para menores temperaturas de agua en la entrada del colector solar. Conforme el agua de entrada incrementa su temperatura y se va acercando a la temperatura requerida va disminuyendo la eficiencia del colector.

Figura 56. Curva de eficiencia para el calentador solar Chromagen CR-120.



Fuente. Tomado de "Technical Manual Chromagen" http://www.blueskyenergy.net/files/technical_manual.pdf

4.8 CARACTERÍSTICAS DEL COLECTOR SOLAR PLANO ELEGIDO

Para la primera propuesta de instalación se elige conformar el sistema de calentamiento solar de agua con colectores solares planos. El modelo elegido es de la marca comercial Chromagen modelo CR-120 (QR-F) ya que es el colector que se encuentra actualmente en la instalación solar del restaurante y porque posteriormente se hará una comparación entre el número de colectores calculado y el existente. Se podría elegir otra marca basados en la calidad del equipo, su curva de eficiencia, su confiabilidad en el mercado, el precio, su tamaño, entre otros factores.

En el APÉNDICE 3 se puede encontrar la ficha técnica completa del colector seleccionado. A continuación, en la **Tabla 22** y **23** se presentan algunos datos del captador solar:

Tabla 22. Características del colector solar CHROMAGEN CR-120

| CARACTERÍSTICAS DEL CAPTADOR | |
|-------------------------------------|--|
| Absorbedor: | Aletas de aluminio soldadas ultrasónicamente a una parrilla de 8 tubos de cobre. Recubrimiento de pintura solar selectiva. |
| Red de conductos: | Tubos de cobre soldados a dos cabezales. Diámetro exterior de 5/8" |
| Cabezales: | De cobre, de 3/4" |
| Aislamiento: | Capa de poliuretano rígido inyectado de 25 mm de espesor. Se ubica por debajo y alrededor de la placa absorbedora. |
| Cubierta: | Vidrio Solar de 3.2mm de espesor rodeado por una junta de goma de EPDM. |
| Hoja o foil de aluminio: | Adherida al aislamiento actúa como barrera contra pérdidas de calor por el dorso del captador. |
| Carcasa: | Acero Galvanizado lacado epoxícamente en negro. |
| Conexiones roscadas: | Conexiones hembra roscadas de 3/4" de bronce |

Tabla 23. Dimensiones del colector solar CHROMAGEN CR-120

| Dimensiones y peso | |
|------------------------------------|------|
| Diámetro tubos | 5/8" |
| Largo total (m) | 2.19 |
| Ancho total (m) | 1.28 |
| Espesor (cm) | 9 |
| Area total (m ²) | 2.80 |
| Area de apertura (m ²) | 2.60 |
| Peso vacío (kg) | 41 |
| Capacidad de fluido (lt) | 4.1 |
| Presión máxima de trabajo (bar) | 10 |

De la **Tabla 23** se observa que el colector puede soportar sin problemas la presión de operación del sistema de abastecimiento de agua y también la máxima.

La ecuación de eficiencia instantánea del colector solar marca Chromagen modelo CR-120 (tomada de la ficha técnica del producto) es la siguiente:

$$\eta = 0.72 - 4.8 \frac{T_m - T_a}{G} \quad (4.5)$$

4.9 RADIACIÓN SOLAR DIARIA

Existen varias fuentes de información para conocer la radiación solar sobre una superficie. En el APÉNDICE 5 se presentan datos de radiación solar de varias fuentes como el programa RetScreen, cálculo mediante el modelo Liu-Jordan tomando en cuenta las coordenadas del restaurante y las mediciones reportadas por el Instituto de Geofísica de la UNAM. Se eligen los datos del Instituto de Geofísica de la UNAM por tratarse de mediciones confiables con 21 años de datos y por ser una estación meteorológica cercana a la ubicación del restaurante

La radiación solar promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal en MJ/m²-día se obtuvo como el promedio de las mediciones mensuales de 1984 a 2005 publicadas en la página web de la estación meteorológica del Instituto de Geofísica de la UNAM ubicada en Ciudad Universitaria, México DF con las coordenadas de 19° 20' 01" latitud Norte y 99° 11' 54" longitud Oeste, a una altitud de 2268 msnm.

En la **Tabla 24** se presentan los datos de la radiación global promedio para una superficie horizontal y para una superficie inclinada 20 grados. Para más detalles consultar el Apéndice 5.

Tabla 24. Irradiación global promedio diaria para una superficie horizontal y para una superficie inclinada a 20 grados.

| Mes | Días | Rad. Sup. Horizontal (MJ/m2-día) | Rad. Sup. Inclinada 20° (MJ/m2-día) |
|-----|------|--|---|
| Ene | 31 | 16.43 | 19.89 |
| Feb | 28 | 19.26 | 21.92 |
| Mar | 31 | 21.69 | 22.85 |
| Abr | 30 | 21.22 | 20.67 |
| May | 31 | 20.99 | 19.42 |
| Jun | 30 | 18.86 | 17.17 |
| Jul | 31 | 18.68 | 17.17 |
| Ago | 31 | 18.06 | 17.24 |
| Sep | 30 | 16.28 | 16.43 |
| Oct | 31 | 16.34 | 17.80 |
| Nov | 30 | 16.55 | 19.62 |
| Dic | 31 | 15.27 | 18.97 |

4.10 ÁREA DE CAPTACIÓN

La eficiencia del captador varía a cada momento, sin embargo se puede obtener un valor promedio mensual con la irradiancia promedio y con la temperatura ambiente promedio de acuerdo a la ecuación 4.5, los resultados se presentan en la **Tabla 25** que muestra la temperatura del agua que viene de la red, la temperatura ambiente media mensual de la localidad (datos de la estación de monitoreo del Sistema Meteorológico Nacional más cercana al lugar), las horas de insolación de la localidad (Ver APÉNDICE 5 para más detalles) y la eficiencia promedio mensual obtenida. El cálculo de la eficiencia promedio anual del captador es alta, 58%. En la práctica, la eficiencia promedio de los colectores planos se encuentra alrededor del 40%.

De la ecuación 4.3 podemos despejar el área de captación una vez conocida la eficiencia del captador:

$$A = \frac{Q_u}{\eta \cdot H_T} \quad (4.6)$$

Donde el calor útil Q_u es la contribución solar del 70% que queremos obtener y H_T es la irradiancia mensual promedio diaria sobre una superficie inclinada 20 grados.

Tabla 25. Eficiencia teórica promedio mensual del colector solar Chromagen CR-120.

| Mes | Ta (°C) | Tin agua (°C) | Treq (°C) | Tm (°C) | Delta T (°C) | Horas de insolación | Irradiancia prom (W/m2) | Delta T / Iprom | Eficiencia promedio |
|-----|---------|---------------|-----------|---------|--------------|---------------------|-------------------------|-----------------|---------------------|
| Ene | 13.3 | 14.2 | 60 | 37.1 | 23.8 | 7.87 | 702.19 | 0.034 | 0.557 |
| Feb | 14.8 | 14.0 | 60 | 37.0 | 22.2 | 8.13 | 748.78 | 0.030 | 0.578 |
| Mar | 16.8 | 14.7 | 60 | 37.3 | 20.5 | 8.30 | 764.38 | 0.027 | 0.591 |
| Abr | 18.6 | 15.5 | 60 | 37.7 | 19.1 | 7.52 | 763.67 | 0.025 | 0.600 |
| May | 19.2 | 16.2 | 60 | 38.1 | 18.9 | 7.38 | 730.56 | 0.026 | 0.596 |
| Jun | 19 | 16.5 | 60 | 38.2 | 19.2 | 6.38 | 747.46 | 0.026 | 0.596 |
| Jul | 17.9 | 16.4 | 60 | 38.2 | 20.3 | 6.06 | 786.69 | 0.026 | 0.596 |
| Ago | 18 | 15.9 | 60 | 38.0 | 20.0 | 5.79 | 826.80 | 0.024 | 0.604 |
| Sep | 17.5 | 16.0 | 60 | 38.0 | 20.5 | 5.47 | 833.97 | 0.025 | 0.602 |
| Oct | 16.8 | 15.8 | 60 | 37.9 | 21.1 | 6.45 | 766.65 | 0.028 | 0.588 |
| Nov | 15 | 15.5 | 60 | 37.7 | 22.7 | 7.39 | 737.80 | 0.031 | 0.572 |
| Dic | 13.6 | 14.7 | 60 | 37.4 | 23.8 | 7.54 | 698.34 | 0.034 | 0.557 |

Una vez que se encuentra el área de captación, esta se divide entre el área de apertura de un captador, que en este caso es de 2.6m² y así obtenemos el número de colectores. Los resultados se presentan en la **Tabla 26** para cada uno de los casos de volumen de agua considerados. Adicionalmente se considera un 10% adicional de área (porcentaje de la experiencia de instaladores profesionales) para subsanar pérdidas en tuberías, conducción y almacenamiento.

Tabla 26. Área de captación para los tres criterios de consumo y un 10% más que se considera pérdidas.

| Mes | N. de días | Área calculada (m ²) | | | Área mas 10%perdidatuberias (m ²) | | |
|--------------------------|------------|----------------------------------|----------|-------|---|--------------|--------------|
| | | NADF | consumos | CTE | NADF | consumos | CTE |
| Ene | 31 | 36.82 | 75.75 | 76.70 | 40.50 | 83.33 | 84.37 |
| Feb | 28 | 33.59 | 66.88 | 69.98 | 36.95 | 73.57 | 76.98 |
| Mar | 31 | 30.39 | 58.93 | 63.31 | 33.43 | 64.83 | 69.64 |
| Abr | 30 | 31.92 | 66.55 | 66.49 | 35.11 | 73.21 | 73.14 |
| May | 31 | 34.93 | 63.76 | 72.77 | 38.42 | 70.13 | 80.05 |
| Jun | 30 | 40.44 | 82.43 | 84.26 | 44.49 | 90.68 | 92.68 |
| Jul | 31 | 40.50 | 72.95 | 84.37 | 44.55 | 80.24 | 92.81 |
| Ago | 31 | 38.18 | 69.38 | 79.55 | 42.00 | 76.31 | 87.50 |
| Sep | 30 | 39.06 | 69.88 | 81.36 | 42.96 | 76.86 | 89.50 |
| Oct | 31 | 36.84 | 70.58 | 76.75 | 40.52 | 77.64 | 84.42 |
| Nov | 30 | 36.91 | 67.93 | 76.89 | 40.60 | 74.72 | 84.58 |
| Dic | 31 | 43.03 | 92.79 | 89.65 | 47.34 | 102.07 | 98.62 |
| Promedio | | 36.88 | 71.48 | 76.84 | 40.57 | 78.63 | 84.52 |
| Promedio / área captador | | 14.19 | 27.49 | 29.55 | 15.60 | 30.24 | 32.51 |
| No. de captadores | | 14.00 | 28.00 | 30.00 | 16.00 | 30.00 | 32.00 |

Se ha calculado el área de captación tomando en cuenta 3 diferentes consumos diarios de agua caliente, el número de colectores para la opción "NADF" es de 14 y agregando el 10%, 16, para "Consumos" se obtienen 28 colectores (30 al sumar el 10% y redondear) y para la referencia del "CTE" se obtienen 30 colectores (32 al sumar el 10% y redondear).

El número de captadores obtenido se redondea al número más cercano que nos permita un acomodo uniforme y con el mismo número de colectores entre filas y lo más equilibrado hidráulicamente posible. Más adelante se verá como acomodar los captadores en la azotea del lugar pero primero se hará una cuenta rápida para saber si el número más grande cabe en la azotea. El área total de cada colector es de 2.8 m² que multiplicado por 32 unidades da un resultado de 89.6m². Ahora bien esta área sería la que ocuparían los 32 colectores uno al lado de otro sin espacio que los separe. Si consideramos medio metro de cada lado como espaciamiento entre colectores tendríamos por captador un área de 3.05m² que por los 32 captadores resulta 97.6m². La azotea tiene un área disponible aproximada de 300m² por lo que hay espacio suficiente para cualquiera de las opciones que se elija.

4.11 ANÁLISIS DE LA CONTRIBUCIÓN SOLAR DE LOS TRES CRITERIOS CONSIDERADOS

- Criterio de la NADF

El número de colectores obtenido para este criterio es de 14 colectores. Se agregó un 10% por pérdidas dando un total de 16 colectores. El cálculo de la aportación energética de un campo de 14 colectores se realiza despejando el calor útil de la ecuación 3.6, quedando:

$$Q_u = A \cdot \eta \cdot H_T \quad (4.7)$$

La **Tabla 27** presenta la demanda de energía mensual del establecimiento para calentar agua, el aporte energético que representarían los 14 captadores en kWh (se hace el cálculo sobre 14 ya que los otros 2 se contemplan a pérdidas en el sistema) y el porcentaje mensual respectivo.

Tabla 27. Aporte solar con el criterio de demanda de la norma ambiental del DF.

| Mes | N. de días | Demanda | Aporte solar | % de aporte solar |
|-------------|------------|---------|--------------|-------------------|
| | | kWh/mes | kWh/mes | |
| Ene | 31 | 5023 | 3476 | 69 |
| Feb | 28 | 4726 | 3585 | 76 |
| Mar | 31 | 5049 | 4234 | 84 |
| Abr | 30 | 4709 | 3760 | 80 |
| May | 31 | 4971 | 3626 | 73 |
| Jun | 30 | 4929 | 3106 | 63 |
| Jul | 31 | 5099 | 3208 | 63 |
| Ago | 31 | 4893 | 3265 | 67 |
| Sep | 30 | 4600 | 3001 | 65 |
| Oct | 31 | 4741 | 3279 | 69 |
| Nov | 30 | 4931 | 3404 | 69 |
| Dic | 31 | 5588 | 3309 | 59 |
| TOTAL ANUAL | | 59260 | 41253 | 70 |

La **Figura 57** grafica el aporte solar y la demanda restante que sería cubierta de la forma tradicional para completar el total. En la **Figura 58** se grafica el porcentaje del aporte solar mensual y el promedio anual.

Figura 57. Aporte solar de 14 colectores al total de energía requerida para calentar agua.

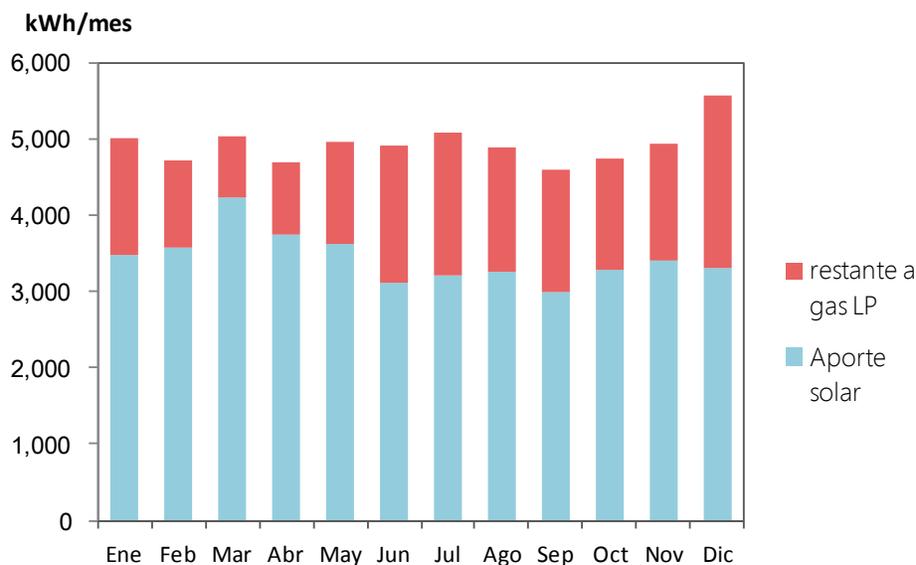
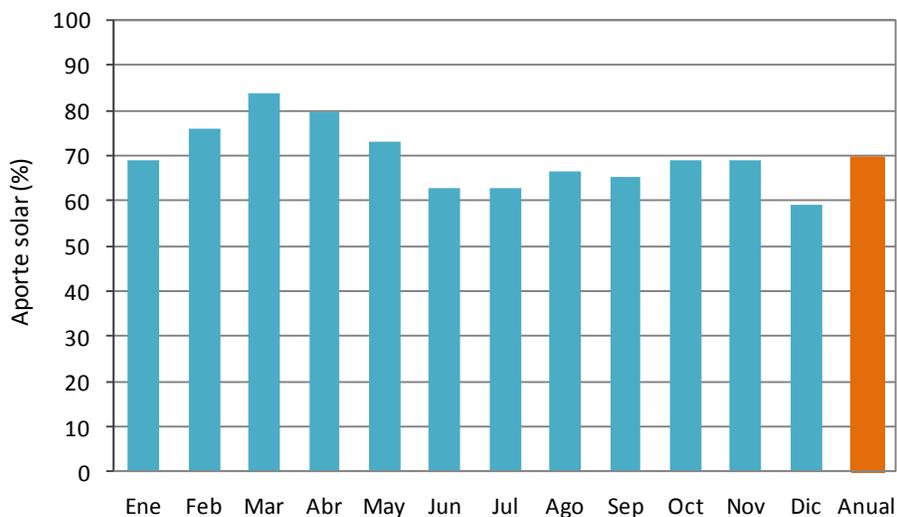


Figura 58. Variación del aporte solar (%) a lo largo del año



- Criterio de los consumos de agua del restaurante

La **Tabla 28** presenta la demanda total de energía para calentar agua, el aporte energético que representarían los 28 captadores (se consideran 28 y no 30 porque la energía producida por los otros dos se considera pérdidas en el sistema igual que en el caso anterior) y su porcentaje mensual respectivo. **Figura 59.**

Tabla 28. Aporte solar con el criterio de demanda de que el 30% del consumo total agua es agua caliente.

| Mes | N. de días | Demanda | Aporte solar | % de aporte solar |
|-------------|------------|---------|--------------|-------------------|
| | | kWh/mes | kWh/mes | |
| Ene | 31 | 10335 | 6952 | 67 |
| Feb | 28 | 9411 | 7170 | 76 |
| Mar | 31 | 9792 | 8467 | 86 |
| Abr | 30 | 9820 | 7520 | 77 |
| May | 31 | 9073 | 7252 | 80 |
| Jun | 30 | 10047 | 6211 | 62 |
| Jul | 31 | 9184 | 6416 | 70 |
| Ago | 31 | 8889 | 6530 | 73 |
| Sep | 30 | 8231 | 6003 | 73 |
| Oct | 31 | 9085 | 6559 | 72 |
| Nov | 30 | 9076 | 6808 | 75 |
| Dic | 31 | 12050 | 6618 | 55 |
| TOTAL ANUAL | | 114993 | 82506 | 72 |

Figura 59. Aporte solar de 28 captadores al total de la energía requerida para calentar agua.

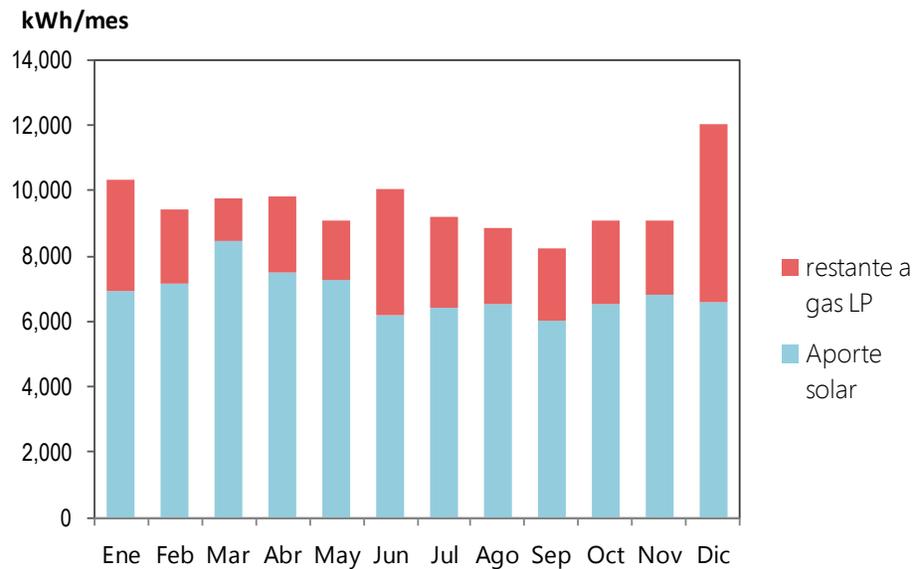
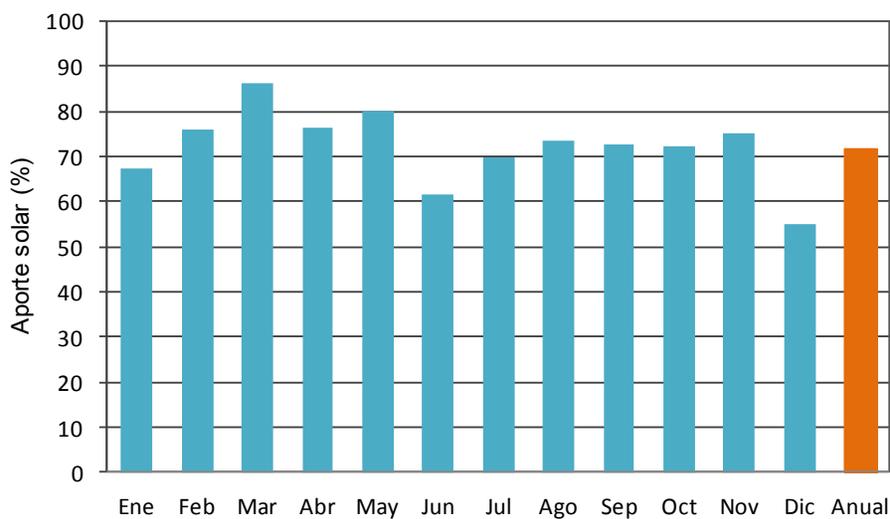


Figura 60. Variación del aporte solar (%) a lo largo del año

- Criterio de acuerdo al CTE

Para el caso de un consumo unitario de 7.5 litros/comida-día, la **Tabla 29** presenta la demanda total de energía para calentar agua, el aporte energético que representarían 30 captadores y su porcentaje mensual de participación energético respectivo.

Tabla 29. Aporte solar con el criterio de demanda del CTE

| Mes | N. de días | Demanda | Aporte solar | % de aporte solar |
|-------------|------------|---------|--------------|-------------------|
| | | kWh/mes | kWh/mes | |
| Ene | 31 | 10464 | 7750 | 74 |
| Feb | 28 | 9847 | 7714 | 78 |
| Mar | 31 | 10520 | 8902 | 85 |
| Abr | 30 | 9811 | 7792 | 79 |
| May | 31 | 10355 | 7565 | 73 |
| Jun | 30 | 10270 | 6472 | 63 |
| Jul | 31 | 10623 | 6688 | 63 |
| Ago | 31 | 10193 | 6718 | 66 |
| Sep | 30 | 9584 | 6196 | 65 |
| Oct | 31 | 9878 | 6932 | 70 |
| Nov | 30 | 10273 | 7396 | 72 |
| Dic | 31 | 11642 | 7388 | 63 |
| TOTAL ANUAL | | 123459 | 87514 | 71 |

Figura 61. Aporte solar de 30 captadores solares (en azul) y la energía restante (en rojo) que completa el total de la energía requerida de acuerdo a los datos de la Tabla 29.

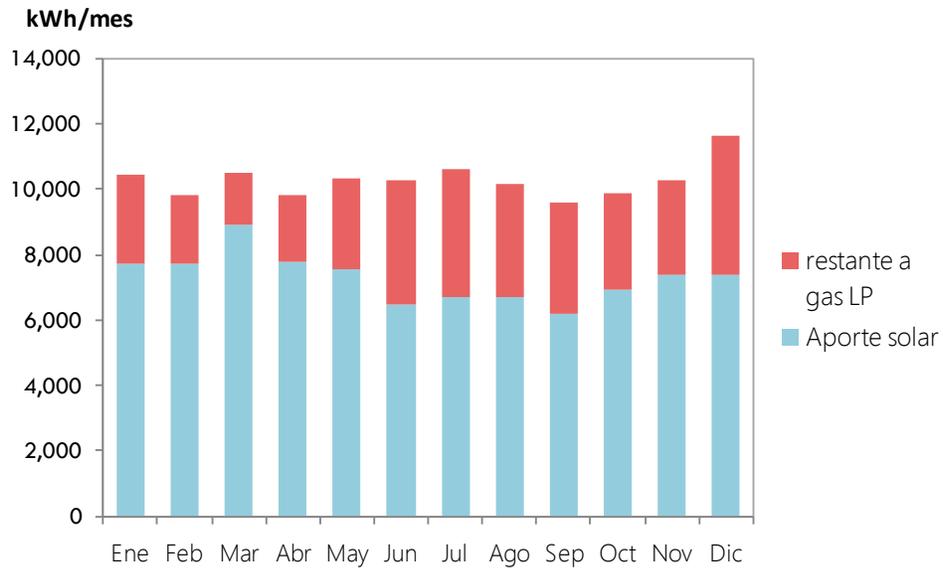
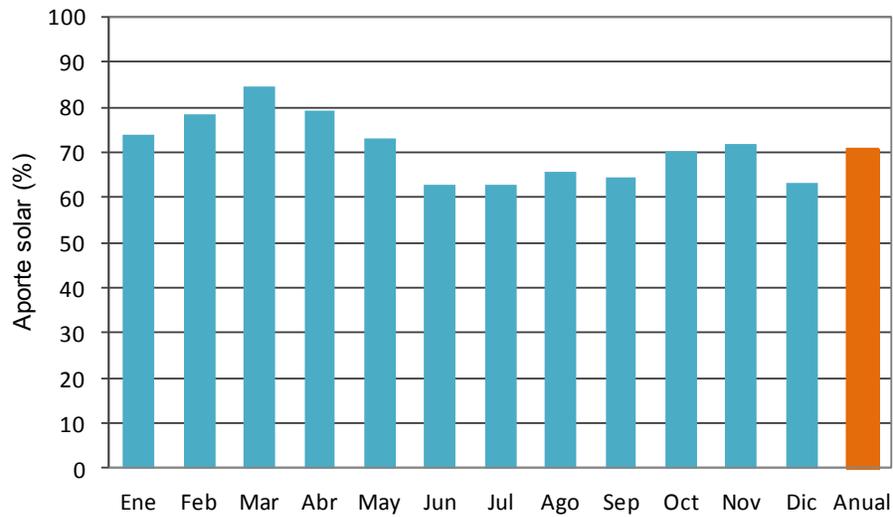


Figura 62. Variación del aporte solar (%) a lo largo del año



4.12 VOLUMEN DEL DEPÓSITO

Una instalación solar térmica requiere del almacenamiento de energía en forma de calor latente de un fluido, en este caso agua, para ajustar el tiempo de la oferta (el recurso solar captado) y la demanda (el agua caliente en el momento en que el usuario la requiera).

Un tanque de almacenamiento o acumulador es el elemento de la instalación solar térmica que permite almacenar la energía térmica del agua ya que está aislado térmicamente para minimizar las pérdidas energéticas.

El volumen del depósito de acumulación se recomienda entre 50 y 100 litros por m² de acuerdo a Zabalza y Aranda. Según el HE-4, el volumen del depósito tiene que cumplir la siguiente condición:

$$50 < \frac{V}{A} < 180$$

El cálculo del volumen del tanque de agua caliente según Zabalza se presenta en la **Tabla 30**, para cada caso.

Tabla 30. Cálculo del volumen del depósito de acumulación.

| Límites | Valor | Volumen (litros) | | |
|-----------------|-------|------------------|-------------|--------------------|
| | | NADF | consumos | CTE |
| Menor | 50 | 2080 | 3900 | 4160 |
| Mayor | 100 | 4160 | 7800 | 8320 |
| Promedio | 75 | 3120 | 5850 | 6240 |
| Volumen elegido | | 3000 | 6000 | 6000 ó 6500 |

Normalmente no hay un tanque que dé el volumen exacto calculado salvo que este hecho a la medida, por tal razón se escogen tanques de manufactura comercial. Para "NADF" se escoge un termotanque de almacenamiento de 3000 litros, para "Consumos" un tanque de 6000 litros o bien dos de 3000 litros y para "CTE" un tanque de 6000 o 6500 litros.

4.13 RESUMEN DE LOS CRITERIOS ANALIZADOS

En la **Tabla 31** se presenta un resumen de las tres opciones analizadas. La primera columna presenta la demanda diaria promedio de agua caliente, la segunda columna la demanda energética anual para calentar ese volumen de agua, la tercera columna el número de colectores calculado para cada caso, la cuarta el volumen del tanque de almacenamiento, la quinta el número de captadores sin el área que se adicionó por

cuestión de pérdidas por conducción y la última el aporte solar de los captadores sin el área agregada.

Tabla 31. Resumen de los valores calculados para los tres criterios de consumo de agua.

| Propuesta | L/día promedio | Demanda | No total captadores | Termotanque | No captadores aporte solar | % Aporte solar anual |
|-------------------------|----------------|----------------|---------------------|--------------|----------------------------|----------------------|
| | | kWh anual | | (litros) | | |
| NADF | 3,139 | 59,260 | 16 | 3,000 | 14 | 70 |
| 30% Agua potable | 6,089 | 114,993 | 30 | 6,000 | 28 | 72 |
| CTE | 6,540 | 123,459 | 32 | 6,000 | 30 | 71 |

La opción "Consumos" (6.89 litros/comida-día) y la opción CTE (7.5 litros/comida-día) son las que más se asemejan en la demanda de agua caliente y por tanto en el área de captación y en el volumen del depósito. Para hacer el diseño de la instalación solar escogeremos la opción "Consumos" por provenir de datos reales de la demanda de agua potable que se usa en el restaurante y que resulta en un área de captación de 78m² equivalentes a 30 captadores y un volumen de acumulación de 6,000 litros.

Existe otro método para calcular el aporte solar de un campo de colectores conocido como carta f . En la próxima sección haremos uso de ese método para estimar el aporte solar del campo de colectores de la opción "Consumos".

4.14 MÉTODO DE LA CARTA- f

El método de la carta f (f -Chart en inglés) fue desarrollado por Beckmann y permite el cálculo de la cobertura solar por medio de varias simulaciones matemáticas y evaluaciones de condiciones operativas reales de instalaciones de calentamiento solar con base a una serie de ecuaciones adimensionales de sistemas de calentamiento solar.

La fracción solar f_i para un determinado mes del año se define como el cociente entre la energía suministrada por el sistema de calentamiento solar Q_u para el mes i y la demanda mensual de energía, Q_{dem} en el mismo periodo, es decir:

$$f_i = \frac{Q_{u_i}}{Q_{dem_i}} \quad (4.8)$$

La determinación de la fracción solar depende de dos parámetros adimensionales y empíricos, X e Y y se puede llevar a cabo por medio de una gráfica o bien mediante la siguiente ecuación:

$$f = 1.029 \times Y - 0.065 \times X - 0.245 \times Y^2 + 0.0018 \times X^2 + 0.0215 \times Y^3 \quad (4.9)$$

4.14.1 CALCULO DEL PARÁMETRO Y

El parámetro Y está relacionado con la energía solar absorbida por la placa del captador y se define como:

$$Y = \frac{\text{energía absorbida por el captador}}{\text{demanda energética mensual}} = \frac{E_{abs}}{Q_{dem}} \quad (4.10)$$

Donde:

$$E_{abs} = A \cdot F_R'(\tau \cdot \alpha) \cdot H_{mes} \quad (4.11)$$

Y:

$$F_R'(\tau \cdot \alpha) = F_R(\tau \cdot \alpha)_n \cdot \left[\frac{(\tau \cdot \alpha)}{(\tau \cdot \alpha)_n} \right] \cdot \frac{F_R'}{F_R} \quad (4.12)$$

La definición de las variables de las anteriores ecuaciones se muestra en la **Tabla 32**.

Tabla 32. Definición de parámetros

| VARIABLE | DESCRIPCIÓN | Unidades |
|---|---|--------------------------|
| Eabs | Energía absorbida por el captador en un mes | kWh/mes |
| A | Superficie de captación | m ² |
| H | Radiación solar mensual incidente en el plano del colector | kWh/m ² - mes |
| $F_R'(\tau \cdot \alpha)$ | Factor producto del factor de remoción, transmisividad de la cubierta de vidrio y absorptividad del recubrimiento selectivo del captador para el ángulo de incidencia | Adimensional |
| $F_R(\tau \cdot \alpha)_n$ | Factor obtenido de la ecuación de eficiencia del colector | Adimensional |
| $\frac{(\tau \cdot \alpha)}{(\tau \cdot \alpha)_n}$ | Modificación del ángulo de incidencia | Adimensional |
| $\frac{F_R'}{F_R}$ | Factor de corrección del conjunto captador e intercambiador | Adimensional |

Y los valores asignados a las variables son las siguientes:

| VARIABLE | VALOR | Unidades |
|---|--|----------------|
| A | 78 | m ² |
| $F_R(\tau \cdot \alpha)_n$ | 0.72 | Adimensional |
| $\frac{(\tau \cdot \alpha)}{(\tau \cdot \alpha)_n}$ | 0.96 para cubierta sencilla o simple* | Adimensional |
| $\frac{F'_R}{F_R}$ | 0.95 | Adimensional |

*Duffie y Beckmann sugieren 0.96 para una cubierta simple y 0.94 si la cubierta es doble.

** Para este parámetro Duffie y Beckmann sugieren 0.95

El factor $F'_R(\tau \cdot \alpha)_n$ es:

$$F'_R(\tau \cdot \alpha)_n = 0.72 \times 0.96 \times 0.95 = 0.66$$

La **Tabla 33** presenta la demanda mensual de energía para el caso de "Consumos", la radiación mensual que incide sobre la superficie de captación (que es la radiación diaria por el número de días del mes) y la energía absorbida por el captador calculada con la ecuación 4.11 y el factor adimensional Y.

Tabla 33. Cálculo del parámetro Y.

| Mes | N. de días | Demanda mensual (kWh/mes) | Radiacion solar (kWh/m2-mes) | Eabs (kWh/mes) | Y |
|--------------------|------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------|------|
| Enero | 31 | 10,335 | 171.31 | 8,774 | 0.85 |
| Febrero | 28 | 9,411 | 170.52 | 8,734 | 0.93 |
| Marzo | 31 | 9,792 | 196.77 | 10,078 | 1.03 |
| Abril | 30 | 9,820 | 172.24 | 8,822 | 0.90 |
| Mayo | 31 | 9,073 | 167.22 | 8,564 | 0.94 |
| Junio | 30 | 10,047 | 143.05 | 7,327 | 0.73 |
| Julio | 31 | 9,184 | 147.84 | 7,572 | 0.82 |
| Agosto | 31 | 8,889 | 148.49 | 7,605 | 0.86 |
| Septiembre | 30 | 8,231 | 136.96 | 7,015 | 0.85 |
| Octubre | 31 | 9,085 | 153.23 | 7,848 | 0.86 |
| Noviembre | 30 | 9,076 | 163.49 | 8,374 | 0.92 |
| Diciembre | 31 | 12,050 | 163.31 | 8,364 | 0.69 |
| Total anual | | 114993 | | 99078 | |

4.14.2 CALCULO DEL PARÁMETRO X

El parámetro X está relacionado con las pérdidas de energía que experimenta el captador y se define como:

$$X = \frac{\text{energía perdida por el captador}}{\text{demanda energetica mensual}} = \frac{E_{perd}}{Q_{dem}} \quad (4.13)$$

Donde:

$$E_{perd} = A \cdot F'_R U_0 (100 - t_a) \cdot \Delta t \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (4.14)$$

Y:

$$F'_R \cdot U_0 = F_R \cdot U_0 \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot 10^{-3} \quad [=] \text{ kW}/(\text{m}^2\text{°C}) \quad (4.15)$$

$$K_1 = \left(\frac{\text{volumen de acumulacion}}{75 \times \text{m}^2 \text{captador}} \right)^{-0.25} \quad (4.16)$$

$$K_2 = \frac{(11.6 + 1.18 t_{ACS} + 3.86 t_{red} - 2.32 t_a)}{100 t_a} \quad (4.17)$$

Tabla 34. Definición de variables para el cálculo de X

| VARIABLE | DESCRIPCIÓN | Unidades |
|------------|---|-------------------------|
| E_{perd} | Energía perdida por el captador en un mes | kWh/mes |
| A | Superficie de captación | m^2 |
| H | Radiación solar mensual incidente en el plano del colector | kWh/ m^2 - mes |
| $F'_R U_0$ | Factor obtenido de la ecuación de eficiencia del colector que mide el coeficiente global de pérdidas de calor | W/ m^2 °C |
| Δt | Número de horas para determinado t | Adimensional |
| t_a | Temperatura ambiente | Adimensional |
| K_1 | Factor de corrección por almacenamiento | Adimensional |
| K_2 | Factor de corrección para ACS del factor X | Adimensional |

Los valores para el caso “Consumos” son:

| VARIABLE | VALOR | Unidades |
|---------------------|-------|----------------|
| A | 78 | m ² |
| Volumen acumulación | 6,000 | litros |
| $F_R U_0$ | 4.8 | W/m °C |
| K_1 | 0.99 | Adimensional |
| t_{ACS} | 60 | °C |

Tabla 35. Cálculo del parámetro X.

| Mes | N. de días | Demanda mensual (kWh) | ta | tred | Δt | K1 | K2 | Eperd mens kWh | X |
|--------------------|------------|--------------------------|------|------|-----|------|-------|-------------------|------|
| | | | (C) | | hrs | | | | |
| Enero | 31 | 10,335 | 13.3 | 14.2 | 744 | 0.99 | 0.080 | 1,820 | 0.18 |
| Febrero | 28 | 9,411 | 14.8 | 14.0 | 672 | 0.99 | 0.069 | 1,398 | 0.15 |
| Marzo | 31 | 9,792 | 16.8 | 14.7 | 744 | 0.99 | 0.060 | 1,302 | 0.13 |
| Abril | 30 | 9,820 | 18.6 | 15.5 | 720 | 0.99 | 0.053 | 1,103 | 0.11 |
| Mayo | 31 | 9,073 | 19.2 | 16.2 | 744 | 0.99 | 0.052 | 1,113 | 0.12 |
| Junio | 30 | 10,047 | 19.0 | 16.5 | 720 | 0.99 | 0.054 | 1,106 | 0.11 |
| Julio | 31 | 9,184 | 17.9 | 16.4 | 744 | 0.99 | 0.058 | 1,257 | 0.14 |
| Agosto | 31 | 8,889 | 18.0 | 15.9 | 744 | 0.99 | 0.057 | 1,224 | 0.14 |
| Septiembre | 30 | 8,231 | 17.5 | 16.0 | 720 | 0.99 | 0.059 | 1,242 | 0.15 |
| Octubre | 31 | 9,085 | 16.8 | 15.8 | 744 | 0.99 | 0.062 | 1,359 | 0.15 |
| Noviembre | 30 | 9,076 | 15.0 | 15.5 | 720 | 0.99 | 0.072 | 1,549 | 0.17 |
| Diciembre | 31 | 12,050 | 13.6 | 14.7 | 744 | 0.99 | 0.079 | 1,800 | 0.15 |
| Total anual | | 114,993 | | | | | | 16,271 | |

4.14.3 FRACCIÓN f

Conocidos los factores adimensionales X e Y ya se puede realizar el cálculo de la fracción f de acuerdo a la ecuación 4.9 y posteriormente se aplica la ecuación 4.8 para determinar el calor útil. Los resultados se muestran en la **Tabla 36**. Para la cobertura anual, el cálculo es mediante la expresión siguiente:

$$\text{Cobertura solar anual} = \frac{\sum Q_u}{\sum Q_{dem}} = \frac{81,383}{114,993} = 0.708 \quad (4.18)$$

La cobertura solar anual calculada con el método de la carta f es de 70.8% mientras que por el método anterior es 72%. La diferencia es que en este caso se consideró el

área de los 30 colectores mientras que el anterior calculó de la fracción solar se hizo con 28 colectores y la energía de los 2 restantes se consideró como pérdidas (recomendación de instaladores). El método de la carta f tiene sus propias correlaciones para calcular las pérdidas motivo por el cual se usó el área total. Finalmente se observa que los porcentajes de fracción solar anual calculados son muy parecidos.

Tabla 36. Cobertura solar mensual y anual

| Mes | Y | X | f | % | Qdem (kWh) | Qu kWh |
|--------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|----------------|---------------|
| Enero | 0.85 | 0.18 | 0.699 | 69.9 | 10,335 | 7,222 |
| Febrero | 0.93 | 0.15 | 0.752 | 75.2 | 9,411 | 7,073 |
| Marzo | 1.03 | 0.13 | 0.814 | 81.4 | 9,792 | 7,974 |
| Abril | 0.90 | 0.11 | 0.735 | 73.5 | 9,820 | 7,218 |
| Mayo | 0.94 | 0.12 | 0.763 | 76.3 | 9,073 | 6,924 |
| Junio | 0.73 | 0.11 | 0.621 | 62.1 | 10,047 | 6,242 |
| Julio | 0.82 | 0.14 | 0.685 | 68.5 | 9,184 | 6,291 |
| Agosto | 0.86 | 0.14 | 0.706 | 70.6 | 8,889 | 6,272 |
| Septiembre | 0.85 | 0.15 | 0.703 | 70.3 | 8,231 | 5,783 |
| Octubre | 0.86 | 0.15 | 0.710 | 71.0 | 9,085 | 6,453 |
| Noviembre | 0.92 | 0.17 | 0.747 | 74.7 | 9,076 | 6,777 |
| Diciembre | 0.69 | 0.15 | 0.594 | 59.4 | 12,050 | 7,155 |
| Total anual | 10.39 | 1.70 | 0.708 | 70.8 | 114,993 | 81,383 |

El CTE en su documento HE-4 y también los lineamientos del FIRCO especifican que “el dimensionado de una instalación, cualquiera que sea su aplicación, deberá realizarse de modo que durante ningún mes del año la energía producida por la instalación supere el 110% de la demanda de consumo y en no más de tres meses el 100%” condición con la cual cumple el dimensionamiento realizado. En la **Tabla 36** se ve que en ningún mes el valor del calor útil llega al 100% del calor demandado, por ejemplo el mes en que mayor calor útil se genera es marzo (7,073kWh) y su fracción solar respectiva es de 81.4%.

CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA PROPUESTO

5.1 ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN DE LOS COLECTORES

Para la instalación propuesta, el consumo es constante durante todo el año y se escoge la latitud del lugar como ángulo de inclinación de los colectores. La latitud del lugar es de $19^{\circ}21'$ que se redondea a 20 grados.

5.2 DISTANCIA ENTRE FILAS DE COLECTORES

En nuestro caso, escogeremos la distancia mínima entre filas obtenida mediante el procedimiento expuesto en la Sección 3.3.2, es decir 0.7063m. Además de los efectos de sombra, la distancia ideal entre filas es aquella que considera un espacio suficiente para que se realicen labores de mantenimiento y limpieza de los colectores.

5.3 CONEXIÓN DEL CAMPO DE COLECTORES DE LA PROPUESTA

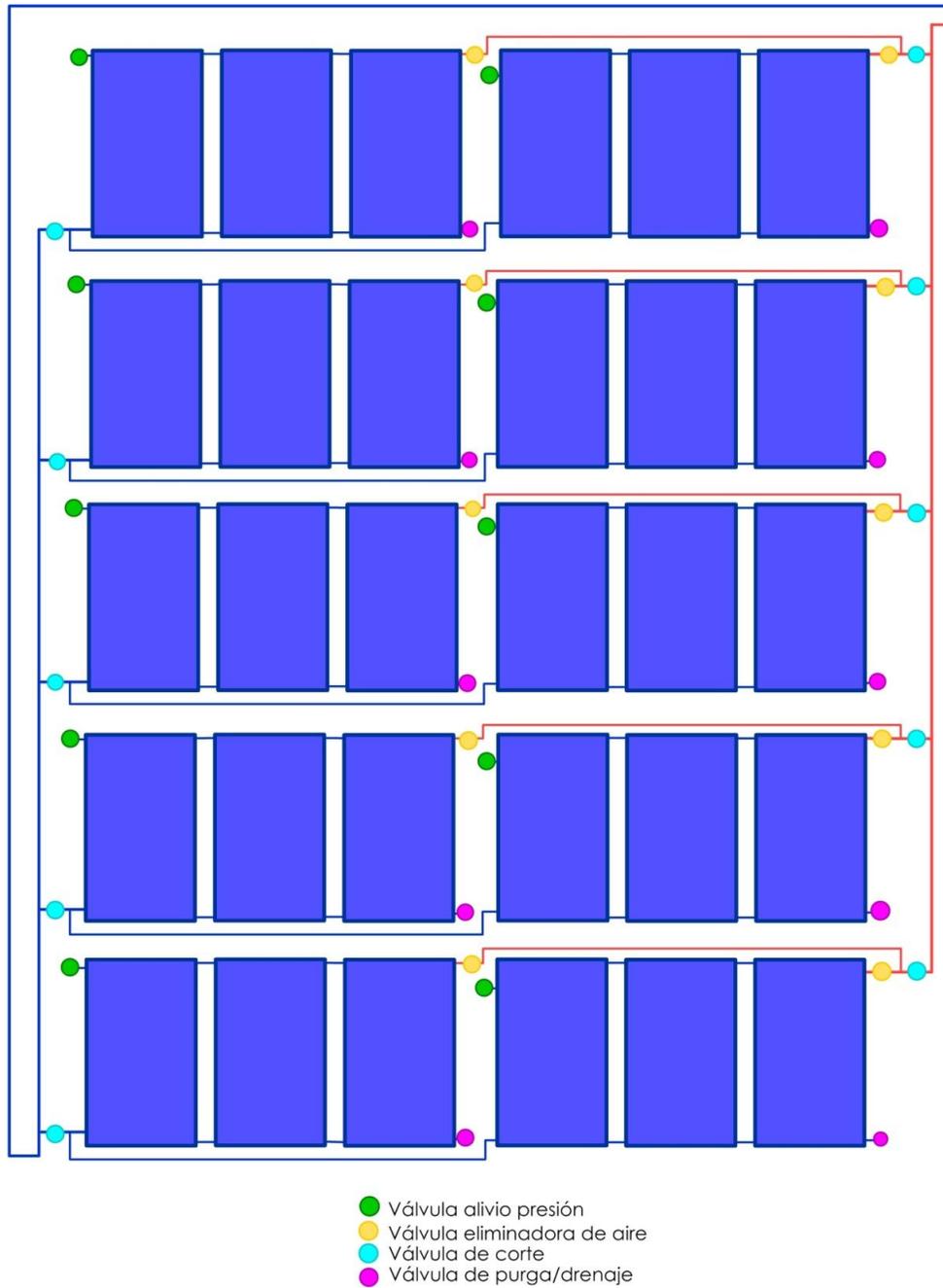
La conexión para conectar 30 colectores planos es la conexión en paralelo con retorno invertido. Los 30 colectores estarían dispuestos en 5 filas cada una de 6 colectores 3 conectados cascada y a su vez en paralelo con otros 3 colectores conectados en cascada tomando en cuenta las consideraciones de Domínguez. Ver **Figura 63**.

La conexión cuenta con todas las válvulas a las que hacen referencia las especificaciones del FIRCO sobre instalaciones solares térmicas.

5.4 DISTRIBUCIÓN DE LOS COLECTORES EN LA AZOTEA

Una porción de la azotea (264m^2) se selecciona para instalar los colectores solares, véase **Figura 64**. Anteriormente se había hecho un cálculo rápido y se encontró que la azotea cuenta con suficiente espacio para 30 colectores marca Chromagen CR-120.

El acomodo de los colectores y tanques de almacenamiento se muestra en la **Figura 65**. La distancia entre filas calculada fue de 0.71m, como hay más espacio se aumenta a 0.75m y la distancia entre colectores de una misma fila es de 10cm. El espacio total ocupado por el campo de colectores es de 114.1 m^2 y es menor al que se había delimitado contando con espacio adicional a los lados del campo para el libre tránsito.

Figura 63. Conexión propuesta entre colectores planos.

Los colectores se ubicaron en la azotea y los tanques de almacenamiento (en color naranja) en el nivel inferior a 3.05m. Cabe agregar que la ubicación del sistema existente es la misma que la de la propuesta. **Figura 65.**

Figura 64. Medidas de un espacio en la azotea para la instalación.

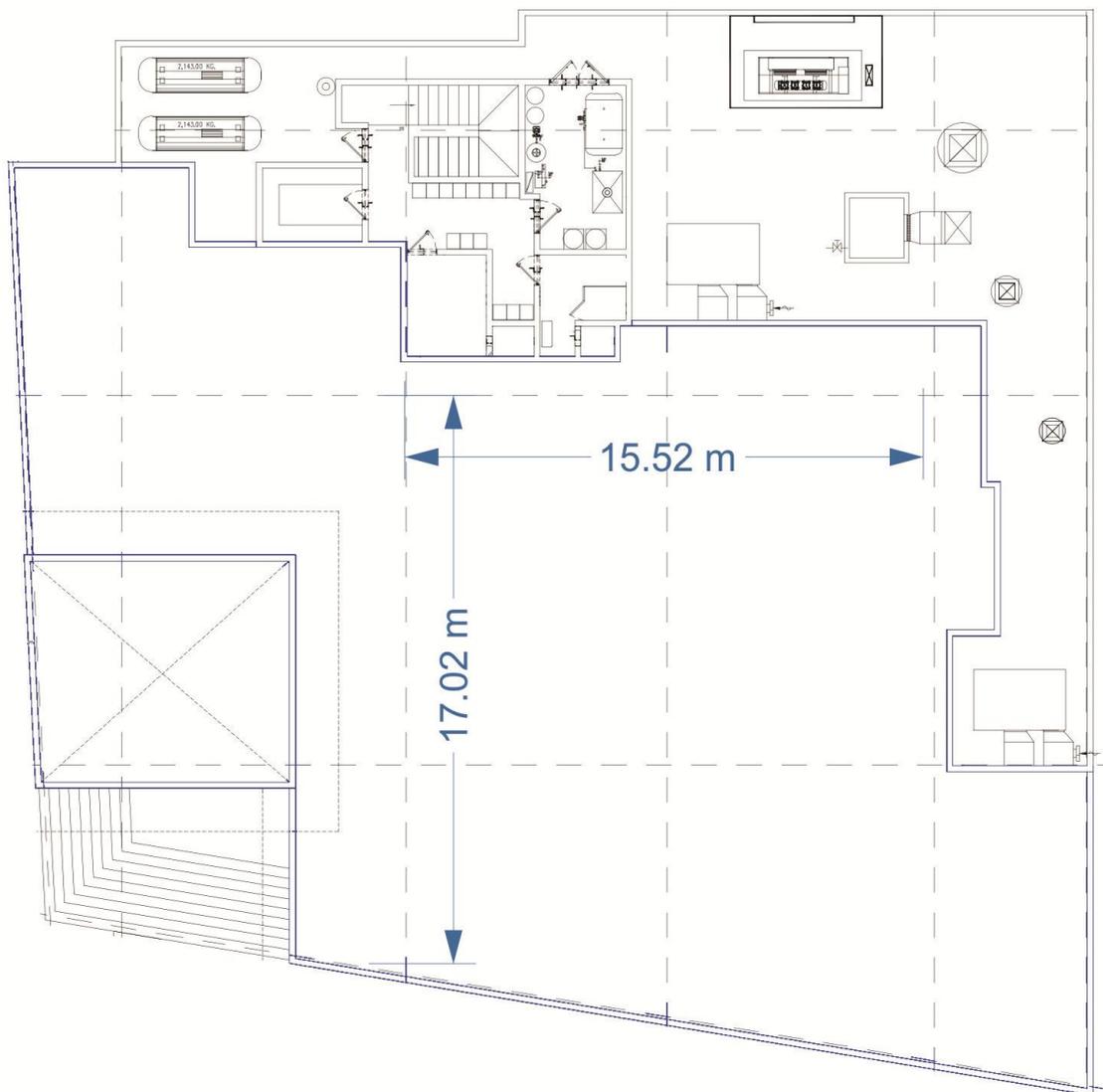
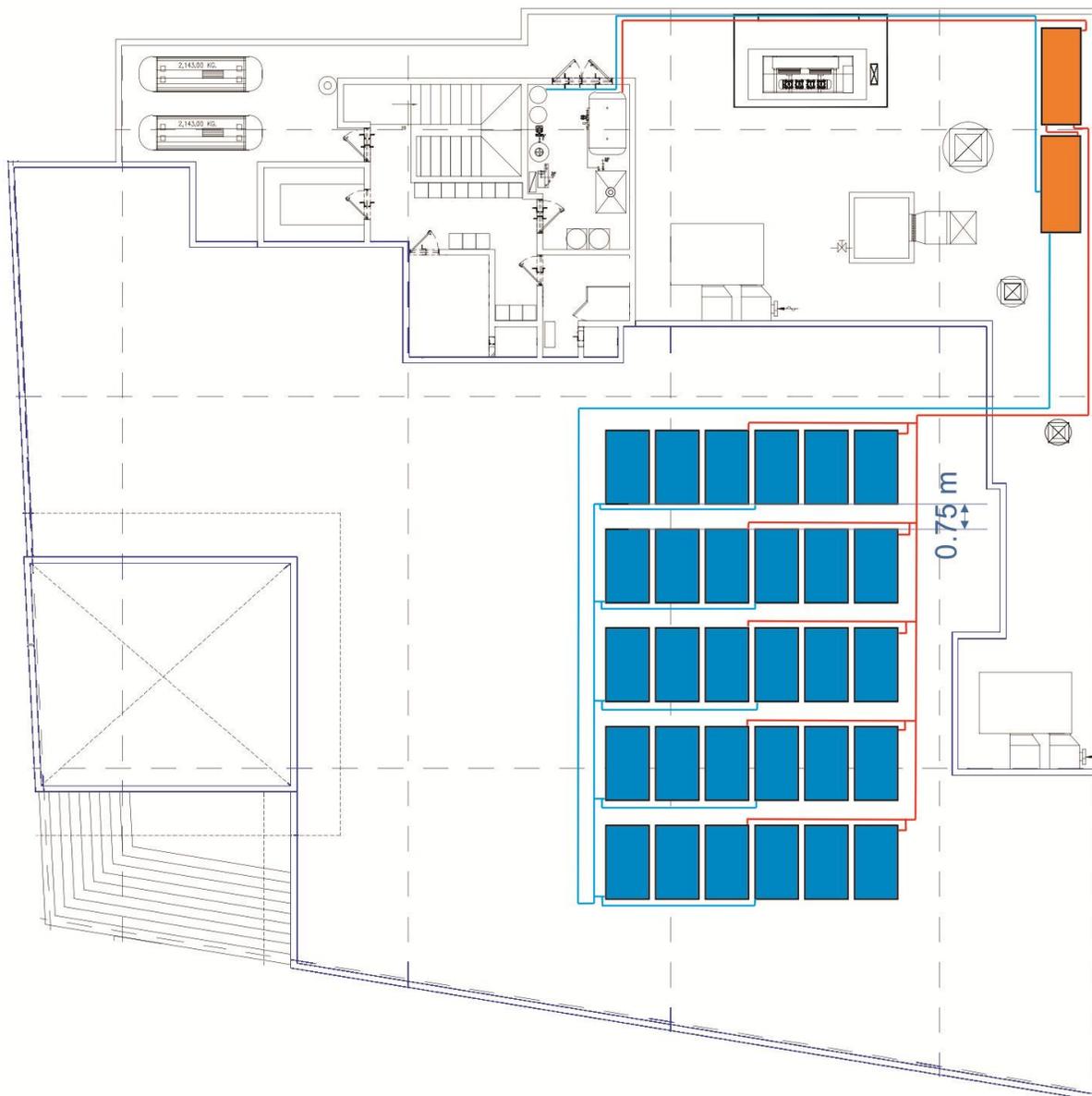


Figura 65. Distribución de los colectores y tanques de almacenamiento en la azotea del lugar.



5.5 CAUDAL DEL FLUIDO DE TRABAJO

El arreglo entre colectores debe asegurar el mismo recorrido hidráulico para todos los colectores a fin de obtener pérdidas de carga y caudales similares en cada uno de ellos.

Será necesario observar el caudal mínimo recomendado por el fabricante para evitar las zonas sin circulación y asegurar un flujo en régimen turbulento. Este valor depende de las características de cada colector y del fluido de transferencia de calor por lo que al respetar ese valor aseguramos un buen coeficiente de transferencia de calor entre el absorbedor y el fluido. Generalmente, el caudal específico de diseño se encuentra entre 40 y 80 litros por hora y metro cuadrado de superficie de captación.

Muhlia, Sánchez y Sierra sugieren que:

“El flujo por cada colector solar deberá estar de acuerdo a las especificaciones del fabricante, dentro del rango de 43.2litros/h-m² y 72litros/h-m² en colectores solares de cobre.”

El Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) y el CTE proporcionan el mismo intervalo que la anterior referencia.

En el caso del colector elegido, su ficha técnica disponible en internet no especifica el caudal recomendado por el fabricante, por lo tanto, elegiremos un caudal promedio de 60 litros/h- m² que se encuentra dentro del intervalo dado por Muhlia.

El caudal total de operación Q_o para nuestro arreglo de colectores es igual al producto del caudal específico por la superficie total de captación A_u .

$$A_u = \text{No. de colectores por fila} \times \text{Área útil por colector} \times \text{No. de filas}$$

$$Q_o = 72 \text{ litros/h- m}^2 \times 6 \times 2.6 \text{ m}^2 \times 5 = 4,680 \text{ litros/h} = 78 \text{ litros/min}$$

5.6 DIMENSIONAMIENTO DE LA TUBERÍA

Se denota como circuito primario al circuito generador de energía térmica y se compone del campo de colectores y las tuberías que los unen y como circuito secundario el encargado de transmitir la energía a los puntos de consumo.

Para el circuito primario, el CTE indica que solo se pueden usar tuberías de cobre o acero inoxidable. Para el circuito secundario y en los puntos de consumo pueden utilizarse tuberías de cobre, acero inoxidable o plásticas siempre que el fabricante indique que soportan la temperatura máxima que puede manejar el circuito y sirvan para la conducción de agua potable en condiciones higiénicas.

Proponemos el uso de tubería de cobre para el campo de colectores y tubería plástica de Polipropileno Copolímero Random (PP-R) en las líneas secundarias de agua.

Según los lineamientos del FIRCO, el diámetro de las tuberías se seleccionará de forma que la velocidad de circulación del fluido sea mayor a 0.3 m/s y menor a 2.0 m/s. El dimensionado de las tuberías se realizará de forma que la pérdida de carga unitaria en tuberías nunca sea superior a 40 mm de columna de agua por metro lineal. Según el criterio de diseñadores, recomiendan que la velocidad no exceda 1.5 m/s y de preferencia mayor a 0.5m/s.

Los parámetros que fijaremos para nuestra propuesta son:

Tubería de cobre en circuito primario y tubería plástica de PP-R en circuito secundario.

Fluido de trabajo: Agua en un circuito abierto.

Velocidad máxima: 1.5m/s

Perdida de carga: 20mm c.a por metro lineal.

En el **Figura 66** se muestran las tuberías del campo de colectores divididas en tramos o secciones e identificadas con letras. En la **Tabla 37** se anota el número de colectores alimentados por ese tramo y el caudal que llevará el tramo. La determinación del diámetro se puede llevar a cabo por medio de la grafica de pérdida de carga por rozamiento para tubería de de cobre, **Figura 67**. Conocido el caudal de cada tramo y fijada la pérdida de carga obtenemos el diámetro y verificamos que este dentro de la velocidad permitida.

Vamos a ejemplificar el caso del tramo a-b. En la **Figura 67**, se localiza en el eje de las abscisas la pérdida de carga fijada en 20mmca y trazamos una línea (roja) y en el eje de las ordenada se grafica el caudal, que para el tramo en cuestión es de 4.68m³/h, trazamos una línea (azul). Ubicamos el punto de intersección y obtenemos un diámetro interno de la tubería de 32 mm, escogemos el inmediato superior que es de 35 mm. En tablas de tubos de cobre buscamos el tubo cuya medida nominal corresponda o más se acerque al diámetro interior que en este caso es un tubo de cobre tipo L diámetro nominal de 1 ½ pulgadas y verificamos que el valor de la velocidad este entre 0.75 y

1m/s. El mismo procedimiento se realiza para los otros tramos. Los resultados del diámetro obtenido se presentan en la **Tabla 37**.

Figura 66. Tramos de los que se compone el campo de colectores

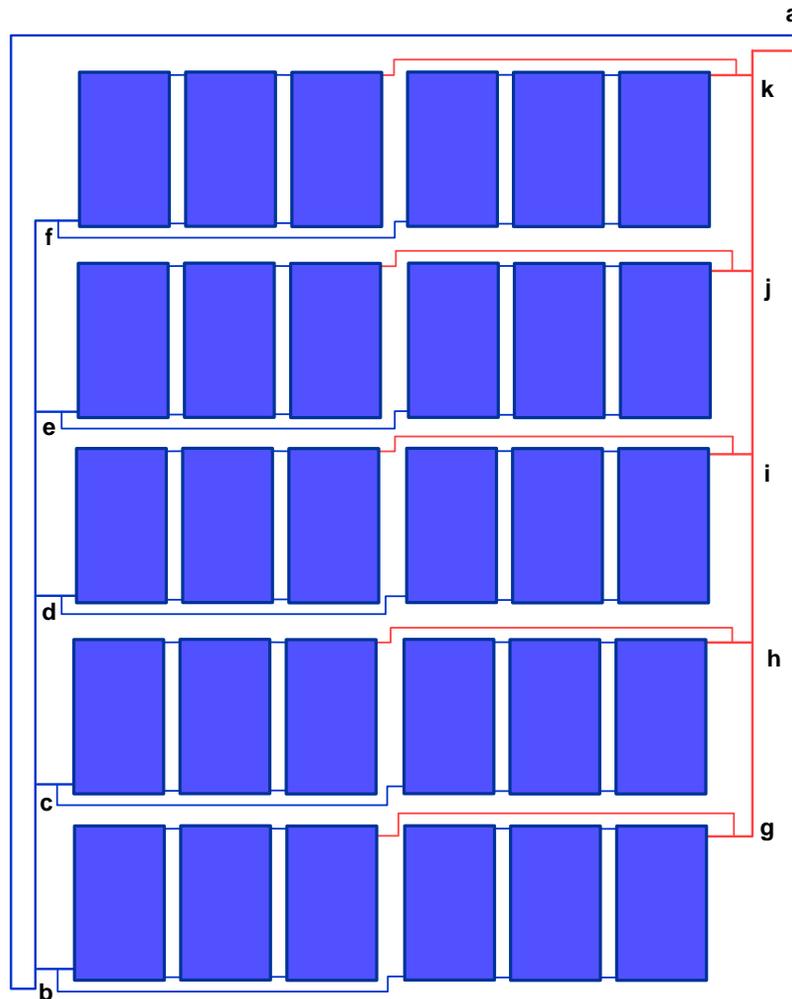
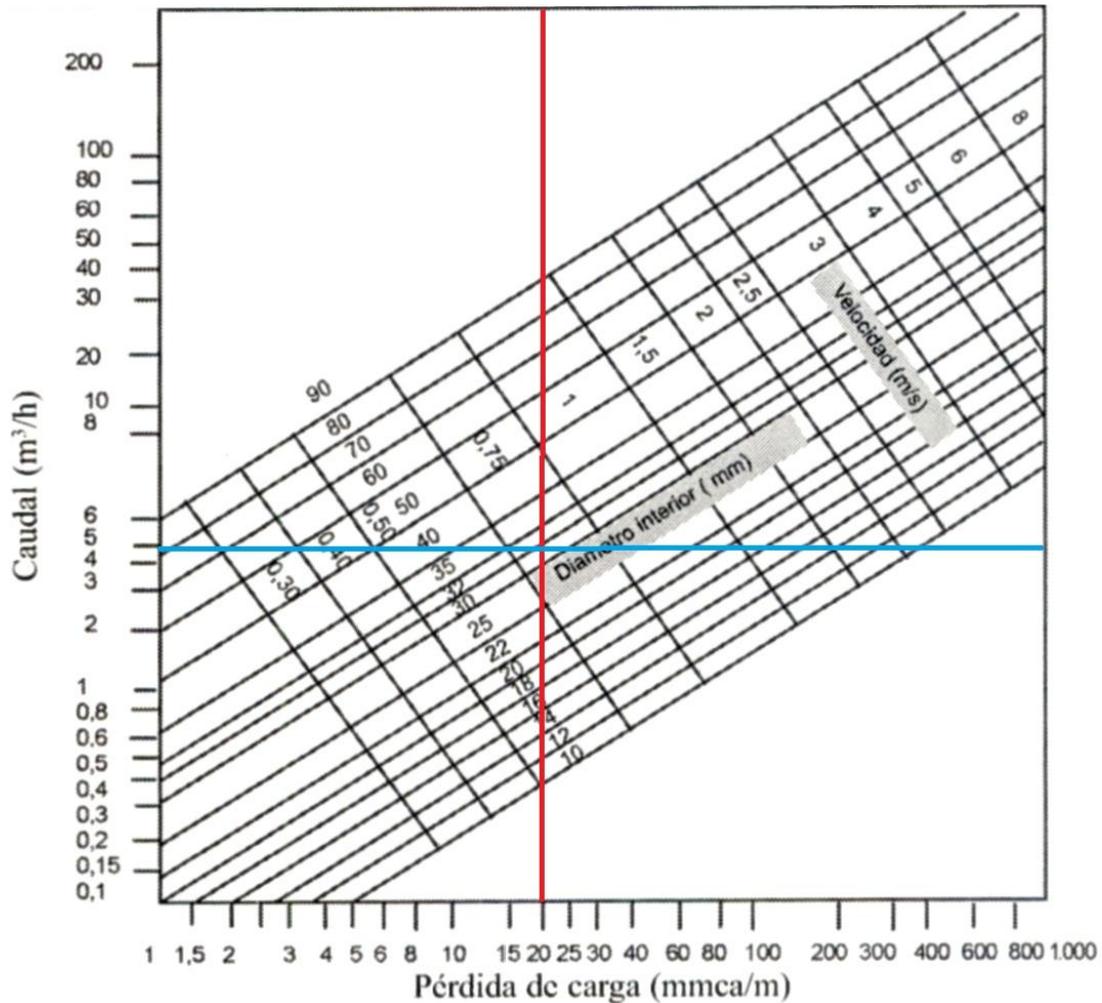


Tabla 37. Resumen del caudal por tramo y diámetros

| Tramo ida | Tramo regreso | N. de colectores | Caudal específico (litros/h-m2) | Área (m2) | Caudal tramo (litros/h) | Caudal tramo (litros/min) | Caudal tramo (m3/h) |
|-----------------------|---------------|------------------|---------------------------------|-----------|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| a-b | k-l | 30 | 60 | 2.60 | 4,680 | 78.00 | 4.68 |
| b-c | j-k | 24 | 60 | 2.60 | 3,744 | 62.40 | 3.74 |
| c-d | i-j | 18 | 60 | 2.60 | 2,808 | 46.80 | 2.81 |
| d-e | h-i | 12 | 60 | 2.60 | 1,872 | 31.20 | 1.87 |
| e-f | g-h | 6 | 60 | 2.60 | 936 | 15.60 | 0.94 |
| Líneas a 3 colectores | | 3 | 60 | 2.60 | 468 | 7.80 | 0.47 |

Figura 67. Pérdida de carga en mm c.a. por m para tubería de cobre.

Ya que se ha determinado el diámetro de la tubería, se puede calcular la velocidad del agua y las pérdidas de carga mediante las siguientes fórmulas:

$$v = \frac{0.354 \times Q}{D^2} \quad (5.1)$$

Donde

v: velocidad (m/s)

Q: caudal (litros/hora)

D: diámetro interior de la tubería (mm)

$$P = \frac{6.05 \times 10^5 \times Q^{1.85}}{C^{1.85} \times D^{4.87}} \quad (5.2)$$

La ecuación 5.2 se utiliza para determinar las pérdidas de carga por fricción (fórmula de Hazen-Williams) donde:

- P: pérdida de carga en el tubo (bar/m)
 Q: caudal que pasa por el tubo (litros/min)
 D: diámetro interior medio del tubo (mm)
 C: constante, para el tubo de cobre 150

Otra fórmula para determinar las pérdidas de carga relacionando el caudal y el diámetro de la tubería es la fórmula Flamant, ecuación 5.3, para tuberías con diámetros menores a 50mm y tuberías lisas de cobre de agua caliente.

$$P = \frac{378 \times Q^{1.75}}{D^{4.75}} \quad (5.3)$$

Donde

- P: pérdida de carga en el tubo (mmca/m)
 Q: caudal que pasa por el tubo (litros/min)
 D: diámetro interior medio del tubo (mm)
 C: constante, para el tubo de cobre 150

La **Tabla 38** presenta para cada tramo de tubería, el diámetro la velocidad y las pérdidas de carga unitaria con ambas fórmulas.

Tabla 38. Resumen de los diámetros, velocidades y pérdidas de carga para cada tramo.

| Tramo ida | Tramo regreso | N. de colectores | Diámetro (plg) | Diámetro interior (mm) | Velocidad (m/s) | Perdidas carga H-W (mmca / m) | Perdidas carga F (mmca / m) |
|-----------------------|---------------|------------------|----------------|------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| a-b | k-l | 30 | 1 1/2 | 38.227 | 1.133 | 36.20 | 30.49 |
| b-c | j-k | 24 | 1 1/2 | 38.227 | 0.906 | 23.96 | 20.63 |
| c-d | i-j | 18 | 1 1/4 | 32.131 | 0.962 | 32.79 | 28.46 |
| d-e | h-i | 12 | 1 | 26.035 | 0.977 | 43.14 | 38.03 |
| e-f | g-h | 6 | 3/4 | 19.939 | 0.833 | 43.87 | 40.15 |
| Líneas a 3 colectores | | 3 | 3/4 | 19.939 | 0.416 | 12.17 | 11.94 |

La pérdida de carga calculada es unitaria para cada tramo. No es objetivo de este trabajo diseñar la tubería ni la cantidad de accesorios del sistema sin embargo en un proyecto debe calcularse la pérdida de carga total.

La pérdida de carga total es la suma de la pérdida que se produce en los siguientes elementos:

- Colectores
- Tubería

- Accesorios (válvulas, caudalímetros, filtros, etc.)
- Intercambiadores de calor (en caso de tener este equipo).

En cuanto a la bomba, su función es la de impulsar el fluido dentro del circuito suministrando el caudal de diseño y cubriendo las pérdidas de carga en el conjunto de la instalación.

Una vez conocido el caudal global del circuito y la pérdida de carga total de la instalación (y la altura que se debe vencer) se selecciona una bomba adecuada cuya curva característica este inmediatamente por encima del punto de trabajo.

Según el CTE, en instalaciones mayores a 50m² de captación solar (de acuerdo a los criterios de la NADF, 75m²) se deberán instalar dos bombas de circulación idénticas en paralelo dejando una de reserva, tanto en el circuito primario como en el secundario con el objeto de aumentar la disponibilidad del sistema en caso de falla de alguna. Estas deberán alternarse de manera manual o automática.

En sistemas cerrados se debe de proteger el sistema con un tanque de expansión. Otra consideración importante es que todas las tuberías de ida y retorno desde el campo de colectores hasta el tanque de almacenamiento deben ir aisladas térmicas.

5.7 TANQUE DE ALMACENAMIENTO

La propuesta para el almacenamiento de agua en caso del restaurante es:

Tabla 39. Propuesta para el volumen de acumulación del caso de estudio.

| | |
|------------------------------------|------------------------|
| Volumen total (litros) | 6,000 |
| No. de tanques | 2 |
| Volumen por tanque (litros) | 3,000 |
| Conexión entre tanques | Serie invertida |

El espacio disponible era tal que un tanque de 6,000 litros no hubiera cabido por lo que se decidió poner 2 tanques de 3,000 litros cada uno.

5.8 EVALUACIÓN DE AHORROS DE LA PROPUESTA

La propuesta de instalar 30 colectores solares marca Chromagen modelo CR-120 y dos tanques de almacenamiento cada uno de 3,000 litros se obtuvo considerando el criterio de que el 30% del total del agua consumida en el restaurante se destina a servicios de agua caliente.

Tabla 40. Resumen de la propuesta

| Propuesta 1 | Descripción |
|--------------------------|----------------------------|
| Tipo | Circuito directo o abierto |
| Fluido de trabajo | Agua |
| Circulación | Forzada |
| Acumulación solar | Centralizada |
| No de captadores | 30 |
| Tipo de colector | Plano |
| Marca y modelo | Chromagen CR-120 |
| Arreglo entre colectores | Paralelo |
| Colectores por banco | 3 |
| Banco por fila | 2 |
| Filas por campo | 5 |
| Distancia entre filas | 0.75m |
| Caudal total de diseño | 46.8 litros/min |
| No. de Termotanques | 2 |
| Capacidad termotanques | 3,000 litros cada uno |

En la **Tabla 41** se presenta la información necesaria para calcular el ahorro de combustible de la propuesta:

- 1) Mes del año
- 2) Consumo total de gas LP del restaurante en litros por mes.
- 3) Estimación del volumen de agua caliente (en litros).
- 4) La cantidad de energía requerida (kWh/mes) para calentar el volumen de agua de la columna 3 desde su temperatura inicial hasta 60°C.
- 5) Consumo de gas LP equivalente a la energía requerida por el agua (columna 4) con una eficiencia del calentador de 83% y un poder calorífico del gas LP de 26.606 MJ/lit. Este es el consumo promedio mensual de gas LP para calentar agua antes de la puesta en marcha del sistema solar.
- 6) Energía aportada por el campo solar en kWh
- 7) Porcentaje de la energía aportada por el campo solar con respecto a la demanda total de energía para calentar agua.
- 8) Energía que seguirá suministrándose por medio convencional, o sea con el calentador de gas una vez que el campo solar este operando.
- 9) Equivalente en litros del consumo de gas LP con campo solar.

10) Ahorro de gas LP en relación al total del consumo de gas LP en el restaurante.

De la **Tabla 41** se destaca que el ahorro de gas LP (de la fracción que se usa para calentar agua) es del 71.75% anual con el campo de colectores en operación mientras que en relación al consumo global representa en promedio el 12.13%.

Tabla 41. Evaluación de ahorros de la propuesta 1.

| Mes | Consumo total de GAS LP (litros/mes) | Estimación volumen agua caliente (litros/día) | Energía requerida calentar agua (kWh/mes) | Equivalente en gas LP (litros/mes) | Energía aportada por el campo solar (kWh/mes) | % de aporte solar | Energía restante (kWh/mes) para calentar agua | Consumo gas LP (litros) con colector solar | % Ahorro de gas LP respecto al total |
|-------|--------------------------------------|---|---|------------------------------------|---|-------------------|---|--|--------------------------------------|
| Ene | 9,683 | 6,263 | 10,335 | 1,685 | 6,952 | 67.27 | 3,382 | 551 | 11.71 |
| Feb | 8,685 | 6,297 | 9,411 | 1,534 | 7,170 | 76.19 | 2,241 | 365 | 13.46 |
| Mar | 9,655 | 5,999 | 9,792 | 1,596 | 8,467 | 86.47 | 1,325 | 216 | 14.30 |
| Abr | 9,071 | 6,334 | 9,820 | 1,601 | 7,520 | 76.57 | 2,301 | 375 | 13.51 |
| May | 9,428 | 5,760 | 9,073 | 1,479 | 7,252 | 79.93 | 1,821 | 297 | 12.54 |
| Jun | 8,220 | 6,629 | 10,047 | 1,638 | 6,211 | 61.82 | 3,836 | 625 | 12.32 |
| Jul | 8,735 | 5,853 | 9,184 | 1,497 | 6,416 | 69.86 | 2,768 | 451 | 11.97 |
| Ago | 8,589 | 5,606 | 8,889 | 1,449 | 6,530 | 73.45 | 2,360 | 385 | 12.39 |
| Sep | 8,736 | 5,369 | 8,231 | 1,342 | 6,003 | 72.93 | 2,228 | 363 | 11.20 |
| Oct | 8,837 | 5,708 | 9,085 | 1,481 | 6,559 | 72.20 | 2,526 | 412 | 12.10 |
| Nov | 9,966 | 5,853 | 9,076 | 1,480 | 6,808 | 75.02 | 2,267 | 370 | 11.14 |
| Dic | 11,299 | 7,396 | 12,050 | 1,964 | 6,618 | 54.92 | 5,432 | 886 | 9.55 |
| TOTAL | 110,903 | 73,067 | 114,993 | 18,746 | 82,506 | 71.75 | 32487 | 5,296 | 12.13 |

Para la evaluación económica se tomaron las siguientes consideraciones:

- 1.- Los ahorros de combustible derivados de la instalación solar se tomaron como ingresos.
- 2.- Se establece un costo anual por operación y mantenimiento del 1.8% de la inversión total del sistema que además incluye el consumo de energía eléctrica que tendrán las bombas y el sistema de control.
- 3.- La tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR) se tomó de la referencia "Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua (CSA) en el Sector Doméstico Mexicano" de la CONUEE, que da una tasa de descuento del 15%.
- 4.- El sistema convencional de calentamiento de agua continua en operación y como respaldo. De hecho, el sistema solar opera como sistema de precalentamiento de agua.
- 5.- La inversión inicial está compuesta por los siguientes conceptos:
 - a) Colectores solares
 - b) Instalación y maniobras.

c) Termotanques

d) Sistema de bombeo

e) Sistema de automatización

6.- La inversión inicial se hace al inicio del periodo y en una sola exhibición. El costo se estimó de acuerdo a la cotización presentada por proveedor del proyecto que actualmente se encuentra en el restaurante.

7.- El periodo de evaluación del proyecto es por 10 años, que normalmente es el periodo de garantía otorgado por el fabricante, sin embargo el tiempo de vida de los equipos es mayor.

8.- El incremento anual en el precio del gas LP se toma del 10%, en base a los incrementos mensuales nacionales ponderados graficados en la **Figura 20**.

9.- Puede existir un valor de salvamento de los equipos al final del periodo pero no se considero en esta evaluación.

10.- Los precios considerados son antes de IVA.

Se calculó el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa interna de rendimiento (TIR) para este caso. Conforme a estos parámetros, la inversión resulta aceptable toda vez que el VPN es mayor a cero y la TIR (22%) es mayor a la TREMA considerada, los resultados se presentan en la **Tabla 42**.

Tabla 42. Evaluación económica de la propuesta.

| DATOS | | Unidades |
|--|-------------------|--------------------|
| Tipo de colector | Plano | |
| No captadores | 30 | |
| Presion de operación | 2 | kg/cm ² |
| Area unitaria | 2.60 | m ² |
| Horas diarias de op. Restaurante | 17 | hrs/dia |
| Dias de op. al año | 365 | dias/año |
| Consumo total gas restaurante | 110,903.44 | Lt/año |
| % agua del total para usos agua caliente | 30 | % |
| Temp. Entrada agua | 15.45 | C |
| Temp. Salida agua | 60 | C |
| Eficiencia teórica promedio colector solar | 58.64 | % |
| Eficiencia calentador gas | 0.83 | |
| Energía anual requerida calentar agua | 114,992.70 | MWh año |
| Consumo anual gas LP calentar agua | 18,746.35 | Lt/año |
| Gasto anual gas LP calentar agua | 115,548.63 | \$/año |
| % del total de gas para calentar agua | 16.9 | % |
| Tiempo prom. operación colectores | 7 | hrs/dia |
| Aumento anual precio gas LP | 10% | |
| Precio base gas LP | 6.16 | \$/lt |
| Dias de op. Por año | 365.00 | dias/año |
| PCI combustible | 26.61 | MJ/lt |
| Ahorro combustible fin año | 13,450.23 | lt/año |
| % con relación al gas para calentar agua | 71.75 | % |
| Ahorro combustible fin año | 82,904.42 | \$/año |
| Tiempo de vida | 10.00 | años |
| Inversion inicial | 437,184 | \$ |
| Porcentaje de Inv. Ini para op. y mantto | 1.80% | % |
| Costo anual op. Y mantto | 7,869 | \$/año |
| Ahorro anual total | 75,035 | \$/año |
| Incremento anual costo op. y mantto | 4.00% | % |
| RESULTADOS | | |
| TREMA | 0.15 | |
| Valor presente del ahorro | 549,669.03 | \$ |
| Valor Presente Neto | 112,485.53 | \$ |
| Relacion beneficio costo | 1.26 | |
| Periodo de recuperacion | 6.53 | años |
| TIR | 0.2250 | |

5.9 PROPUESTA CON COLECTORES SOLARES HEAT PIPE

La propuesta que se hizo con colectores planos considerando el criterio de que un 30% del consumo de agua es caliente se vuelve a realizar pero en esta ocasión los paneles propuestos son colectores "heat pipe". En la **Tabla 43** se presenta un resumen de la demanda de agua caliente y los requerimientos de energía con el criterio elegido.

Tabla 43. Resumen de la demanda de agua caliente, energía total requerida y el 70% de la misma.

| Mes | Dias mes | T in agua (C) | Litros / día | (kWh/mes) | (kWh/mes) al 70% |
|-------------------|----------|-----------------|--------------|--------------|------------------|
| Ene | 31 | 14.2 | 6,263 | 10,335 | 7,234 |
| Feb | 28 | 14.0 | 6,297 | 9,411 | 6,588 |
| Mar | 31 | 14.7 | 5,999 | 9,792 | 6,855 |
| Abr | 30 | 15.5 | 6,334 | 9,820 | 6,874 |
| May | 31 | 16.2 | 5,760 | 9,073 | 6,351 |
| Jun | 30 | 16.5 | 6,629 | 10,047 | 7,033 |
| Jul | 31 | 16.4 | 5,853 | 9,184 | 6,429 |
| Ago | 31 | 15.9 | 5,606 | 8,889 | 6,223 |
| Sep | 30 | 16.0 | 5,369 | 8,231 | 5,762 |
| Oct | 31 | 15.8 | 5,708 | 9,085 | 6,359 |
| Nov | 30 | 15.5 | 5,853 | 9,076 | 6,353 |
| Dic | 31 | 14.7 | 7,396 | 12,050 | 8,435 |
| Promedio | | 15.5 | 6,089 | 9,583 | 6,708 |
| Total anual (kWh) | | | | 114,993 | 80,495 |
| Total anual (kJ) | | | | 413,973,720 | 289,781,604 |

Al igual que los colectores solares planos, la orientación óptima es hacia el sur geográfico, con un ángulo acimutal de cero grados, tratando de mantener, dentro de lo posible, la alineación con los ejes principales de la edificación siempre y cuando esta se encuentre orientada adecuadamente.

De acuerdo con Muhlia se debe tener en cuenta que la eficiencia de los colectores solares es mejor en la tarde debido a que la temperatura ambiente es mayor que en la mañana, por lo que si se debe de decidir entre una orientación S-SE contra una S-SO se preferirá la S-SO, agrega que si la inclinación no es mayor a 50, las variaciones en la orientación de -50 a $+50$ respecto del Sur geográfico, la disminución en la irradiación global anual no va más allá del 8%. Tomando esto en consideración, colectores orientados dentro del rango (Sur ± 50), no causan disminuciones apreciables en la irradiación.

Respecto a la inclinación óptima se comentó en secciones pasadas que depende del periodo de utilización, como el consumo de agua es continuo y constante a lo largo del

año aunque presenta un pico en el mes de diciembre escogeremos un ángulo de inclinación igual a 20 grados como en el caso de los colectores planos.

5.9.1 CARACTERÍSTICAS DEL COLECTOR SOLAR ELEGIDO

El colector solar de tubos heat pipe seleccionado es del fabricante Changzhou He Jia Solar Energy Co., Ltd. Modelo HCA-58/30. En el APÉNDICE 4 se puede encontrar la ficha técnica de este colector solar. En la **Tabla 44** y **45** se presentan algunos datos de este calentador solar:

Tabla 44. Características del colector solar He Jia HCA-58/30

| CARACTERÍSTICAS DEL COLECTOR SOLAR | |
|---|---|
| Tipo: | Colector solar de tubos al vacío HEAT PIPE. |
| Número de tubos: | 30 de vidrio borosilicato, 1.6mm de espesor con recubrimiento Al-N/Al |
| Heat pipe: | Tubo de calor de cobre con aletas de aluminio |
| Aislamiento: | Fibra de vidrio. |
| Carcasa: | Aluminio |

Tabla 45. Dimensiones del colector solar He Jia HCA-58/30

| Dimensiones y peso | |
|------------------------------------|------------|
| Largo total (m) | 1.990 |
| Ancho total (m) | 2.105 |
| Espesor (m) | 0.153 |
| Area total (m ²) | 4.189 |
| Area de apertura (m ²) | 2.834 |
| Peso vacío (kg) | 95 |
| Capacidad de fluido (l) | 1.7 |
| Presión máxima de trabajo (bar) | 6 |
| Rango de caudal (l/hr) | 108 - 1200 |
| Caudal nominal (l/hr) | 180 |

La ecuación que describe la curva característica del rendimiento de un colector se expresa linealmente pero dependiendo de las referencias también se puede expresar con una ecuación cuadrática de la forma siguiente:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{G} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (5.4)$$

| SÍMBOLO | DESCRIPCIÓN | UNIDAD |
|----------|--|-------------------|
| η | Rendimiento del captador | % |
| η_0 | Rendimiento óptico del captador | % |
| a_1 | Coefficiente lineal de pérdidas térmicas | $W/m^2 \cdot K$ |
| a_2 | Coefficiente cuadrático de pérdidas térmicas | $W/m^2 \cdot K^2$ |
| T_m | Temperatura media del fluido de trabajo en el absorbedor | $^{\circ}C$ |
| T_a | Temperatura ambiente | $W/m^2 \cdot K$ |
| G | Irradiancia | W/m^2 |

Los valores de la ecuación de eficiencia se obtuvieron de la ficha técnica del colector, que corresponden a la ecuación de eficiencia de la forma cuadrática y que fueron determinados por el Instituto SPF de Suiza con base a pruebas según la norma europea EN12975:2006 y referenciados al área de apertura.

$$\eta_0 \quad 0.656 \quad \%$$

$$a_1 \quad 1.40 \quad W/m^2 \cdot K$$

$$a_2 \quad 0.0123 \quad W/m^2 \cdot K^2$$

5.9.2 ÁREA DE CAPTACIÓN CON COLECTORES HEAT PIPE

La obtención del área de captación se llevó a cabo por el mismo procedimiento que para los colectores planos utilizando los mismos datos de radiación solar sobre una superficie inclinada a 20 grados.

A partir de la ecuación 5.4 se calcula la eficiencia promedio del colector, **Tabla 46** y una vez conocida, se calcula el área de captación con la ecuación 5.5:

$$A = \frac{Q_u}{\eta \cdot H_T} \quad (5.5)$$

Donde Q_u es la contribución solar del 70% que queremos obtener (**Tabla 43**) y H_T es la irradiación mensual promedio diaria sobre una superficie inclinada 20 grados y η la eficiencia promedio del colector (**Tabla 46**).

El área que se calcula por medio de la ecuación 5.5 se divide entre el área de apertura del colector y de esta forma se obtiene el número de colectores. Siguiendo el mismo criterio que para el caso de los colectores planos, adicionamos un 10% de área considerando pérdidas térmicas por almacenamiento y conducción en tuberías de acuerdo al criterio de instaladores. Los resultados se presentan en la **Tabla 47**.

Tabla 46. Eficiencia promedio del colector solar heat pipe

| Mes | Ta (°C) | Tin agua (°C) | Treq (°C) | Tm (°C) | Delta T (°C) | Horas de insolación | Irradiancia prom (W/m ²) | Delta T / Iprom | Eficiencia promedio |
|-----|---------|---------------|-----------|---------|--------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------|---------------------|
| Ene | 13.3 | 14.2 | 60 | 37.1 | 23.8 | 7.87 | 702.19 | 0.034 | 0.599 |
| Feb | 14.8 | 14.0 | 60 | 37.0 | 22.2 | 8.13 | 748.78 | 0.030 | 0.606 |
| Mar | 16.8 | 14.7 | 60 | 37.3 | 20.5 | 8.30 | 764.38 | 0.027 | 0.612 |
| Abr | 18.6 | 15.5 | 60 | 37.7 | 19.1 | 7.52 | 763.67 | 0.025 | 0.615 |
| May | 19.2 | 16.2 | 60 | 38.1 | 18.9 | 7.38 | 730.56 | 0.026 | 0.614 |
| Jun | 19 | 16.5 | 60 | 38.2 | 19.2 | 6.38 | 747.46 | 0.026 | 0.614 |
| Jul | 17.9 | 16.4 | 60 | 38.2 | 20.3 | 6.06 | 786.69 | 0.026 | 0.613 |
| Ago | 18 | 15.9 | 60 | 38.0 | 20.0 | 5.79 | 826.80 | 0.024 | 0.616 |
| Sep | 17.5 | 16.0 | 60 | 38.0 | 20.5 | 5.47 | 833.97 | 0.025 | 0.615 |
| Oct | 16.8 | 15.8 | 60 | 37.9 | 21.1 | 6.45 | 766.65 | 0.028 | 0.610 |
| Nov | 15 | 15.5 | 60 | 37.7 | 22.7 | 7.39 | 737.80 | 0.031 | 0.604 |
| Dic | 13.6 | 14.7 | 60 | 37.4 | 23.8 | 7.54 | 698.34 | 0.034 | 0.598 |

Tabla 47. Cálculo del área de captación solar

| Mes | N. de días | Área (m ²) | +10% |
|--------------------------|------------|------------------------|--------------|
| Ene | 31 | 70.54 | 77.59 |
| Feb | 28 | 63.71 | 70.08 |
| Mar | 31 | 56.96 | 62.65 |
| Abr | 30 | 64.89 | 71.38 |
| May | 31 | 61.88 | 68.07 |
| Jun | 30 | 80.09 | 88.10 |
| Jul | 31 | 70.89 | 77.98 |
| Ago | 31 | 68.00 | 74.80 |
| Sep | 30 | 68.36 | 75.20 |
| Oct | 31 | 67.99 | 74.79 |
| Nov | 30 | 64.31 | 70.74 |
| Dic | 31 | 86.31 | 94.94 |
| Promedio | | 68.66 | 75.53 |
| Promedio ÷ área colector | | 24.23 | 26.65 |
| No. de colectores | | 24.00 | 26.00 |

5.9.3 CONTRIBUCIÓN SOLAR

El número de colectores heat pipe es de 24 unidades y adicionando un 10% de área por cuestión de pérdidas serían 26 unidades. Para acomodar 26 colectores se tendrían que hacer 4 filas de 5 y una fila de 6 pero como se prefieren filas con la misma cantidad de colectores se escogen 25 unidades para lograr 5 filas con 5.

Como el número total de colectores es de 25 y considerando que ya incluyan el 10% por perdidas, se considerará un aporte solar dado por 23 colectores. La contribución solar de los 23 paneles en kWh/mes y en porcentaje se presenta en la **Tabla 48** y en las **Figuras 68 y 69**.

Tabla 48. Aporte solar correspondiente a 23 colectores heat pipe en kWh/mes y en porcentaje.

| Mes | N. de días | Demanda | Aporte solar | % de aporte solar |
|-------------|------------|---------|--------------|-------------------|
| | | kWh/mes | kWh/mes | |
| Ene | 31 | 10,335 | 6,685 | 65 |
| Feb | 28 | 9,411 | 6,740 | 72 |
| Mar | 31 | 9,792 | 7,845 | 80 |
| Abr | 30 | 9,820 | 6,905 | 70 |
| May | 31 | 9,073 | 6,689 | 74 |
| Jun | 30 | 10,047 | 5,724 | 57 |
| Jul | 31 | 9,184 | 5,911 | 64 |
| Ago | 31 | 8,889 | 5,964 | 67 |
| Sep | 30 | 8,231 | 5,494 | 67 |
| Oct | 31 | 9,085 | 6,096 | 67 |
| Nov | 30 | 9,076 | 6,439 | 71 |
| Dic | 31 | 12,050 | 6,370 | 53 |
| TOTAL ANUAL | | 114993 | 76862 | 67 |

5.9.4 VOLUMEN DEL DEPÓSITO DE ACUMULACIÓN

Para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento se considera el mismo criterio que en los colectores planos, 75litros/m².

El volumen de acumulación, en este caso será de:

Tabla 49. Volumen del termotanque para el caso de colectores heat pipe.

| Límites | Valor (l/m ²) | Volumen (litros) |
|-----------------|---------------------------|------------------|
| Menor | 50 | 3543 |
| Mayor | 100 | 7085 |
| Promedio | 75 | 5314 |
| Volumen elegido | | 5500 |

El tanque de almacenamiento tendrá una capacidad de 5,500 litros o dos tanques de 2,250 litros cada uno.

Figura 68. Aporte solar en kWh/mes para la propuesta con tubos heat pipe

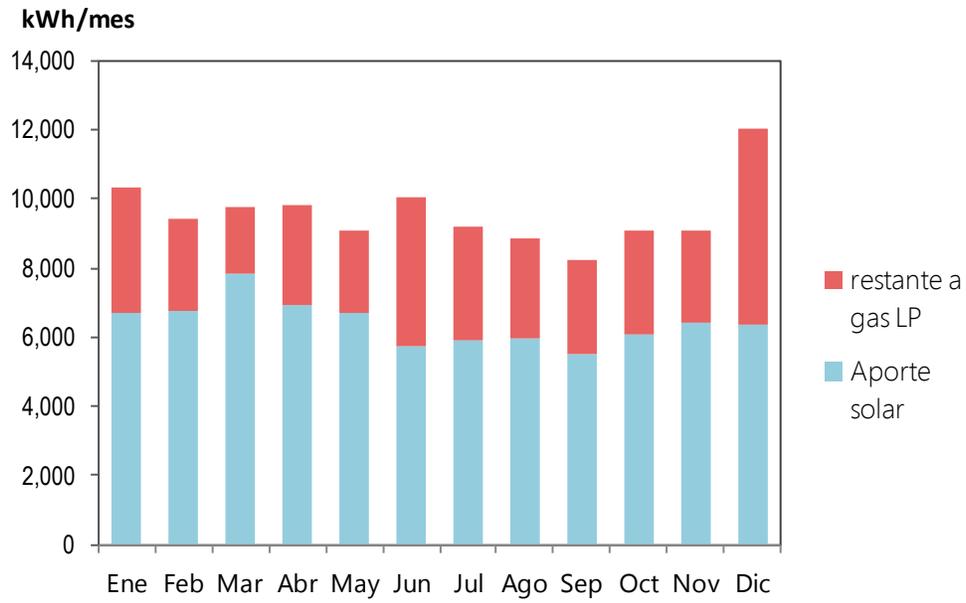
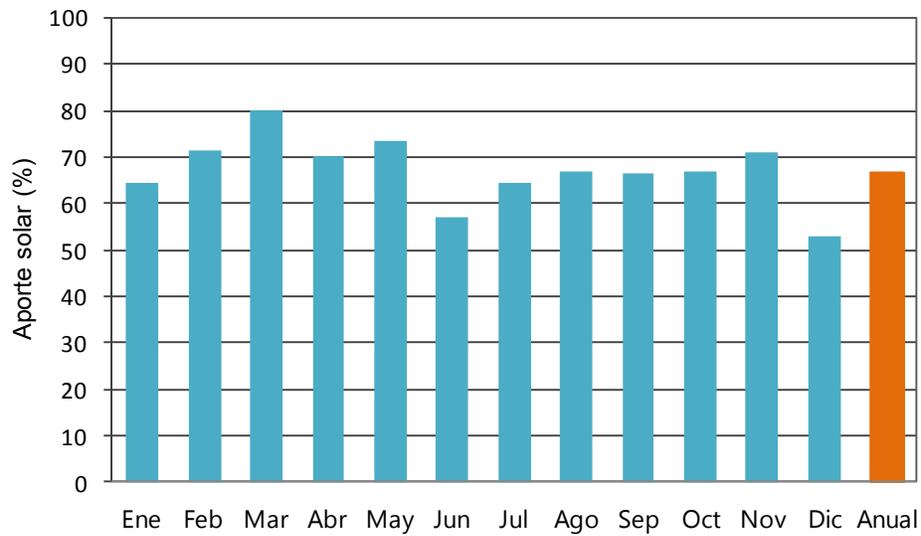


Figura 69. Aporte solar (%) para la propuesta con tubos heat pipe



5.9.5 CONEXIÓN ENTRE COLECTORES

Los colectores solares estarían dispuestos en 5 filas de 5 colectores cada una, con una conexión en paralelo entre filas de colectores, como se muestra en la **Figura 70**.

Figura 70. Conexión propuesta de los colectores heat pipe



Al igual que un campo de colectores solares planos, se deben instalar todos los elementos de seguridad en colectores y tanques como son las válvulas para el buen funcionamiento del campo solar.

El resumen de la propuesta con colectores heat pipe se ve en la **Tabla 50**.

Tabla 50. Resumen de la propuesta con colectores heat pipe

| Propuesta 2 | Descripción |
|--------------------------|----------------------------|
| Tipo | Circuito directo o abierto |
| Fluido de trabajo | Agua |
| Circulacion | Forzada |
| Acumulacion solar | Centralizada |
| No de captadores | 25 |
| Tipo de colector | Tubular heat pipe |
| Marca y modelo | HeJia HCA/58/30 |
| Arreglo entre colectores | Mixto |
| Colectores por banco | 5 |
| Banco por fila | 1 |
| Filas por campo | 5 |
| Distancia entre filas | 0.65m |
| No. de Termotanques | 2 |
| Capacidad termotanques | 2,250 |

5.9.6 EVALUACIÓN DE AHORROS DE LA PROPUESTA CON COLECTORES HEAT PIPE

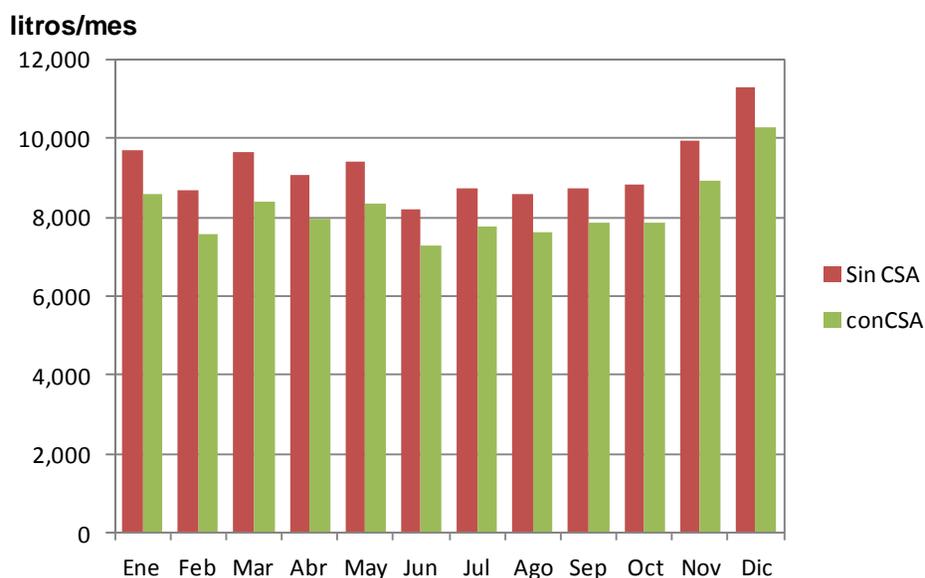
La propuesta de implementar un sistema de calentamiento solar de agua compuesto por 25 colectores solares heat pipe de proveedor chino He-Jia modelo HCA-58/30 y dos tanques de almacenamiento cada uno de 2,250 litros se obtuvo considerando el criterio de que el 30% del total del agua consumida en el restaurante se destinada a agua caliente. La **Tabla 51** es similar a la que se presentó para la evaluación de ahorros con colectores solares planos pero con los valores para los colectores de tubos al vacío.

Con esta propuesta la cobertura solar de la demanda de energía para calentar agua es de 66.84% promedio anual y con respecto al consumo global de gas LP representa en promedio 11.3%. Ver **Tabla 51**.

La grafica de la **Figura 71** muestra el consumo total de gas LP en rojo sin calentamiento solar de agua y en verde con calentamiento solar de agua.

Tabla 51. Evaluación de ahorros de la propuesta con colector heat pipe

| Mes | Consumo total de GAS LP (litros) del restaurante | Volumen diario agua caliente (litros) | Energía requerida agua caliente (kWh/mes) | Consumo gas LP para agua caliente (litros/mes) | Energía aportada por el campo solar (kWh/mes) | % de aporte solar | Energía restante gas LP (kWh/mes) para calentar agua | Consumo gas LP (litros/mes) con colector solar | % Ahorro de gas LP respecto al total |
|-------|--|---------------------------------------|---|--|---|-------------------|--|--|--------------------------------------|
| Ene | 9,683 | 6,263 | 10,335 | 1,685 | 6,685 | 64.69 | 3,650 | 595 | 11.26 |
| Feb | 8,685 | 6,297 | 9,411 | 1,534 | 6,740 | 71.62 | 2,671 | 435 | 12.65 |
| Mar | 9,655 | 5,999 | 9,792 | 1,596 | 7,845 | 80.11 | 1,948 | 317 | 13.25 |
| Abr | 9,071 | 6,334 | 9,820 | 1,601 | 6,905 | 70.31 | 2,916 | 475 | 12.41 |
| May | 9,428 | 5,760 | 9,073 | 1,479 | 6,689 | 73.73 | 2,383 | 389 | 11.57 |
| Jun | 8,220 | 6,629 | 10,047 | 1,638 | 5,724 | 56.97 | 4,324 | 705 | 11.35 |
| Jul | 8,735 | 5,853 | 9,184 | 1,497 | 5,911 | 64.36 | 3,273 | 534 | 11.03 |
| Ago | 8,589 | 5,606 | 8,889 | 1,449 | 5,964 | 67.10 | 2,925 | 477 | 11.32 |
| Sep | 8,736 | 5,369 | 8,231 | 1,342 | 5,494 | 66.75 | 2,737 | 446 | 10.25 |
| Oct | 8,837 | 5,708 | 9,085 | 1,481 | 6,096 | 67.11 | 2,988 | 487 | 11.25 |
| Nov | 9,966 | 5,853 | 9,076 | 1,480 | 6,439 | 70.95 | 2,637 | 430 | 10.53 |
| Dic | 11,299 | 7,396 | 12,050 | 1,964 | 6,370 | 52.86 | 5,680 | 926 | 9.19 |
| TOTAL | 110,903 | 73,067 | 114,993 | 18,746 | 76,862 | 66.84 | 38,131 | 6,216 | 11.30 |

Figura 71. Consumo total de gas LP con sistema de calentamiento solar y sin sistema de calentamiento solar.

Para la evaluación económica se tomaron las mismas consideraciones que para la evaluación de colectores planos a excepción de la inversión inicial que es diferente, resultado de la cotización con un proveedor de calentadores de tubos.

La propuesta con colectores solares es rentable, se calculó el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa interna de rendimiento (TIR) del proyecto. Los resultados se presentan en la **Tabla 52**.

Tabla 52. Evaluación económica de la propuesta.

| DATOS | | Unidades |
|--|-------------------|-----------|
| Tipo de colector | Tubular heat pipe | |
| No captadores | 25 | |
| Presion de operación | 2 | kg/cm2 |
| Area unitaria | 2.83 | m2 |
| Horas diarias de op. Restaurante | 17 | hrs/dia |
| Dias de op. al año | 365 | dias/año |
| Consumo total gas restaurante | 110,903.44 | Lt/año |
| % agua del total para usos agua caliente | 30 | % |
| Temp. Entrada agua | 15.45 | C |
| Temp. Salida agua | 60 | C |
| Eficiencia teórica promedio colector | 0.61 | |
| Eficiencia calentador gas | 0.83 | |
| Energía anual requerida | 114,992.70 | MWh año |
| Consumo anual gas LP calentar agua | 18,746.35 | Lt/año |
| Gasto anual gas LP calentar agua | 115,548.63 | \$/año |
| % del total de gas para calentar agua | 16.90 | % |
| Tiempo de operación por dia | 7 | hrs/dia |
| Aumento anual costo combustible | 10% | |
| Precio base gas LP | 6.16 | \$/lt |
| Dias de op. Por año | 365.00 | dias/año |
| PCI combustible | 26.61 | MJ/lt |
| Ahorro combustible fin año | 12,530.18 | lt/año |
| % con relación al gas para calentar agua | 66.84 | % |
| Ahorro combustible fin año | 77,233.45 | \$/año |
| Tiempo de vida | 10.00 | años |
| Inversion inicial | 437,327 | \$ |
| Porcentaje de Inv. Ini para op. y mantto | 1.80% | |
| Costo anual op. Y mantto | 7,872 | \$/año |
| Ahorro anual total | 69,362 | \$/año |
| Incremento anual costo op. y mantto | 4.00% | % |
| RESULTADOS | | |
| TREMA | 0.15 | |
| Valor presente del ahorro | 508,951.67 | \$ |
| Valor Presente Neto | 71,624.36 | \$ |
| Relacion beneficio costo | 1.16 | |
| Periodo de recuperacion | 7.45 | años |
| TIR | 0.2065 | |

5.10 COMPARACIÓN ENTRE EL SISTEMA ACTUAL Y LAS PROPUESTAS PRESENTADAS.

En la **Tabla 53** se presenta una comparación entre el sistema de calentamiento solar instalado y las propuestas realizadas.

Tabla 53. Comparación entre las propuestas presentas y el sistema de calentamiento solar actualmente funcionando.

| DESCRIPCIÓN | SISTEMA ACTUAL | Propuesta 1 | Propuesta 2 |
|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Tipo | Circuito directo o abierto | Circuito directo o abierto | Circuito directo o abierto |
| Consumo unitario agua caliente | Desconocido | 6.98 litros/comida-día | 6.98 litros/comida-día |
| Demanda de agua caliente | Desconocido | 30% del agua potable | 30% del agua potable |
| Fluido de trabajo | Agua | Agua | Agua |
| Circulacion | Forzada | Forzada | Forzada |
| Acumulacion solar | Centralizada | Centralizada | Centralizada |
| No de captadores | 32 | 30 | 25 |
| Área de apertura (m2) | 2.6 | 2.6 | 2.834 |
| Área total de captación (m2) | 83.2 | 78 | 70.85 |
| Tipo de colector | Plano | Plano | Tubular heat pipe |
| Marca y modelo | Chromagen CR-120 | Chromagen CR-120 | HeJia HCA/58/30 |
| Arreglo entre colectores | Serie-Paralelo | Paralelo | Mixto |
| Colectores por banco | 3 | 3 | 5 |
| Banco por fila | 2 | 2 | 1 |
| Filas por campo | 5 | 5 | 5 |
| Distancia entre filas | 0.60 m | 0.75m | 0.65m |
| No. de Termotanques | 3 | 2 | 2 |
| Capacidad termotanques | 3,000 litros cada uno | 3,000 litros cada uno | 2,250 litros cada uno |
| Contribución solar | Desconocido | 71.75% | 66.84% |
| % ahorro total de gas LP | <18% | 12.13% | 11.30% |

Si se compara la propuesta 1 con el sistema actual, dado que ambas tienen el mismo colector solar, las principales diferencias son:

- El número de colectores. El dimensionamiento de la propuesta 1 se realizó considerando un consumo unitario de agua caliente de 6.98 litros/comida-día, correspondiente al 30% del consumo de agua potable que en consecuencia implica un cierto calor requerido para satisfacer esa demanda.
- El volumen de acumulación. El volumen de almacenamiento se calculó considerando el criterio de 75litros por metro cuadrado de área de captación dando 6,000 litros. El volumen del sistema actual calculado con ese criterio para 32 captadores es de 6,240 litros, y el que está es mucho mayor, 9,000 litros y se desconoce si se usa la totalidad de ese volumen diariamente o solo una fracción del mismo ya que el sistema solar no tiene medidor de caudal incorporado.

- La distribución o acomodo de los colectores. La conexión en el sistema propuesto es en paralelo mientras que en el sistema actual es en serie paralelo. El sistema propuesto es uniforme, las filas tienen el mismo número de colectores mientras que en el sistema actual, de las 5 filas, 2 tienen diferente número de colectores.
- Distancia entre filas. El sistema actual tiene 0.60m de distancia entre filas, que es menor a la distancia calculada de 0.71m.

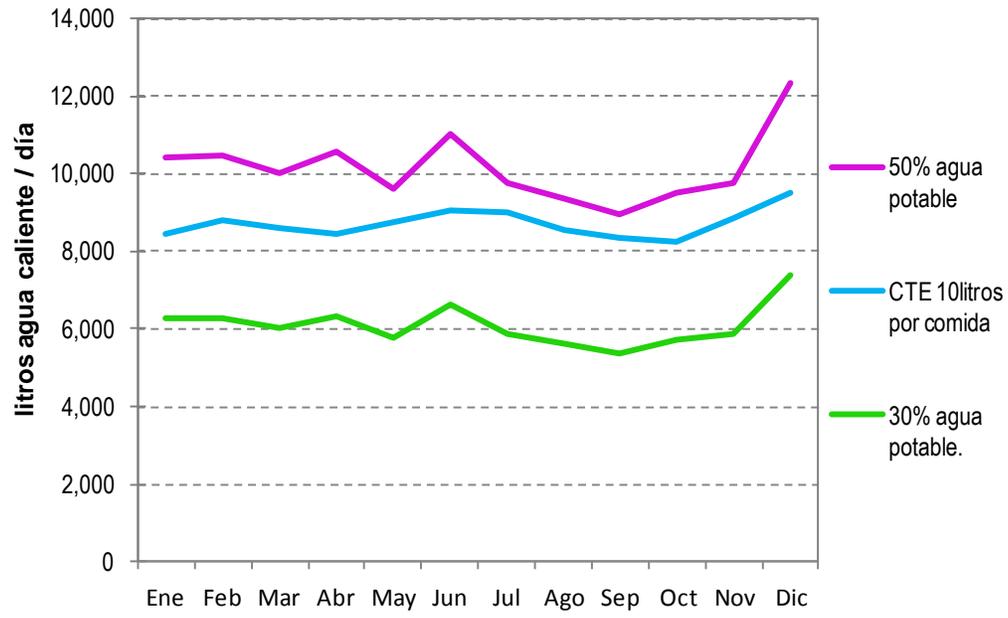
Como no se pudo determinar la demanda de agua caliente que en realidad consume el restaurante, se hará un ejemplo considerando otros porcentajes de consumo de agua caliente con fines comparativos. La **Tabla 54** presenta la demanda diaria de agua caliente con el criterio del 30% del agua potable del restaurante con el que se hizo la propuesta 1, luego una demanda con el del 50% y por último con el límite que da el CTE para restaurantes de 10 litros/comida-día.

En instalaciones ubicadas en el DF puede tomarse el criterio del consumo de agua que marca la Norma Ambiental NAMB 008-AMBT-2005 para el establecimiento en cuestión sin embargo no necesariamente refleja el consumo que realmente se da en el lugar lo que puede llevar a un proyecto que cumpla la norma pero quede subdimensionado. El criterio del consumo de agua caliente es el más relevante en el tamaño e inversión de un proyecto cuando se carecen de datos medidos.

Tabla 54. Comparación entre las demandas de agua caliente al 30% y al 50% del consumo total del restaurante, con 10litros/comida-día.

| Mes | Litros / día 30% agua caliente | Litros / día 50% agua caliente | Litros / día CTE (10 l/comida) |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Ene | 6,263 | 10,438 | 8,455 |
| Feb | 6,297 | 10,495 | 8,785 |
| Mar | 5,999 | 9,999 | 8,594 |
| Abr | 6,334 | 10,556 | 8,437 |
| May | 5,760 | 9,600 | 8,765 |
| Jun | 6,629 | 11,048 | 9,034 |
| Jul | 5,853 | 9,755 | 9,026 |
| Ago | 5,606 | 9,343 | 8,571 |
| Sep | 5,369 | 8,948 | 8,335 |
| Oct | 5,708 | 9,513 | 8,275 |
| Nov | 5,853 | 9,756 | 8,834 |
| Dic | 7,396 | 12,327 | 9,528 |
| Promedio | 6,089 | 10,148 | 8,720 |

Figura 72. Comparación de demandas de agua caliente.



CONCLUSIONES

En el sector residencial y comercial, el calentamiento de agua es una de las aplicaciones energéticas principales del gas LP.

A nivel nacional, la energía empleada para calentar fluidos a baja temperatura es muy representativa, se estima en 242 PJ anuales considerando un promedio del año 2001 a 2011, que representan el 5.7% del consumo energético final en México.

La incorporación de sistemas solares de calentamiento de agua en diversas aplicaciones presenta grandes oportunidades de reducción de consumos de gas LP, costos asociados en los sistemas convencionales y emisiones de CO₂ a la atmósfera.

El sector de mayor potencial para los sistemas solares térmicos de calentamiento de agua es el sector vivienda en cuanto al tamaño sin embargo en los sectores comercial y agronegocios también se encuentra un gran nicho para esta tecnología. Diversos programas de promoción y fomento como el PROCALSOL han contribuido a la detonación y crecimiento del mercado del Calentamiento Solar de Agua (CSA) en México. Aún falta camino que recorrer para fortalecer el sector, como por ejemplo a través de una norma oficial equilibrada que garantice la calidad de los equipos y servicios ofrecidos en esa área.

Los ahorros derivados de un proyecto de calentamiento solar de agua dependerán en gran medida de un buen dimensionamiento, de la temperatura ambiente y los niveles de insolación existentes en la localidad en particular.

El dimensionamiento adecuado de una instalación solar está relacionado directamente con la determinación de las necesidades reales del lugar. Un problema frecuente es la falta de información en los establecimientos, lo cual sucedió en el caso del restaurante analizado en este trabajo ya que se carecían de los consumos de agua caliente y tampoco se contaba con los consumos de gas LP específicos para calentar agua. Para resolver este problema, se estimó la demanda de agua caliente de acuerdo valores dados en normas como:

- Norma Ambiental del DF, NAMB-008-AMBT-2005 que especifica que la dotación de diseño mínima de agua para un restaurante es de 12 litros por comensal por día y que un 30% de la misma se destina a usos de agua caliente, es decir 3.6 litros por comensal por día.

- Código Técnico de Edificación (CTE de España que contiene demandas de agua caliente de referencia para diversos establecimientos). Para restaurantes indica el intervalo de 5 a 10 litros por comensal por día. Se tomó el promedio entre esos dos valores, es decir 7.5 litros/comensal-día.

Se tenía la información del agua potable que consume el restaurante y se optó por crear un criterio más, del consumo unitario de agua potable, se tomó el porcentaje del 30% del total para usos de agua caliente, el mismo porcentaje que la norma ambiental del DF y en promedio se obtuvo 6.98 litros de agua caliente por comensal por día.

El análisis del sistema actual de CSA del restaurante mostró que es un sistema sobredimensionado en el almacenamiento de agua (9,000 litros de agua) por el volumen de acumulación mayor al recomendado y que no se sabe con exactitud cuánto de ese volumen se consume en realidad ya que la instalación no tiene un caudalímetro además carece de válvulas de drenado y alivio así como la distancia entre filas es menor a la calculada por las metodologías consultadas en 11cm, la tubería de alimentación se encuentra desnuda lo que provoca pérdidas importantes de calor, las filas entre colectores no tiene el mismo número de colectores y la conexión entre los tanques es en paralelo, en la que se alcanzan menores temperaturas. Normalmente las estimaciones de agua caliente en proyectos de la Ciudad de México deben estar acorde con el criterio que da la norma ambiental del DF, así que el sistema instalado en el restaurante queda muy por arriba de ese criterio. El ahorro de gas LP no se pudo determinar con precisión sin embargo usando ciertos índices, específicamente el índice de gas LP por comida se pudo estimar como menor al 18.10%.

Cabe mencionar que entre mayor es el consumo de agua caliente, mayor es el ahorro que se puede lograr con un sistema de calentamiento solar de agua bien dimensionado.

La propuesta 1 se hizo usando el un colector solar CHORMAGEN CR-120 porque se trata del mismo modelo instalado con el fin de comparar ambas propuestas. Se decidió usar el criterio de que el 30% de agua potable se destina al consumo de agua caliente para dimensionar el sistema porque ese valor procede de datos reales del consumo del restaurante aunque se debe puntualizar que no hay forma de comprobar que el porcentaje no sea mayor al 30%.

El número de colectores obtenidos con el dimensionamiento fue de 30 y el volumen de acumulación de 6,000 litros. En la propuesta se respeta la distancia entre filas calculada y que estén compuestas por el mismo número de colectores y un volumen de acumulación acorde al área de captación así como la instalación de las válvulas necesarias y los aislamientos de las tuberías correspondientes. El ahorro de gas LP respecto al total fue de 12.13% con un aporte solar del 71.75%.

Se presentó una segunda propuesta que considera la misma demanda de agua que la propuesta 1 pero con colectores heat pipe y se concluyó que es una propuesta que requiere mayor inversión lo que implica mayor tiempo de recuperación sin embargo estos colectores alcanzan mayores temperaturas que los planos, son más eficientes y más versátiles.

Hay que considerar que los cálculos de la TIR y el VPN de ambas propuestas están sujetos a las consideraciones dadas y que al variar estas condiciones los resultados evidentemente serán diferentes:

- Todos los colectores tienen la misma eficiencia y es la calculada teóricamente.
- La temperatura que alcanza el agua es de 60C
- El aumento anual en el precio del gas LP es de 10%
- La tasa de descuento es del 15%.

Las condiciones pueden cambiar y hacer más atractivo un proyecto ya que no se contemplaron esquemas de financiamiento ni se tomó en cuenta el beneficio fiscal de la deducción del ISR al 100% en el primer año y solo se contó con 2 cotizaciones para estimar los costos de los equipos y se supuso el costo de operación y mantenimiento.

TRABAJO A FUTURO.

- La forma más precisa de conocer la demanda de agua caliente es mediante la medición del caudal de agua caliente consumida. Si no hay medición previa a un proyecto, cuando se instala un sistema solar se recomienda colocar un medidor de caudal para saber el agua caliente que se consume. Los distintos dimensionamientos realizados nos muestran como pueda cambiar un proyecto de acuerdo a los criterios considerados, por lo que conocer la demanda de agua caliente es clave.
- Se podría explorar la opción de evaluar la propuesta de instalar colectores de tubos de flujo directo y aunque estos sistemas son para baja presión de alimentación de agua (menor a 1kg/cm²) podrían ser viables haciendo dos circuitos independientes en la instalación hidráulica, uno a la presión del sistema y el otro no presurizado. Tienen la ventaja que son muy eficientes y más económicos que los colectores heat pipe.
- Sería pertinente la medición del consumo de gas LP que se usa exclusivamente para calentar agua.
- Sería conveniente recabar mayor información sobre el funcionamiento de los equipos consumidores de agua del restaurante, como impactan los hábitos de uso del personal, etc. y tener una retroalimentación sobre los cambios en los consumos de agua que pudieran darse por otras causas.
- Se puede realizar la evaluación económica de los proyectos considerando variaciones en el aumento del precio del gas y la tasa de descuento y ver la sensibilidad que estos parámetros tienen en los resultados del tiempo de retorno de la inversión, de la TIR y del VPN.

APÉNDICE 1

VALORES DE CONSUMOS UNITARIOS DE LA NORMA AMBIENTAL DEL DF Y DEL CTE.

Tabla A1.1. DOTACIÓN MÍNIMA DE AGUA POTABLE Y DISTRIBUCIÓN POR TIPO DE ESTABLECIMIENTO (tomada del anexo 1 de la Norma Ambiental NADF-008-AMBT-2005).

| Tipo | Dotacion de agua potable | Unidades |
|---|--------------------------|----------------------|
| COMERCIAL | | |
| Comercios | 6 | l/m ² día |
| Mercados públicos y tianguis | 100 | l/puesto día |
| SERVICIOS | | |
| Oficinas de cualquier tipo | 50 | l/persona día |
| Servicios automotrices | 100 | l/trabajador día |
| SERVICIOS DIVERSOS | | |
| Baños públicos | 300 | l/bañista día |
| Servicios sanitarios públicos | 300 | l/mueble día |
| Limpieza | 40 | l/kg ropa seca |
| Otros servicios | 100 | l/trabajador día |
| SERVICIOS DE SALUD Y ASISTENCIA | | |
| Atención médica a usuarios externos; salas de espera | 12 | l/sitio paciente |
| Servicios de salud a usuarios internos; cuartos de camas | 800 | l/cama día |
| Orfanatorios y asilos; empleados | 300 | l/huesped día |
| EDUCACION, CIENCIA Y CULTURA | | |
| Educación preescolar | 20 | l/alumno turno |
| Básica y media | 25 | l/alumno turno |
| Media superior y superior | 25 | l/alumno turno |
| Institutos de investigación | 50 | l/persona día |
| Museos y centros de información | 10 | l/asistente día |
| CENTROS DE REUNIÓN | | |
| Servicios de alimentos y bebidas | 12 | l/comida día |
| Espectáculos y reuniones | 10 | l/asistente día |
| Reuniones y recreación social | 25 | l/asistente día |
| Prácticas deportivas con baños y vestidores | 150 | l/asistente día |
| Espectáculos deportivos | 10 | l/asiento día |
| Lugares de culto, templo, iglesias sinagogas | 10 | l/asistente día |
| SERVICIOS TURÍSTICOS | | |
| Hoteles, moteles, albergues y casas de huéspedes | 300 | l/huesped día |
| Campamentos para remolques | 200 | l/persona día |
| SERVICIOS FUNERARIOS | | |
| Agencias funerarias | 10 | l/sitio visitante |
| Cementerios, crematorios, mausoleos | 100 | l/trabajador día |
| Visitantes a cementerios, crematorios y mausoleos | 10 | l/sitio visitante |
| COMUNICACIONES Y TRANSPORTES | | |
| Estacionamientos | 8 | l/cajón día |
| Sitios, paraderos y estaciones de transferencia | 100 | l/trabajador día |
| Estaciones de transporte y terminales de autobuses foráneos | 10 | l/pasajero día |
| Estaciones del sistema de transporte colectivo | 2 | l/m ² día |

Tabla A1.2. DEMANDA DE REFERENCIA A 60°⁽¹⁾ PARA DIVERSOS ESTABLECIMIENTOS COMERCIALES DE ACUERDO AL CÓDIGO TÉCNICO DE EDIFICACIÓN DE ESPAÑA. Extraída del Documento Básico HE “Ahorro de Energía” de su Sección HE-4, Tabla 3.1. (antes de la modificación del septiembre de 2013).

| Criterio de demanda | Litros ACS/día a 60°C |
|---|------------------------------|
| Viviendas unifamiliares | 30 por persona |
| Viviendas multifamiliares | 22 por persona |
| Hospitales y clínicas | 55 por cama |
| Hotel **** | 70 por cama |
| Hotel *** | 55 por cama |
| Hotel/Hostal ** | 40 por cama |
| Camping | 40 por emplazamiento |
| Hostal/Pensión * | 35 por cama |
| Residencia (ancianos, estudiantes, etc) | 55 por cama |
| Vestuarios/Duchas colectivas | 15 por servicio |
| Escuelas | 3 por alumno |
| Cuarteles | 20 por persona |
| Fábricas y talleres | 15 por persona |
| Administrativos | 3 por persona |
| Gimnasios | 20 a 25 por usuario |
| Lavanderías | 3 a 5 por kilo de ropoa |
| Restaurantes | 5 a 10 por comida |
| Cafeterías | 1 por almuerzo |

⁽¹⁾ Los litros de ACS/día a 60°C de la tabla se han calculado a partir de la tabla 1 (Consumo unitario diario medio) de la norma UNE 94002:2005 “Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria: cálculo de la demanda energética”.

APÉNDICE 2

CALCULO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE LA RED SUMINISTRADORA

Para realizar el cálculo del calor necesario para elevar la temperatura del agua de la inicial a la deseada, se requiere conocer la temperatura del agua potable o "fría" suministrada por el sistema de agua de la localidad.

La temperatura del agua proveniente del sistema de aguas público se relaciona con el flujo de calor en el suelo ya que las tuberías de distribución se encuentran enterradas. A continuación se presenta el modelo descrito por la metodología del RETScreen para el cálculo de la temperatura del agua.

El flujo de calor en el suelo se puede aproximar por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{A2.1})$$

donde T es la temperatura del suelo, t es el tiempo, α la difusividad térmica del suelo (m^2/s) y z es la distancia vertical. Si el suelo se supone semi infinito y con propiedades térmicas uniformes y una temperatura que varía en la superficie de acuerdo a:

$$T(0,t) = T_0 e^{i\omega t} \quad (\text{A2.2})$$

donde T_0 es la temperatura media de la superficie para un ciclo y ω es la frecuencia para el mes i . La solución de la ecuación A2.2 expresando la temperatura como función de la profundidad z y del tiempo t es:

$$T(z,t) = T_0 e^{-(1+i)z/\sigma} e^{i\omega t} \quad (\text{A2.3})$$

donde σ es la profundidad de atenuación definida como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (\text{A2.4})$$

Así, la amplitud de la fluctuación en temperatura (la mitad de la diferencia entre máxima y mínima) ΔT que se da a una profundidad z con una amplitud $\Delta T(z) = \Delta T e^{-z/\sigma}$ y con $\Delta t = z/\sigma\omega$. El modelo anterior fue modificado en vista de la

obtención de datos experimentales de las temperaturas del agua en la ciudad de Toronto.

Entonces la temperatura del agua se puede calcular para cualquier mes de acuerdo al siguiente algoritmo. La temperatura del agua para el mes i es igual a la temperatura promedio del agua por 0.4167 veces la diferencia entre la temperatura ambiente promedio y la temperatura ambiente para el mes $i-1$. Este nuevo método aproxima de forma aceptable el valor de la temperatura del agua al menos para el caso de la ciudad de Toronto. El valor de 0.4167 se cambio por 0.35 para Toronto y que se ajustará mejor a los datos medidos. Para nuestro caso haremos uso del mismo modelo simple para aproximar las temperaturas del agua con el valor de 0.4167.

El modelo de RETScreen asume que la temperatura del agua fría es igual a la temperatura del suelo para una profundidad adecuada. El modelo da un valor de la difusividad del suelo de $\alpha=0.52 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $z=2\text{m}$, asumiendo que es la profundidad a la cual se entierran las tuberías. Los valores que se obtienen bajo esas consideraciones son los siguientes:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \times 0.52 \times 10^{-6} \times 24 \times 3600 \times 365}{2 \times \pi}} = 2.2847\text{m}$$

$$e^{-z/\sigma} = e^{-2/2.2847} = 0.4167$$

Y

$$\Delta T = (19.20 - 13.30) / 2 = 2.95$$

Considerando que para México DF, delegación Benito Juárez (datos tomados del Sistema Meteorológico Nacional para la estación Coyoacán) la temperatura promedio máxima anual es de 19.21°C y la mínima es de 13.30°C.

Como ejemplo se hará el cálculo de la temperatura del agua para enero.

De acuerdo a la Tabla A2.1 la temperatura ambiente promedio anual es de 16.71°C, y la temperatura ambiente para el mes $i-1$, es decir diciembre es de 13.6°C, luego la temperatura promedio anual del agua es 15.45°C (valor dado en la norma ambiental del DF), aplicando el modelo descrito obtenemos que la temperatura promedio del agua para enero es:

$$T_{\text{agua en enero}} = 15.45 + 0.4167 \times (13.6 - 16.71) = 14.15^\circ\text{C}$$

Los resultados para los demás meses se presentan en la Tabla A2.1

Tabla A2.1 Valores de la temperatura ambiente tomados de la estación Coyoacán del SMN y valores calculados de la temperatura del agua.

| Mes | T amb (°C) | T agua (°C) |
|------|------------|-------------|
| 1 | 13.3 | 14.155 |
| 2 | 14.8 | 14.030 |
| 3 | 16.8 | 14.655 |
| 4 | 18.6 | 15.488 |
| 5 | 19.2 | 16.238 |
| 6 | 19 | 16.488 |
| 7 | 17.9 | 16.405 |
| 8 | 18 | 15.947 |
| 9 | 17.5 | 15.988 |
| 10 | 16.8 | 15.780 |
| 11 | 15 | 15.488 |
| 12 | 13.6 | 14.738 |
| Prom | 16.71 | 15.450 |
| Max | 19.20 | 16.488 |
| min | 13.30 | 14.030 |

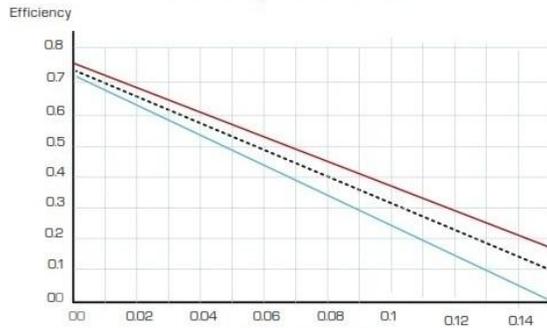
APÉNDICE 3

FICHA TÉCNICA DEL COLECTOR SOLAR PLANO MARCA CHROMAGEN MODELO CR-120 tomada del “Manual técnico y catálogo Chromagen”.

| Model | CR-120 | | CR-120 Sputtering |
|-------------------------------------|---------------------|------|----------------------|
| Risers Diameter | 8 mm | 5/8" | 8 mm |
| Connections thread BSP | 3/4" | 3/4" | 3/4" |
| Gross Area [m ²] | 2.80 | 2.80 | 2.80 |
| Net Aperture Area [m ²] | 2.56 | 2.56 | 2.56 |
| Length [cm] | 219 | 219 | 219 |
| Width [cm] | 128 | 128 | 128 |
| Thickness [cm] | 9 | 9 | 9 |
| Weight (Empty) [kg] | 41 | 44 | 44 |
| Fluid Capacity [liter] | 1.5 | 4.1 | 1.6 |
| Test Pressure [bar] | 12 | 12 | 12 |
| Max. Operating Pressure [bar] | 10 | 10 | 10 |
| Efficiency Curve (black chrome) | $\eta=0.72 - 4.14X$ | | $\eta=0.74 - 3.9X$ |
| Efficiency Curve (Selective paint) | $\eta=0.72 - 4.8X$ | | |



Efficiency Curve CR120



..... black chrome
 — sputtering
 — select paint

$$X = (T_m - T_a) / G$$

$T_m = (T_{out} + T_{in}) / 2$: Mean Water Temp
 T_a : Ambient Temp
 G : Instantaneous Solar Radiation

| Flow [L / hr] | Pressure Drop On One 5/8" col. [Cm of Water] | Pressure Drop On One 8mm col. [Cm of Water] |
|------------------|--|---|
| 50 | 0.4 | 1.5 |
| 100 | 1 | 3 |
| 150 | 1.8 | 4.3 |
| 200 | 3 | 7.2 |
| 250 | 4.8 | 9.8 |
| 300 | 6 | 12.6 |
| 350 | 9 | 18 |

- Dimensions in cm - Aluminium Frame
- Efficiency curves were obtained by the Standards Institution of Israel and Chromagen Laboratories.

APÉNDICE 4

FICHA TÉCNICA DEL COLECTOR SOLAR DE TUBOS HEAT PIPE MARCA HEJIA MODELO HCA 58/30 tomada de la ficha de evaluación del Instituto SPF.



C909

Solar Collector Factsheet He Jia HCA-58/30

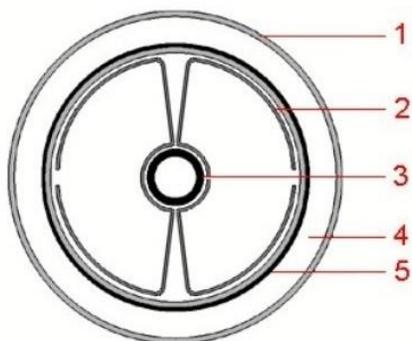


| | |
|-------------------|--|
| Modelo | HCA-58/30 |
| Tipo | Colector tubular |
| Fabricante | Changzhou He Jia Solar Energy |
| Dirección | No. 16, Chingjiao rd, Dongqing town Changzhou, Jiangsu CN-213114 Changzhou |
| Teléfono | +86 519 88967878 |
| Telefax | +86 519 88967868 |
| Email | hjsun@vip.163.com |
| Internet | www.hjsolar.com.cn |

- Ensayo de rendimiento EN12975:2006
- Ensayo de durabilidad EN12975:2006



| Dimensiones | | Datos técnicos | |
|---|----------------------|---|----------|
| Longitud total | 1.990 m | Caudal mínimo | 108 l/h |
| Anchura total | 2.105 m | Caudal nominal | 180 l/h |
| Superficie bruta | 4.189 m ² | Caudal máximo | 1200 l/h |
| Área de apertura | 2.834 m ² | Contenido de fluido | 1.7 l |
| Área de absorbedor | 2.432 m ² | Presión máxima de operación | 6 bar |
| Peso vacío | 95 kg | Temperatura de estancamiento | 199 °C |
| Montaje del captador | | Informaciones adicionales | |
| <input checked="" type="checkbox"/> En tejado con inclinación | | <input checked="" type="checkbox"/> Módulos disponibles en diversos tamaños | |
| <input type="checkbox"/> Integrado en tejado con inclinación | | <input type="checkbox"/> Cubierta intercambiable | |
| Construcción | | | |



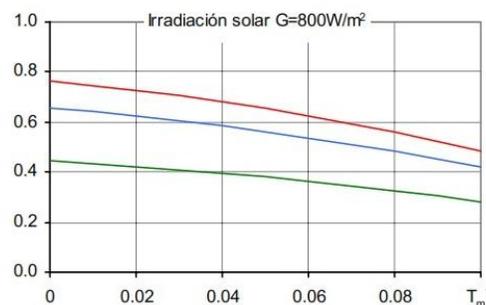
- 1 Cubierta
- 2 Chapa para la conducción del calor
- 3 Tubo de calor
- 4 Vacío
- 5 Absorbedor

Rendimiento máximo W_{peak}



| | |
|---|-------------------|
| Rendimiento máximo W_{peak} | 1858 W |
| Capacidad térmica* | 33.7 kJ/K |
| Caudal usado para los ensayos | 180 l/h |
| Fluido de transferencia de calor | Agua-Glicol 33.3% |

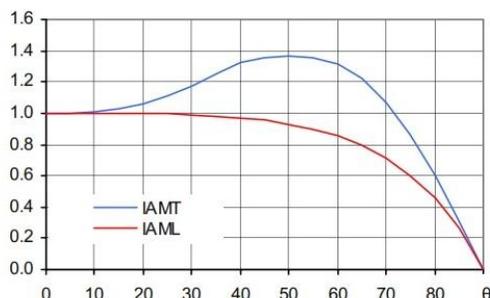
Eficiencia relativa η



| | Total | Apertura | Absorbedor |
|--|--------|----------|------------|
| Área referencia η_0 | 0.444 | 0.656 | 0.764 |
| a_1 [$WK^{-1}m^{-2}$] | 0.95 | 1.40 | 1.63 |
| a_2 [$WK^{-2}m^{-2}$] | 0.0083 | 0.0123 | 0.0143 |

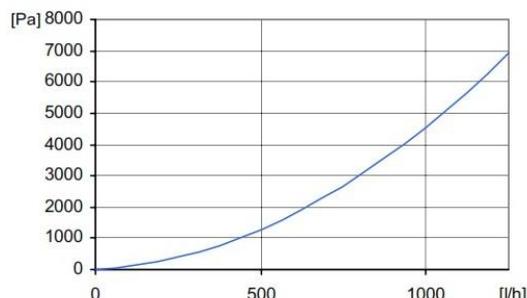
*) Capacidad térmica específica C del captador sin líquido, determinado según 6.1.6.2 del EN12975-2:2006

Modificador del ángulo IAM



| | |
|-----------------------------------|------|
| K1, transversal IAM a 50° | 1.36 |
| K2, longitudinal IAM a 50° | 0.93 |

Caída de presión Δp



Caída de presión para caudal nominal:
 $\Delta p = 234 \text{ Pa}$ ($T=20^\circ\text{C}$)

SPF Simulación de sistemas con Polysun

Breve descripción del sistema

Clima: Suiza central, orientación del captador: Sur, agua fría 10°C, agua caliente sanitaria 50°

Agua caliente sanitaria: $F_{ss}^* = 60\%$

Depósito 450 litros, Inclinación del captador 45°, Necesidad diaria de energía 10 kWh (4-6 personas), Necesidad energética del sistema de referencia 4200 kWh/año

Precalentamiento del ACS: $F_{ss}^* = 25\%$

2 depósitos: 1500 litros & 2500 litros, Inclinación del captador 30°, Agua caliente sanitaria 10'000 l/día (200 personas), Pérdida diaria de calor (circulación & depósito) 60 kWh, Necesidad energética del sistema de referencia 191'700 kWh/año

Calefacción de espacio: $F_{ss}^* = 25\%$

Almacenamiento combinado 1200 litros, Inclinación del captador 45°, Necesidad diaria de energía 10 kWh (4-6 personas), Edificio 200 m², Construcción intermedia fuerte, bien aislada, Necesidades potencia de calentamiento 5.8 kW (temperatura exterior -8°C), Necesidades energéticas de calentamiento 12140 kWh/año, Necesidades energética del sistema referencia 16340 kWh/año

| Superficie requerida** | Rendimiento solar** |
|------------------------|---------------------|
|------------------------|---------------------|

| | |
|---------------------|------------------------|
| 4.44 m ² | 575 kWh/m ² |
| 1.6 captadores | |

| | |
|---------------------|------------------------|
| 61.9 m ² | 776 kWh/m ² |
| 21.8 captadores | |

| | |
|---------------------|------------------------|
| 12.3 m ² | 440 kWh/m ² |
| 4.3 captadores | |

*) Fractional solar savings: Fracción de la energía final que, gracias al sistema solar, puede ser ahorrada comparada con un sistema de referencia.

**) La necesidad en superficie y el rendimiento solar son definidos en relación a la superficie de apertura.

APENDICE 5

CALCULO DE LA INSOLACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA

La cantidad de radiación que incide sobre una superficie depende de su ubicación geográfica y del tiempo además de la orientación e inclinación de la superficie en cuestión. Para nuestro caso, los colectores están inclinados a un ángulo fijo y no tienen seguimiento y en los análisis de dimensionamiento se requiere conocer la radiación que incide sobre su superficie, para ello primero enunciaremos algunos conceptos básicos previos que nos van a permitir calcular la radiación sobre una superficie inclinada.

La declinación solar, varía a cada momento, pero puede considerarse constante durante un día dado y viene dada por la siguiente expresión:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (\text{A5.1})$$

Donde:

δ es la declinación solar en grados para un determinado día del año N que va desde 1 el primero de enero a 365 el 31 de diciembre.

La declinación solar varía entre $+23.45^\circ$ y -23.45° . Se considera que la declinación al norte del ecuador es positiva y hacia el sur, negativa.

Otro concepto importante es el de ángulo hora. Durante el alba y el ocaso, la altura solar, α , es 0, entonces el ángulo hora para la puesta de sol cuando la altura solar es 0° , es:

$$\cos(h_{ss}) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad (\text{A5.2})$$

Donde

L es la latitud

δ es la declinación solar.

Para calcular valores promedio de insolación se toma la declinación de un día promedio del mes según Kalogirous. En la **Tabla A5.1** se presenta el día de mes, su declinación solar y el ángulo hora

Tabla A5.1. Día promedio del mes y valores de declinación solar y del ángulo hora al ocaso para el día promedio.

| Mes | Día promedio mes | | Declinacion δ | hss |
|-----|------------------|------------|----------------------|--------|
| | Fecha | Número día | Grados | Grados |
| 1 | 17 | 17 | -20.92 | 82.28 |
| 2 | 16 | 47 | -12.95 | 85.36 |
| 3 | 16 | 75 | -2.42 | 89.15 |
| 4 | 15 | 105 | 9.41 | 93.34 |
| 5 | 15 | 135 | 18.79 | 96.87 |
| 6 | 11 | 162 | 23.09 | 98.62 |
| 7 | 17 | 198 | 21.18 | 97.83 |
| 8 | 16 | 228 | 13.45 | 94.82 |
| 9 | 15 | 258 | 2.22 | 90.78 |
| 10 | 15 | 288 | -9.60 | 86.59 |
| 11 | 14 | 318 | -18.91 | 83.08 |
| 12 | 10 | 344 | -23.05 | 81.40 |

Otro concepto necesario es el coeficiente de claridad atmosférica media mensual, \bar{K}_T , definido como:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{H_0} \quad (\text{A5.3})$$

Donde:

\bar{H} =insolación total terrestre promedio mensual sobre una superficie horizontal (MJ/m²-d).
 H_0 =insolación extraterrestre mensual promedio diario sobre una superficie horizontal (MJ/m²).

La insolación global o total terrestre promedio mensual H se puede encontrar reportada por instituciones meteorológicas que realizan mediciones con piranómetros y son datos que permiten construir mapas de insolación nacionales.

La insolación total extraterrestre sobre una superficie horizontal se calcula mediante la siguiente expresión:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360N}{365} \right) \times \cos(L) \cos(\delta) \sin(h_{ss}) + \left(\frac{\pi h_{ss}}{180} \right) \sin(L) \sin(\delta) \right] \quad (\text{A5.4})$$

Donde

L es la latitud del lugar

δ es la declinación

h_{ss} es el ángulo hora para el ocaso

G_{sc} es la radiación solar fuera de la atmósfera conocida como constante solar que tiene un valor de $1,366 \text{ W/m}^2$.

La mayor parte de los datos medidos están dados como radiación global sobre una superficie horizontal y normalmente es necesario conocer la radiación sobre una superficie con una cierta inclinación. Un método empírico para estimar la radiación global incidente promedio diario mensual sobre una superficie horizontal fue desarrollado por Liu y Jordan (1979), ellos proponen una correlación como la relación entre la radiación difusa entre la radiación total sobre una superficie horizontal expresada en términos del índice de claridad, \bar{K}_T , por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} = 1.390 - 4.027\bar{K}_T + 5.531\bar{K}_T^2 - 3.108\bar{K}_T^3 \quad (\text{A5.5})$$

Collares-Pereira y Rabl (1979) expresan el mismo parámetro considerando el ángulo hora al ocaso:

$$\frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} = 0.775 + 0.0065\chi(h_{ss} - 90) - [0.505 + 0.0045\chi(h_{ss} - 90)]\cos(115\bar{K}_T - 103) \quad (\text{A5.6})$$

Erbs (1982) expresan el mismo cociente tomando en cuenta la temporada.

Para $h_{ss} \leq 81.4^\circ$ y $0.3 \leq K_T \leq 0.8$;

$$\frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} = 1.391 - 3.560\bar{K}_T + 4.189\bar{K}_T^2 - 2.137\bar{K}_T^3 \quad (\text{A5.7})$$

Para $h_{ss} > 81.4^\circ$ y $0.3 \leq K_T \leq 0.8$;

$$\frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} = 1.311 - 3.022\bar{K}_T + 3.427\bar{K}_T^2 - 1.821\bar{K}_T^3 \quad (\text{A5.8})$$

Con la radiación global diaria promedio mensual conocida \bar{H} y también la radiación difusa \bar{H}_D la radiación directa \bar{H}_B sobre una superficie horizontal se puede calcular como:

$$\bar{H}_B = \bar{H} - \bar{H}_D \quad (\text{A5.9})$$

Adicionalmente, el factor de inclinación \bar{R} para la radiación global mensual se define como:

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_t}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}}\right) \bar{R}_B + \frac{\bar{H}_D}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + \rho_G \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \quad (\text{A5.10})$$

Donde

\bar{H}_t = radiación global diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada.

\bar{R}_B = factor de inclinación de radiación directa promedio.

ρ_G = reflectividad del suelo.

El factor R_B para superficies viendo al ecuador esta dado por:

$$\bar{R}_B = \frac{\cos(L - \beta) \cos(\delta) \sin(h'_{ss}) + (\pi/180) h'_{ss} \sin(L - \beta) \sin(\delta)}{\cos(L) \cos(\delta) \sin(h_{ss}) + (\pi/180) h_{ss} \sin(L) \sin(\delta)} \quad (\text{A5.11})$$

Donde h'_{ss} es el ángulo hora del ocaso en superficies inclinadas (en grados) dado por:

$$h'_{ss} = \min\{h_{ss}, \cos^{-1}\}[-\tan(L - \beta) \tan(\delta)] \quad (\text{A5.12})$$

A continuación presentamos el cálculo de la radiación sobre un colector solar plano que tiene una inclinación fija con respecto a la horizontal de 20 grados ubicado en la delegación Benito Juárez, Ciudad de México (latitud de 19.36°).

La radiación global H es conocida, obtenida de los datos medidos y reportados del Instituto de Geofísica de la UNAM en su página web. La latitud del Instituto de Geofísica (19°20") varía de la latitud del lugar de instalación del colector, sin embargo se tomarán los valores ya que es la estación de medición más cercana al lugar. Los pasos para obtener los resultados de la **Tabla A5.2** fueron los siguientes:

- 1) Cálculo del parámetro H_0 por medio de la fórmula A5.4 con los datos de la **Tabla A5.1**
- 2) Obtención del índice de claridad KT con la expresión A5.3
- 3) Con el índice de claridad conocido, aplicamos la correlación de Liu y Jordan, dada por la ecuación A5.5 para el cálculo de H_D/H correspondiente a los datos de la Tabla A5.3
- 4) Se calcula el ángulo hora para el ocaso para superficies inclinadas dado por la ecuación A5.12 como el valor mínimo entre el ángulo hora para el ocaso en superficies horizontales y el valor propuesto.
- 5) Se calcula el índice R y R_B con las ecuaciones A5.10 y A5.11 respectivamente.
- 6) Finalmente, el factor R se multiplica por la radiación global conocida sobre superficie horizontal H , y se obtiene la radiación global sobre superficie a una inclinación dada, H_t .

Tabla A5.2 Irradiación global medida, irradiación extraterreste e índice de clariada.

| Mes | H (MJ/m ² -día) | H ₀ (MJ/m ² -día) | K _T |
|-----|-------------------------------|--|----------------|
| 1 | 16.426 | 27.275 | 0.602 |
| 2 | 19.260 | 31.251 | 0.616 |
| 3 | 21.694 | 35.714 | 0.607 |
| 4 | 21.222 | 39.474 | 0.538 |
| 5 | 20.994 | 41.406 | 0.507 |
| 6 | 18.855 | 41.991 | 0.449 |
| 7 | 18.676 | 41.733 | 0.448 |
| 8 | 18.057 | 40.417 | 0.447 |
| 9 | 16.275 | 37.358 | 0.436 |
| 10 | 16.345 | 32.782 | 0.499 |
| 11 | 16.550 | 28.331 | 0.584 |
| 12 | 15.265 | 26.160 | 0.584 |

Tabla A5.3 Radiación sobre una superficie inclinada usando la correlación de Liu y Jordan para el cálculo de HD/H.

| Mes | H _D /H | hss' | R _B | R | H _{incl} (MJ/m ² -día) |
|-----|-------------------|--------|----------------|-------|---|
| | | Grados | | | |
| 1 | 0.29 | 82.28 | 1.324 | 1.227 | 20.151 |
| 2 | 0.28 | 85.36 | 1.210 | 1.149 | 22.121 |
| 3 | 0.29 | 89.15 | 1.086 | 1.058 | 22.960 |
| 4 | 0.34 | 89.89 | 0.967 | 0.974 | 20.666 |
| 5 | 0.36 | 89.78 | 0.882 | 0.920 | 19.312 |
| 6 | 0.42 | 89.73 | 0.844 | 0.902 | 17.013 |
| 7 | 0.42 | 89.75 | 0.861 | 0.912 | 17.036 |
| 8 | 0.42 | 89.85 | 0.929 | 0.952 | 17.196 |
| 9 | 0.43 | 89.98 | 1.037 | 1.014 | 16.507 |
| 10 | 0.37 | 86.59 | 1.168 | 1.100 | 17.985 |
| 11 | 0.31 | 83.08 | 1.293 | 1.201 | 19.869 |
| 12 | 0.31 | 81.40 | 1.359 | 1.246 | 19.021 |

Tabla A5.4 Radiación sobre una superficie inclinada usando la correlación de Erbs para el cálculo de HD/H

| Mes | H _D /H | hss' | R _B | R | H _{incl} (MJ/m ² -día) |
|-----|-------------------|--------|----------------|-------|---|
| | | Grados | | | |
| 1 | 0.29 | 82.28 | 1.324 | 1.211 | 19.894 |
| 2 | 0.28 | 85.36 | 1.210 | 1.138 | 21.924 |
| 3 | 0.29 | 89.15 | 1.086 | 1.053 | 22.851 |
| 4 | 0.34 | 89.89 | 0.967 | 0.974 | 20.669 |
| 5 | 0.36 | 89.78 | 0.882 | 0.925 | 19.419 |
| 6 | 0.42 | 89.73 | 0.844 | 0.910 | 17.166 |
| 7 | 0.42 | 89.75 | 0.861 | 0.919 | 17.168 |
| 8 | 0.42 | 89.85 | 0.929 | 0.955 | 17.244 |
| 9 | 0.43 | 89.98 | 1.037 | 1.010 | 16.435 |
| 10 | 0.37 | 86.59 | 1.168 | 1.089 | 17.795 |
| 11 | 0.31 | 83.08 | 1.293 | 1.185 | 19.619 |
| 12 | 0.31 | 81.40 | 1.359 | 1.242 | 18.965 |

En valor de la radiación difusa sobre una superficie plana HD también se encuentra reportado en la pagina del Instituto de Geofísica de la UNAM, ese valor se usa para calcula el cociente HD/H. Los valores se presentan en la **Tabla A5.5**.

Tabla A5.5 Radiación sobre una superficie inclinada usando para el cálculo del cociente HD/H el valor de la radiación difusa sobre superficie plana HD reportada por el Instituto de Geofísica de la UNAM para el periodo 1984-2005.

| Mes | H _D (MJ/m ² -día) | H _D /H | R | H _{incl} (MJ/m ² -día) |
|-----|--|-------------------|-------|---|
| 1 | 4.86 | 0.30 | 1.225 | 20.128 |
| 2 | 5.54 | 0.29 | 1.147 | 22.094 |
| 3 | 6.23 | 0.29 | 1.058 | 22.963 |
| 4 | 7.76 | 0.37 | 0.974 | 20.668 |
| 5 | 8.40 | 0.40 | 0.923 | 19.378 |
| 6 | 9.07 | 0.48 | 0.911 | 17.168 |
| 7 | 9.06 | 0.49 | 0.920 | 17.176 |
| 8 | 8.97 | 0.50 | 0.956 | 17.254 |
| 9 | 8.41 | 0.52 | 1.008 | 16.410 |
| 10 | 6.97 | 0.43 | 1.090 | 17.808 |
| 11 | 5.28 | 0.32 | 1.196 | 19.795 |
| 12 | 4.86 | 0.32 | 1.241 | 18.949 |

En la **Tabla A5.6** se presenta una comparación de la radiación global sobre una superficie inclinada 20° obtenida por medio del cálculo del cociente HD/H con la correlación de Liu y Jordan, por la correlación de Erbs y cuando HD es conocida. Además se presenta el valor dado por el programa RETScreen para una superficie inclinada 20° en la Ciudad de México (no proporciona la radiación de acuerdo a la latitud por lo que es más general ya que solo tienen datos de radiación para algunas ciudades).

Tabla A5.6 Comparación de los valores de radiación sobre una superficie inclinada 20° obtenidos por diferentes medios.

| Mes | H_{incl} (MJ/m ² -día) | | | |
|-----|-------------------------------------|------------|-------|-----------|
| | H_D conocida | Liu Jordan | Erbs | RETScreen |
| 1 | 20.13 | 20.15 | 19.89 | 19.50 |
| 2 | 22.09 | 22.12 | 21.92 | 21.65 |
| 3 | 22.96 | 22.96 | 22.85 | 22.75 |
| 4 | 20.67 | 20.67 | 20.67 | 20.68 |
| 5 | 19.38 | 19.31 | 19.42 | 18.90 |
| 6 | 17.17 | 17.01 | 17.17 | 18.06 |
| 7 | 17.18 | 17.04 | 17.17 | 16.93 |
| 8 | 17.25 | 17.20 | 17.24 | 17.32 |
| 9 | 16.41 | 16.51 | 16.43 | 16.52 |
| 10 | 17.81 | 17.98 | 17.80 | 18.04 |
| 11 | 19.80 | 19.87 | 19.62 | 18.90 |
| 12 | 18.95 | 19.02 | 18.97 | 18.47 |

APÉNDICE 6

VALORES DE TEMPERATURA MEDIA PARA LA DELEGACIÓN BENITO JUÁREZ CORRESPONDIENTES A LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA "CAMPO EXP. COYOACÁN" DEL SISTEMA METEOROLÓGICO NACIONAL.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

NORMALES CLIMATOLÓGICAS

DISTRITO FEDERAL

PERIODO: 1981-2010

ESTACION: 00009070 CAMPO EXP. COYOACAN

LATITUD: 19°21'05" N.

LONGITUD: 099°10'20" W.

ALTURA: 2,260.0 MSNM.

| ELEMENTOS | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ANUAL |
|-------------------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|-------|
| Temperatura media | | | | | | | | | | | | | |
| Normal | 13.3 | 14.9 | 17 | 18.7 | 19.3 | 19.1 | 18 | 18.2 | 17.6 | 16.9 | 15.2 | 13.6 | 16.8 |
| AÑOS CON DATOS | 15 | 18 | 15 | 17 | 19 | 18 | 19 | 20 | 18 | 19 | 16 | 10 | |

Bibliografía

- 1) Balance Nacional de Energía. 2011. SENER, Dirección General de Planeación e Información Energéticas.
- 2) "Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda". Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda, CONAFOVI. 2006
- 3) Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México, PROCALSOL 2007-2012. CONAE-ANES-GTZ, Agosto 2007.
- 4) Dirección electrónica consultada en marzo de 2014.
http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/cronica_procalso_1
- 5) Dirección electrónica consultada en marzo de 2014.
<http://www.cmic.org/mnsectores/vivienda/2008/infonavit/hipotecaverde.htm>
- 6) Dirección electrónica consultada en marzo de 2014.
http://portal.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/infonavit/trabajadores/saber+para+de+cidir/cuido_mi_casa/ahorro+y+cuido+el+medio+ambiente
- 7) Revista Claridades agropecuarias N. 170, octubre 2007, revista mensual producida y editada por Apoyos y Servicios a la Comercialización agropecuaria, ASERCA, órgano desconcentrado de la SAGARPA <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas.asp>
- 8) Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-008-AMBT-2005 publicada en la Gaceta oficial del DF el 7 de abril de 2006.
http://www.icyt.df.gob.mx/documents/seminarios/energia_solar/norma_solar.pdf
- 9) Norma NMX-ES-001-NORMEX-2005. Rendimiento Térmico y Funcionalidad de Colectores Solares para Calentamiento de Agua. Métodos de prueba y etiquetado. NORMEX
<http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4506/2/nmxneso13.pdf>
- 10) Odon de Buen. Presentación para foro de medio ambiente, "El NESO 13 y sus NMX". Junio de 2009 descargado desde:
<http://www.sma.df.gob.mx/cclimatico/descargas/seminario2010/02odondebuen.pdf>
- 11) Página web consultada en marzo de 2014 <http://www.normex.com.mx/catalogo-de-normas>.
- 12) Norma NMX-ES-004-NORMEX-2010. Evaluación térmica de sistemas solares para calentamiento de agua – Método de ensayo (Prueba) NORMEX

-
- 13) Peuser Felix A, Remmers K.H, Schnauss M. Sistemas Solares Térmicos Diseño e instalación. Editorial Solarpraxis Censolar.
- 14) Budihardjo I, Morrison G.L. y Behnia M. Performance of Water-In-Glass Evacuated Tube Solar Water Heaters. School of Mechanical and Manufacturing Engineering. University of New South Wales, Sydney, Australia. Memorias ISES2005.
- 15) Hernandez, M Ricardo D. Determinación de los coeficientes de transferencia de calor para los tubos de vidrio evacuados sencillos y de doble apertura. Tesis de licenciatura Ingeniería en Energía, UAM-Iztapalapa. 2013
- 16) Nociones iniciales sobre calentamiento solar. Red Brasil de Capacitación en calentamiento solar consultado en <http://www.mesasolar.org.uy/archivos/Nocoos.pdf>
- 17) Pagina web de la ANES consultada en mayo 2014 en la Sección "Balance de energía" http://www.anes.org/anes/index.php?option=com_wrapper&Itemid=13
- 18) Prospectiva de energías renovables, SENER. 2013-2027.
- 19) Prospectiva del Mercado de Gas Licuado de Petróleo 2013-2027. SENER
- 20) Página web consultada en marzo de 2014
<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/09/09014.pdf>
- 21) Cabrera A. E., Franco P., Da Cunha Faria C.F. Manual de Energía Solar Térmica e instalaciones asociadas. Facultad de arquitectura. Universidad Ort de Uruguay. 2009 descargado desde la dirección electrónica:
<http://www.mesasolar.org.uy/archivos/manualweb.pdf>
- 22) Arroyo B. I. Selección, diseño y evaluación de un sistema de calentamiento solar de agua en un centro de educación superior. Tesis de licenciatura Ingeniería en Energía, UAM-Iztapalapa. 2011
- 23) Documento básico HE Ahorro de energía.
- 24) Manual técnico de Chromagen "Technical Manual Chromagen" descargado de:
http://www.blueskyenergy.net/files/technical_manual.pdf
- 25) Zabalza B. Ignacio, Aranda U. José Alfonso, Energía solar térmica, Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2009.
- 26) Duffie J.A. and Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd edn. Wiley Interscience, New York. 1991.

27) Sistemas Térmicos solares en Agronegocios. Fideicomiso de Riesgo Compartido, FIRCO, Marzo de 2012.

28) Tobajas, M. Carlos. Montaje y mantenimiento de instalaciones solares térmicas. Cano Pina S.L Ediciones Ceysa. 2012.

29) Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura, IDAE

30) Franco Pablo. Instalaciones de ACS de mediano y gran porte, presentación descargada desde el sitio web:

<http://imflores.gub.uy/descargas/Mesa%20Solar/IngQuimPabloFranco/Sistemas%20medianos%20y%20grandesIngPabloFranco.pdf>

31) Garg H.P. Advances in Solar Energy Technology. Volume 1. Collection and Storage Systems. Reidel Publishing Company, 1987.

32) Martín Domínguez I. R. Distribución de flujos en sistemas de colectores solares planos interconectados. 2008. Academia de Ingeniería de México.

33) Guerrero Gesto M. Caracterización experimental de un campo de captadores solares térmicos

Tesis de Master universitario en Ingeniería Energética en la Universidad de Oviedo, España, 2012.

34) Manual de instalación de colector Marca Extraflame

35) Muhlia V. Agustín, Sánchez F. Alfredo, Sierra C. Federico, Ramoneda R. Enrique. Requerimientos Mínimos para la Instalación de Sistemas Solares Térmicos para Calentamiento de agua de acuerdo a la Norma Ambiental del DF. Nov 2005.

36) Alternativas Financieras para la Promoción del Uso de Calentadores Solares de Agua (CSA) en el Sector Doméstico Mexicano. CONUEE. 2006

Otras referencias consultadas para este trabajo:

- Guía sobre aplicaciones de la energía solar térmica. SEDIGAS. 2013

- Guía de la Energía Solar. Madrid Solar. 2006. Dirección General de Industria, Energía y Minas, Consejería de economía e innovación tecnológica, Comunidad de Madrid. Caja Madrid Obra social.

-Kalogirou Soteris A. Solar Energy Engineering. Processes and Systems. Academic Press 2009.

- Revista Solar ANES. Marzo 2006.

- Especificaciones Técnicas Para Sistemas de Calentamiento de Agua con Energía Térmica Solar. FIRCO

- Manual del tubo y accesorios de cobre. Centro Español de Información del Cobre.
- Flores Salgado Y. L. Propuesta metodológica para el análisis técnico y económico del uso de calentadores de agua. Tesis de Maestría en Ingeniería en Sistemas. Facultad de Ingeniería UNAM, 2009.

- Ramos Rojas, A. Cálculo del sistema de precalentamiento solar instalado en el hospital general del IMSS ubicado en Tlajomulco de Zuñiga, Jalisco. Tesis de licenciatura en Ingeniería mecánica. UNAM. 2011.