



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE TRES SISTEMAS SOLARES  
TÉRMICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MECÁNICO

SEBASTIÁN HELLMUTH DAIBER ROJAS

PROFESOR GUÍA  
ROBERTO ROMÁN L.  
MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RAMÓN FREDERICK G.  
PATRICIO JORQUERA E.

**Santiago de Chile, Octubre 2009**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: SEBASTIÁN DAIBER R.  
FECHA: 16/12/2009  
PROF. GUÍA: SR. ROBERTO ROMÁN L.

## **ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE TRES SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS**

La importancia alcanzada por los sistemas solares térmicos en el ámbito nacional se refleja en que al año 2006 ya existían más de 20 empresas dedicadas a este rubro en nuestro país. Sin embargo, las normativas actuales no aseguran la calidad de las instalaciones solares térmicas. Tampoco se cuenta con información cuantitativa sobre el funcionamiento de las instalaciones solares que se encuentran operando en Chile. Para enfrentar esta situación, la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), ha impulsado la generación de este estudio (entre otros) y ha apoyado su desarrollo, proporcionando recursos y ayudando con gestiones necesarias para realización del proyecto.

En este trabajo de memoria se analiza el desempeño de tres sistemas solares térmicos desarrollados por empresas nacionales y que están en funcionamiento actualmente. Los sistemas mencionados están dedicados a la generación de agua caliente sanitaria y se tratan de un hogar particular y dos edificios residenciales, de los cuales uno funciona con colectores solares de tipo tubo al vacío y el otro con colectores solares planos. El desempeño de los sistemas solares se analiza en base a la energía térmica útil aportada en relación con la radiación solar incidente sobre el plano de los colectores. Para determinar estas magnitudes se han realizado series de mediciones a los sistemas bajo distintas condiciones de radiación y temperatura ambiente.

Los resultados obtenidos demuestran que los factores que más afectan el desempeño son el sistema de control y el caudal por el circuito solar. Resulta esencial que los ciclos de operación de la bomba de circulación no sean intermitentes. Si hay interrupciones, el rendimiento global puede caer a la mitad con respecto a un sistema bien regulado. En los casos analizados se observó que la captación solar puede superar el 50 % en un día de invierno. Si la regulación no es adecuada, la captación diaria cae por debajo del 30 %. Si el sistema de control está mal regulado, es perfectamente posible que en días que podría haberse captado energía, el aporte solar sea nulo porque la bomba circuladora no parte. El ideal sería tener bombas circuladoras de caudal variable, que se ajuste a las condiciones de radiación solar diarias.

El trabajo demostró que para tener un buen sistema solar son esenciales: buenos componentes, buena ingeniería e instalación y un sistema de control adecuado.

*A mis padres y hermanos.*

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, quienes supieron darme las herramientas para poder empezar este camino y que, junto a mis hermanos, siempre me han apoyado y acompañado. Sé que nunca dejarán de estar ahí.

A toda la familia Daiber, la familia Hoppe y los innumerables amigos que han salido a darnos una mano, no sólo a mi sino que también a mi familia, en los momentos más difíciles. Sin su ayuda nada de esto hubiera sido posible.

Al profesor Roberto Román, quien ha sido un guía y una inspiración, y cuya paciencia y comprensión son admirables.

A todos los profesionales y las empresas que colaboraron en este proyecto: Chilectra, Cypco y la Corporación de Desarrollo Tecnológico.

Por último, no puedo dejar de saludar a todos los profesores y funcionarios de la Universidad de Chile, en particular a los del Departamento de Ingeniería Mecánica, quienes fueron responsables de entregarme una formación de excelencia y de brindarme una experiencia universitaria inigualable.

# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Objetivo General . . . . .   | 1         |
| 1.2. Objetivos Específicos . . . . .                                    | 2         |
| 1.3. Alcances . . . . .   | 2         |
| 1.4. Limitaciones . . . . .   | 2         |
| <b>2. Antecedentes Bibliográficos</b>                                   | <b>3</b>  |
| 2.1. Antecedentes Generales . . . . .                                   | 3         |
| 2.2. Clasificación de Sistemas Solares Térmicos . . . . .               | 3         |
| 2.3. Descripción General de un Sistema Solar Térmico . . . . .          | 4         |
| 2.4. Desempeño de los Colectores Solares . . . . .                      | 6         |
| 2.4.1. Eficiencia Térmica . . . . .                                     | 6         |
| 2.4.2. Correlaciones para la Eficiencia Térmica de Colectores . . . . . | 7         |
| 2.5. Métodos Estándar de Caracterización . . . . .                      | 8         |
| <b>3. Equipos de Medición</b>   | <b>9</b>  |
| 3.1. Datos Climáticos Adicionales . . . . .                             | 9         |
| <b>4. Metodología Específica</b>  | <b>11</b> |
| 4.1. Selección de Sistemas a Estudiar . . . . .                         | 11        |
| 4.2. Caracterización de los Sistemas Elegidos . . . . .                 | 11        |
| 4.3. Definición de Variables a Medir . . . . .                          | 12        |
| 4.3.1. Estimación del Caudal en Circuito Primario . . . . .             | 13        |
| 4.4. Instalación de Equipos de Medición . . . . .                       | 13        |
| 4.4.1. Mediciones de Temperatura . . . . .                              | 14        |
| 4.4.2. Mediciones de Radiación Solar . . . . .                          | 14        |
| <b>5. Vivienda Unifamiliar</b>  | <b>16</b> |
| 5.1. Descripción del Sistema . . . . .                                  | 16        |

## ÍNDICE

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 5.1.1.    | Características Técnicas de los Componentes Principales del Sistema Solar . . . . . | 18        |
| 5.1.2.    | Configuración del Control del Sistema Solar . . . . .                               | 20        |
| 5.2.      | Mediciones Realizadas en Vivienda Unifamiliar . . . . .                             | 21        |
| 5.3.      | Resultados Vivienda Unifamiliar . . . . .   | 27        |
| 5.3.1.    | Energía Entregada por el Sistema Solar . . . . .                                    | 28        |
| 5.3.2.    | Resultados Diarios . . . . .  | 29        |
| <b>6.</b> | <b>Edificio Amazonía</b>  | <b>31</b> |
| 6.1.      | Descripción del Sistema . . . . .   | 31        |
| 6.1.1.    | Características Técnicas de los Componentes Principales del Sistema Solar . . . . . | 33        |
| 6.1.2.    | Configuración del Sistema Solar . . . . .   | 35        |
| 6.2.      | Mediciones Realizadas en Edificio Amazonía . . . . .                                | 37        |
| 6.3.      | Resultados Edificio Amazonía . . . . .  | 40        |
| 6.3.1.    | Resultados Diarios . . . . .  | 41        |
| <b>7.</b> | <b>Edificio Spazio</b>  | <b>44</b> |
| 7.1.      | Proyecto Edificio Spazio . . . . .  | 44        |
| 7.1.1.    | Circuito Solar Primario . . . . .   | 48        |
| 7.1.2.    | Características Técnicas de los Componentes Principales del Sistema Solar . . . . . | 48        |
| 7.2.      | Mediciones Realizadas en Edificio Spazio . . . . .                                  | 50        |
| 7.3.      | Resultados Edificio Spazio . . . . .  | 55        |
| <b>8.</b> | <b>Conclusiones y Recomendaciones</b>   | <b>59</b> |
| <b>9.</b> | <b>Bibliografía</b>   | <b>61</b> |
| <b>A.</b> | <b>Datos de Radiación Externos</b>  | <b>63</b> |

## Capítulo 1

### Introducción

El mercado de la energía solar térmica ha tenido un rápido crecimiento en Chile durante los últimos años. A fines del año 2006 ya existían una veintena de empresas de servicios solares en Chile, algunas de ellas dedicadas exclusivamente a este rubro [3], y ese número ha aumentado considerablemente hasta el año 2009. La publicación de la ley 20.365 que establece una franquicia tributaria respecto de sistemas solares térmicos [1] promete impulsar aún más la instalación de este tipo de sistemas en viviendas unifamiliares y multifamiliares. Sin embargo, la normativa existente en el país no parece desarrollarse a la par del crecimiento del mercado, ya que no existen exigencias sobre las características técnicas mínimas que debe cumplir una instalación solar. Es por esto que la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT), organismo sin fines de lucro que depende de la Cámara Chilena de la Construcción, ha trabajado para identificar e impulsar las buenas prácticas en la implementación de sistemas solares térmicos. Algunos ejemplos de esta determinación son el desarrollo del documento "Sistemas Solares Térmicos, Manual de diseño para el calentamiento de agua" y la implementación del programa "Nodo Solar". En relación con este trabajo de título, el concepto de analizar el desempeño de sistemas solares térmicos instalados (y en funcionamiento) en Chile también emana de la CDT, contando además con su apoyo para realización de este proyecto.

#### 1.1. Objetivo General

En esta memoria se analizará el desempeño de 3 proyectos solares térmicos que se encuentran en funcionamiento en el territorio nacional, con el propósito de cuantificar sus aportes energéticos mediante mediciones in-situ. Tales proyectos corresponden a una vivienda unifamiliar y dos edificios residenciales.

## 1.2. Objetivos Específicos

- Para cada proyecto seleccionado se determinará:
  1. La energía útil aportada por el sistema solar.
  2. La eficiencia térmica del sistema solar, calculada como la razón entre la energía solar incidente sobre los colectores y la energía útil aportada por el sistema solar.

## 1.3. Alcances

Los alcances de este proyecto se limitarán al estudio de los sistemas solares térmicos elegidos. No se realizarán intervenciones sobre los sistemas solares más allá de lo necesario para efectuar las mediciones. En el caso de que se identifiquen falencias en el diseño o la operación de alguno de los sistemas estudiados, sólo se formularán sugerencias generales sobre las posibles opciones para corregir estas falencias. No se estudiará la implementación de las sugerencias que se mencionen.

## 1.4. Limitaciones

Las mediciones que se realicen estarán enfocadas sólo a la parte solar de cada sistema. No se medirán los aportes energéticos de otros sistemas complementarios, como cálefontes, calderas, etc.



## Capítulo 2

### Antecedentes Bibliográficos

#### 2.1. Antecedentes Generales

La norma chilena NCh2904 [8] define un colector solar como un «*dispositivo diseñado para absorber radiación solar incidente y transferir la energía térmica así producida a un fluido que pasa a través de él*». Incluidos en esta definición se encuentran los colectores con concentración de la energía solar (por ejemplo, mediante un espejo parabólico) y aquellos sin concentración. En este trabajo sólo se estudiarán colectores solares sin concentración de energía solar, que son los que normalmente se utilizan en aplicaciones domiciliarias e industriales. Lo anterior se debe a que los colectores sin concentrador alcanzan temperaturas mucho menores que aquellos con concentrador, lo que hace que sean dispositivos de menor precio y menor complejidad.

#### 2.2. Clasificación de Sistemas Solares Térmicos

Según la norma ISO 9459-2 (1997) [13], los sistemas solares térmicos domésticos se clasifican de acuerdo a los siguientes siete atributos:

1. *Atributo 1*: (a) solamente solar, (b) precalentamiento solar, (c) solar más suplementario.
2. *Atributo 2*: (a) directo, (b) indirecto.
3. *Atributo 3*: (a) abierto, (b) ventilado, (c) cerrado.
4. *Atributo 4*: (a) lleno, (b) drenaje con retorno, (c) drenaje sin retorno.
5. *Atributo 5*: (a) termosifón, (b) circulación forzada.
6. *Atributo 6*: (a) circulante, (b) conectado en serie.

7. *Atributo 7*: (a) almacenado remoto, (b) almacenamiento cerrado-acoplado, (c) colector-acumulador integral.

Una descripción completa de cada atributo se puede encontrar en la referencia [13], mientras que la traducción se extrajo de la norma chilena NCh2904 [8].

## 2.3. Descripción General de un Sistema Solar Térmico

Los sistemas solares térmicos estudiados en este trabajo están orientados a la generación de agua caliente sanitaria (ACS). Los componentes principales se enuncian a continuación:

- Sistema de captación: Corresponde a los colectores solares del sistema.
- Fluido térmico: Es el fluido que circula por los colectores, recibiendo la energía que es captada por éstos. El fluido térmico puede ser simplemente agua potable o puede contener una mezcla de anticongelante. A las cañerías que contienen el fluido térmico se les denomina "*Circuito Solar Primario*".
- Acumulación: Estanque donde se acumula la energía generada durante el día por el sistema solar, en forma de agua caliente.
- Piping: Todas las cañerías y sus conexiones existentes en el sistema.
- Bomba de circulación.
- Estanque de expansión: Elemento que sirve para absorber las variaciones de volumen que se producen en el fluido térmico debido a los aumentos y disminuciones de temperatura a lo largo del día, manteniendo la presión relativamente constante.
- Intercambiador de calor.
- Equipo de control o controlador solar.
- Válvula de seguridad: Se refiere a la válvula de alivio de presión, la cual se abre automáticamente al sobrepasar la presión a la que está tarada y que determina la presión máxima del sistema solar. Otros elementos de seguridad serán referidos por sus nombres específicos.

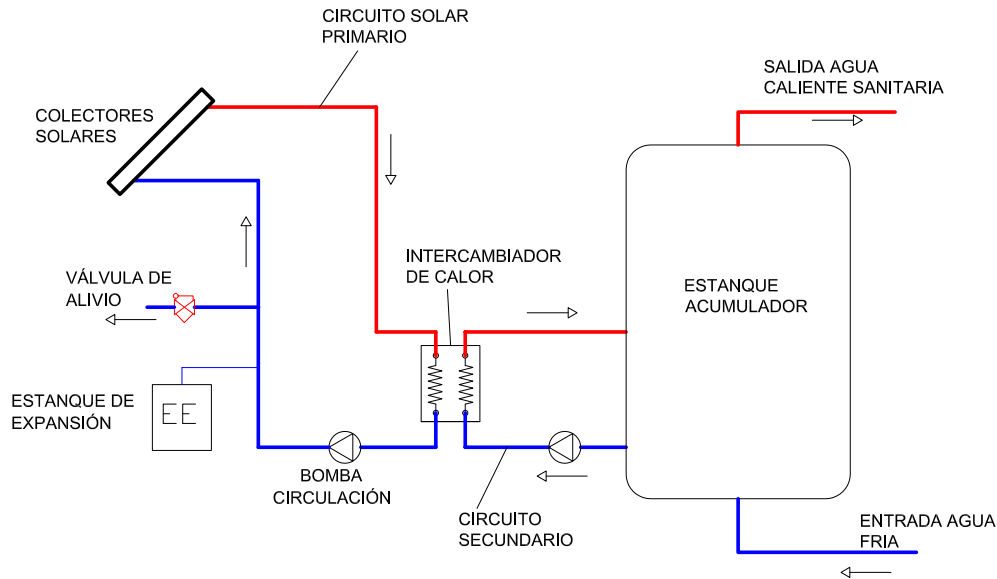


Figura 2.1: Diagrama esquemático de un sistema solar térmico.

Como se observa en la Figura 2.1, el fluido térmico es impulsado por la bomba de circulación y es forzado a través de los colectores, donde recibe la energía proveniente de la radiación solar. Luego, el fluido térmico pasa por el intercambiador de calor, donde entrega energía al agua sanitaria y después vuelve a la bomba, donde se cierra el ciclo.

Además de los componentes mencionados anteriormente, se definen los siguientes conceptos asociados a un sistema solar térmico:

- Circuito solar primario: Circuito que contiene el fluido térmico del sistema solar.
- Circuito secundario: Circuito que contiene el agua sanitaria que recibe energía proveniente del circuito solar primario.
- Retorno solar: Entrada del fluido térmico al intercambiador (lado caliente del circuito solar primario).
- Surtido solar: Salida del fluido térmico del intercambiador (lado frío del circuito solar primario).

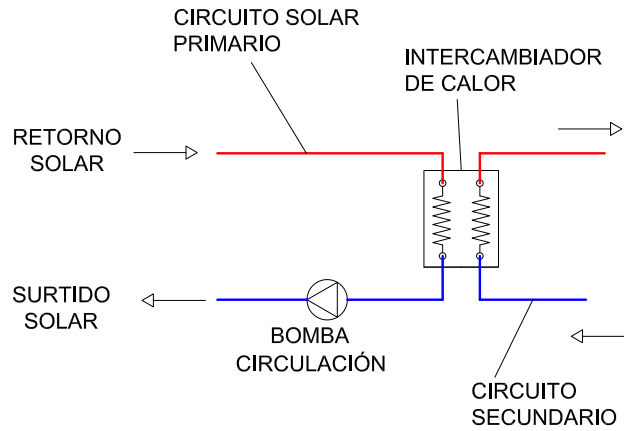


Figura 2.2: Diagrama esquemático del surtido y el retorno solar.

## 2.4. Desempeño de los Colectores Solares

### 2.4.1. Eficiencia Térmica

La eficiencia térmica del colector,  $\eta_{COL}$ , se define como la razón entre la energía útil producida por el colector y la energía total en forma de radiación que incide sobre el área de absorción del colector. Estos valores son expresados en términos diarios.

$$\eta_{COL} = \frac{Q_U \left[ \frac{kWh}{dia} \right]}{Q_{SOLAR} \left[ \frac{kWh}{dia} \right]} = \frac{Q_U \left[ \frac{kWh}{dia} \right]}{G_t \left[ \frac{kWh}{m^2 dia} \right] A_A \left[ m^2 \right]} \quad (2.1)$$

Donde:

- $Q_U \left[ \frac{kWh}{dia} \right]$  = Energía útil generada por un colector.
- $Q_{SOLAR} \left[ \frac{kWh}{dia} \right]$  = Energía solar incidente sobre el plano del colector solar.
- $G_t \left[ \frac{kWh}{m^2 dia} \right]$  = Irradiancia total incidente sobre la superficie del colector solar.
- $A_A \left[ m^2 \right]$  = Área de apertura del colector solar.

En este trabajo se estudiarán sistemas solares completos, que pueden estar compuestos por varios colectores, equipos auxiliares y todo el piping asociado al sistema solar. Por lo tanto se desea

conocer el rendimiento del sistema solar en su totalidad, el cual está definido como:

$$\eta_{SIST} = \frac{Q_{U,SIST} \left[ \frac{kWh}{dia} \right]}{Q_{SOLAR} \left[ \frac{kWh}{dia} \right]} = \frac{Q_U \left[ \frac{kWh}{dia} \right] - Q_{PERD,SIST} \left[ \frac{kWh}{dia} \right]}{G_t \left[ \frac{kWh}{m^2 dia} \right] A_A [m^2]} \quad (2.2)$$

Donde:

- $Q_{PERD,SIST} \left[ \frac{kWh}{dia} \right]$  = Todas las pérdidas térmicas del sistema solar. En este término no se incluyen los consumos energéticos parásitos, como bombas y equipos de monitoreo y control.
- $Q_{U,SIST} \left[ \frac{kWh}{dia} \right]$  = Energía aportada por el sistema solar.

#### 2.4.2. Correlaciones para la Eficiencia Térmica de Colectores

Aún no existe consenso sobre un método para predecir la eficiencia térmica de un colector solar, sin embargo, las normas ISO, ASHRAE y EN son las más importantes al momento de caracterizar estos equipos. Las normativas chilenas se basan en sus pares ISO.

La norma *EN 12975-2:2006* [14] define la siguiente relación para la dependencia del rendimiento de un colector con factores meteorológicos y del sistema:

$$\eta((G), (t_m - t_a)) = \eta_0 - a_1 \frac{t_m - t_a}{G} - a_2 \frac{(t_m - t_a)^2}{G} \quad (2.3)$$

$$t_m = \frac{(t_e + t_s)}{2}$$

donde:

- $G$  = Irradiación total sobre el área del colector en  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$ .
- $t_e$  = Temperatura de entrada del colector en  $[^{\circ}C]$ .
- $t_s$  = Temperatura de salida del colector en  $[^{\circ}C]$
- $t_a$  = Temperatura ambiente en  $[^{\circ}C]$ .

Además,  $\eta_0, a_1$  y  $a_2$  son los coeficientes que definen a cada colector y tienen los siguientes significados:

- $\eta_0$  = Eficiencia del colector sin pérdidas de calor al ambiente, lo que significa que la temperatura del fluido en el colector es igual a la del ambiente, o sea:  $t_m = t_a$ .

- $a_1$  = Coeficiente lineal de pérdida de calor del colector en  $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$ .
- $a_2$  = Coeficiente cuadrático de pérdida de calor del colector en  $[\frac{W}{m^2 \cdot K^2}]$ .

## 2.5. Métodos Estándar de Caracterización

A continuación se mencionan algunas de las normas más utilizadas para determinar el comportamiento de colectores solares [12].

- Ashrae 93-2003, «Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors (ANSI Approved)»
- ISO 9459-1:1993, «Solar heating. Domestic water heating systems. Part 1: Performance rating procedure using indoor test methods»
- ISO 9459-2:1995, «Solar heating. Domestic water heating systems, Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems»
- EN 12975-2:2006, «Thermal solar systems and components, Solar collectors, Part 2: Test methods»

Existen otras normas, tanto de organismos internacionales de normalización como las utilizadas en países como España (aenor) y Alemania (DIN), que están basadas en las normas mencionadas anteriormente. En el caso de Chile, las normas que han sido publicadas por el Instituto Nacional de Normalización están basadas en las normas ISO.

Los procedimientos descritos en las normas mencionadas requieren mucho tiempo y recursos, ya que se debe esperar a que se produzcan condiciones climáticas específicas y las series de datos deben cumplir con varios requisitos para ser consideradas como representativas. Esto se debe a que el objetivo de estos métodos es encontrar las variables representativas de los equipos para poder predecir su comportamiento bajo distintas condiciones. No resultaría posible realizar rigurosamente las pruebas descritas en ninguna de las normas sobre los equipos que se estudiarán. Sin embargo, en este trabajo sólo se desea comprobar si el funcionamiento de las instalaciones solares completas es el deseado.

## Capítulo 3

### Equipos de Medición

Para realizar las mediciones se requiere de equipos de medición y equipos de registro de datos. Estos equipos son costosos, y para realizar ese proyecto se contó con el auspicio de la empresa *Chilectra S.A.*, el cual se consiguió a través de una gestión apoyada por la CDT y la división *Solar Electric* de *Chilectra*. El equipo facilitado por *chilectra* fue el Data Logger Omega, el cual debió ser importado desde Estados Unidos debido a la escasa oferta (y elevados precios) presente en el mercado nacional. También fue esencial el apoyo del profesor Roberto Román, quién suministró un sensor de radiación de alta calidad junto con un equipo adicional de registro de datos marca *Hobo*. Los sensores de temperatura fueron fabricados por el alumno con cable de termocupla adquirido en *Veto S.A.*

Los equipos utilizados fueron los siguientes:

1. Equipo de registro de datos: (*Data Logger*) marca *Omega*, modelo *OM-DAQPRO-5300*.
2. Equipo de registro de datos: (*Data Logger*) marca *Hobo*, modelo *U12-013*.
3. Sensores de temperatura: 4 termocuplas tipo T.
4. Sensor de radiación solar: Piranómetro marca *apogee*, modelo *PYR-SA 2.5*.

#### 3.1. Datos Climáticos Adicionales

En caso de requerir datos climáticos adicionales, se consultará la base de datos de la estación meteorológica del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, la cual se encuentra disponible a través de internet.



Figura 3.1: Piranómetro marca *apogee*, modelo *PYR-SA 2.5*. Imagen obtenida del catálogo del equipo.



Figura 3.2: Equipo Data Logger marca Omega, modelo DaqPro 5300. Imagen obtenida del catálogo del equipo.



## Capítulo 4

### Metodología Específica

#### 4.1. Selección de Sistemas a Estudiar

La primera parte de este trabajo ha consistido en elegir los los sistemas solares para analizar. En un principio, se contó con los siguientes sistemas como posibles candidatos:

1. Edificio Amazonía, generación de agua caliente sanitaria.
2. Edificio Spazio, generación de agua caliente sanitaria.
3. Vivienda unifamiliar en la comuna de Huechuraba, generación de agua caliente sanitaria.
4. Colegio Alemán de Santiago (Deutsche Schule Santiago), agua caliente sanitaria para duchas de gimnasio.
5. Viña Gracia, generación de agua caliente para procesos.

De entre los posibles candidatos se eligieron 3 sistemas. El sistema de Viña Gracia fue desechado debido a su lejanía con Santiago (la instalación esta ubicada en las cercanías de Rancagua) y las dificultades que esta situación implica. Luego, se eligieron los tres sistemas que producen agua caliente sanitaria para viviendas: Edificio Amazonía, Edificio Spazio y la vivienda unifamiliar. Esta decisión se tomó con el objetivo de estudiar sistemas comparables entre sí. El estudio de los dos edificios es de especial interés, ya que uno cuenta con la tecnología de tubos al vacío y el otro con colectores de placa plana.

#### 4.2. Caracterización de los Sistemas Elegidos

Se realizó una caracterización de los sistemas elegidos, de manera de obtener la mayor cantidad de información posible sobre estos. En este sentido, se realizaron las siguientes tareas:

- Descripción de los equipos principales que conforman el sistema solar: colectores solares, intercambiador de calor, bombas, estanque de acumulación y equipos de control.
- Se generaron planos de Layout de las instalaciones.
- Se analizó la lógica de funcionamiento y de control de los sistemas.

### 4.3. Definición de Variables a Medir

Como se ha definido en la ecuación (2.2), la eficiencia global del sistema solar se puede definir en base a la radiación solar incidente y la energía útil que entrega el sistema solar. La radiación solar incidente se mide directamente con un piranómetro, mientras que la energía útil se debe calcular en base al diferencial de temperatura del fluido térmico del circuito solar primario en el intercambiador de calor.

$$\dot{Q}_{U,SIST} = \Delta T \cdot \dot{m} \cdot C_p \quad (4.1)$$

Donde:

$$\Delta T = T_{e,IC} - T_{s,IC} \quad (4.2)$$

- $Q_{U,SIST}$  = energía útil entregada por el sistema solar, en [W].
- $T_{e,IC}$  = temperatura del fluido térmico del circuito solar primario a la entrada del intercambiador de calor, en [°C].
- $T_{s,IC}$  = temperatura del fluido térmico del circuito solar primario a la salida del intercambiador de calor, en [°C].
- $\dot{m}$  = caudal másico en el circuito solar primario, en [kg/s].
- $C_p$  = capacidad térmica del fluido térmico, en [J/kgK].

Dado que en todos los sistemas estudiados se utilizan bombas de velocidad constante, el caudal en el circuito primario es siempre el mismo mientras esté funcionando la bomba. Por esta razón, en lugar de medir directamente el caudal, la variable de medición será el tiempo de funcionamiento de la bomba. El caudal se debe estimar de forma indirecta, ya que no resulta posible insertar un caudalímetro en cada uno de los sistemas estudiados, principalmente por falta de recursos para

comprar el equipo y realizar la instalación. Por otro lado, la presencia de un caudalímetro en la línea produce, desde un punto de vista hidráulico, una pérdida de carga adicional en el circuito, lo que altera el punto de equilibrio del sistema y en definitiva disminuye el caudal en comparación con el circuito sin caudalímetro.

#### 4.3.1. Estimación del Caudal en Circuito Primario

Para estimar el caudal en el circuito solar primario se utilizarán la ecuación de eficiencia del colector solar 2.3. A través de las mediciones realizadas se tendrán los datos de temperaturas y radiación solar suficientes para calcular la eficiencia del colector. Luego, el caudal se calculará según la siguiente función:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{\Delta T \cdot C_p} = \frac{\eta \cdot G \cdot A_A \cdot n}{\Delta T \cdot C_p} \quad (4.3)$$

Donde:

- $\dot{m}$  = caudal que circula por un colector, en  $[kg/s]$ .
- $\dot{Q}$  = potencia del colector, en  $[W]$ .
- $\Delta T$  = diferencia de temperatura entre la entrada y salida del colector, en  $[^{\circ}C]$ .
- $\eta$  = eficiencia del colector.
- $G$  = radiación incidente sobre el colector, en  $[W/m^2]$ .
- $A_A$  = área de apertura del colector, en  $[m^2]$ .
- $n$  = número de colectores conectados en serie.

#### 4.4. Instalación de Equipos de Medición

Los datos que se registren serán guardados en dos equipos de registro o Data Loggers: el equipo Omega y el equipo Hobo. El equipo Omega cuenta con 8 canales de medición, por lo que éste se usará para registrar las temperaturas en el intercambiador de calor del circuito solar y en el estanque de acumulación. El equipo Hobo tiene dos canales de medición y estará conectado con el sensor de radiación, en la zona de los colectores solares. El equipo Hobo también medirá la temperatura ambiente y la humedad relativa.

#### 4.4.1. Mediciones de Temperatura

Para medir las temperaturas en los circuitos primario y secundario se utilizarán termocuplas tipo "T" (cobre-constantán). Para armar las termocuplas se ha adquirido una tira de cable para termocupla tipo T, la cual se ha dividido en cuatro (para cuatro mediciones).

Para hacer una termocupla, se debe tomar un extremo del cable correspondiente y se deben desnudar dos puntas de aproximadamente 3 centímetros (el cobre y el constantán). Los dos alambres se lijan con una lija fina para eliminar las posibles suciedades u óxido que pudiera existir. Luego se sueldan los dos alambres, cuidando que los alambre no se topen en ningún otro punto que no sea la punta que se ha soldado. En este caso se ha utilizado soldadura de estaño. Finalmente, el extremo del cable con los dos alambres soldados se instala en el punto de medición de temperatura y el extremo con los cables libres se conecta al Data Logger, cuidando de mantener la polaridad de los cables. El cobre debe conectarse en el terminal positivo y el constantán en el negativo y nuevamente se debe tener la precaución de que los dos alambres no se toquen. El Data Logger Omega viene calibrado desde la fábrica para distintos tipos de sensores, en particular para termocuplas tipo T, por lo que no es necesario volver a calibrar el equipo.

Se medirán temperaturas del fluido térmico en el circuito primario y del agua sanitaria en el circuito secundario. Como no será posible insertar las termocuplas para que queden en contacto directo con el fluido cuya temperatura se desea medir, se instalará cada termocupla en la pared externa de la cañería y luego se cubrirá con aislación térmica para temperatura que mida el sensor se lo más cercano posible a la temperatura del fluido. Los cables de termocuplas no deben quedar en contacto con líneas de electricidad, para evitar el deterioro de la señal de temperatura. Además, cuando la termocupla se instale en una cañería de cobre, se debe evitar que las corrientes galvánicas ensucien la medición cubriendo la termocupla con cinta adhesiva.

#### 4.4.2. Mediciones de Radiación Solar

La radiación solar será medida con un piranómetro, el cual será ubicado en el mismo plano de los colectores para registrar la radiación global (directa + difusa) que incide sobre la superficie de los colectores. El piranómetro envía una señal de voltaje, la cual será registrada por el Data Logger Hobo. La señal de voltaje será transformada en energía [ $W/m^2$ ] mediante una constante de conversión indicada por el fabricante del equipo. Por último, según lo indicado por el fabricante, el cable de salida del piranómetro debe estar orientado hacia el polo magnético más cercano (hacia el sur en este caso) para minimizar errores en la medición.



Figura 4.1: Orientación del piranómetro. Imagen obtenida del catálogo del equipo.

El equipo Hobo debe situarse en un lugar protegido de la lluvia, pero en contacto con el aire del ambiente, ya que también registrará la temperatura y la humedad relativa del aire.

## Capítulo 5

### Vivienda Unifamiliar

#### 5.1. Descripción del Sistema

Se ha estudiado la instalación solar presente en el hogar de Rolf Sielfeld, ubicada en la comuna de Huechuraba, Santiago y en la cual viven 3 personas. Esta instalación cuenta con dos colectores de placa plana de la marca Chromagen, modelo CR120, y se utiliza para proveer de agua caliente sanitaria al hogar. El sistema cuenta con un tanque de acumulación especial para aplicaciones solares, el cual tiene incorporada con una resistencia eléctrica en la parte superior, la cual se encarga de suplir la energía necesaria en los días poco soleados. Durante la mayor parte del verano, el sistema de respaldo eléctrico no tiene necesidad de funcionar.

Este es el sistema más simple de todos los estudiados en este trabajo, debido a sus dimensiones reducidas con respecto al resto, sin embargo su importancia radica en que este tipo de instalaciones puede llegar a instalarse en forma masiva en los hogares chilenos. En la figura 5.1 se muestra el diagrama general de la conexión hidráulica del sistema solar.

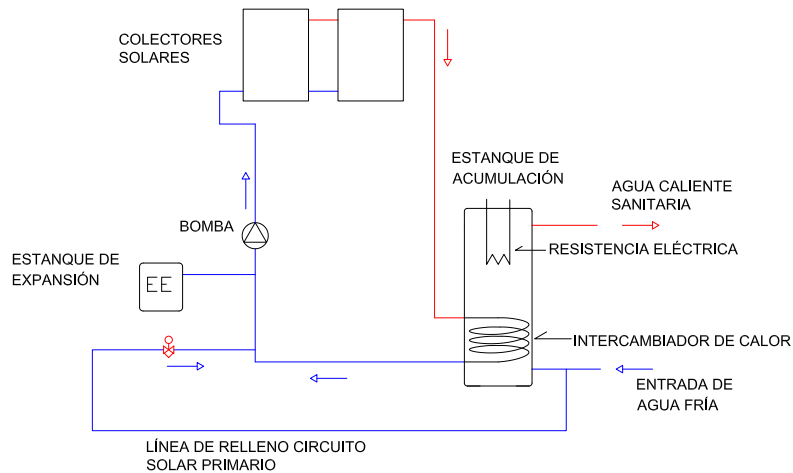


Figura 5.1: Diagrama general de la instalación, vivienda unifamiliar



Figura 5.2: Colectores solares Vivienda Unifamiliar

Los dos colectores planos están conectados en paralelo y se encuentran ubicados en el techo de la vivienda, con un ángulo de inclinación de  $15,8^\circ$  y una orientación con respecto al norte de  $20^\circ$  hacia el oriente (azimut de  $-20^\circ$ ). El intercambiador de calor es del tipo serpentín sumergido y es parte del estanque acumulador. El volumen de acumulación es de 300 litros.

Tabla 5.1: Características generales de la instalación solar, vivienda unifamiliar.

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| Cantidad de colectores:                           | 2                             |
| Cantidad de habitantes:                           | 3                             |
| Área total de apertura:                           | 5,12 [m <sup>2</sup> ]        |
| Volumen total de acumulación:                     | 300 [lt]                      |
| Área de apertura por habitante:                   | 1,7 [m <sup>2</sup> /persona] |
| Volumen de acumulación por habitante:             | 100 [lt/persona]              |
| Relación volumen de acumulación/área de apertura: | 58,6 [lt/m <sup>2</sup> ]     |

### 5.1.1. Características Técnicas de los Componentes Principales del Sistema Solar

#### Características Técnicas de los Colectores Solares

Tabla 5.2: Características principales de colectores, vivienda unifamiliar.

| <b>Dimensiones Generales</b>          |                    |                               |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Fabricante:                           | <i>Chromagen</i>   |                               |
| Modelo:                               | <i>CR120</i>       |                               |
| Tipo de colector:                     | <i>Placa plana</i> |                               |
| Área total:                           | 2,814              | [m <sup>2</sup> ]             |
| Área de apertura:                     | 2,56               | [m <sup>2</sup> ]             |
| <b>Constantes curva de eficiencia</b> |                    |                               |
| $\eta_0$                              | 70,4               | %                             |
| $a_1$                                 | 1,7983             | [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]   |
| $a_2$                                 | 0,0470             | [ $\frac{W}{m^2 \cdot K^2}$ ] |



### Características Técnicas del Estanque Acumulador

Tabla 5.3: Características técnicas de estanque acumulador, vivienda unifamiliar.

| <b>Características Generales</b>        |                            |                   |
|---|----------------------------|-------------------|
| Fabricante:                             | <i>Chromagen</i>           |                   |
| Modelo:                                 | 300V                       |                   |
| Capacidad:                              | 300                        | [lt]              |
| <b>Intercambiador de calor</b>          |                            |                   |
| Tipo:                                   | <i>Serpentín sumergido</i> |                   |
| Área de intercambio:                    | 1,24                       | [m <sup>2</sup> ] |
| Volumen:                                | 6,7                        | [lt]              |
| Material:                               | <i>Cobre</i>               |                   |
| Diámetro nominal:                       | 3/4                        | [in]              |
| <b>Resistencia eléctrica (respaldo)</b> |                            |                   |
| Potencia nominal:                       | 2,5                        | [kW]              |

El estanque acumulador cuenta con su propio sistema de control para manejar el funcionamiento del sistema de apoyo eléctrico. El usuario puede manejar la temperatura objetivo que desea para el agua caliente almacenada a través de un termostato en la parte superior del estanque. Cuando el sensor de temperatura interno del equipo alcanza la temperatura deseada, se detiene el funcionamiento del apoyo eléctrico.

### Características Técnicas de otros Componentes

Tabla 5.4: Características generales de otros componentes, vivienda unifamiliar.

| <b>Bomba Circulación Circuito Solar</b> |                                       |
|---|---------------------------------------|
| Fabricante:                             | Salmson                               |
| Modelo:                                 | <i>NXL33 – 251</i>                    |
| Tipo:                                   | Bomba de circulación para calefacción |
| <b>Controlador</b>                      |                                       |
| Fabricante:                             | Resol                                 |
| Modelo:                                 | Delta Sol AX                          |
| <b>Estanque de Expansión</b>            |                                       |
| Fabricante:                             |                                       |
| Capacidad:                              |                                       |
| Tipo:                                   |                                       |
| Presión Precarga:                       |                                       |

La bomba de circulación del circuito solar primario tiene tres velocidades de funcionamiento. En el momento de las mediciones, la bomba se encontraba funcionando en la posición número 3 (la más alta).

El controlador digital marca Resol, modelo DeltaSol AX, está diseñado específicamente para sistemas solares térmicos. Este controlador tiene capacidad de recibir dos señales de temperatura y enviar una señal de «*relay*».

#### 5.1.2. Configuración del Control del Sistema Solar

En la figura 5.3 se muestra el diagrama del sistema de control del sistema solar. Como se puede observar, la bomba de circulación solar está controlada por el controlador solar, mientras que el respaldo eléctrico se controla por el sistema interno del estanque acumulador. Los puntos marcados como *T1* y *T2* corresponden al *sensor 1* y *sensor 2* del controlador respectivamente. La temperatura del estanque acumulador está regulada en  $50^{\circ}C$ .

La configuración del controlador es la siguiente:

- Diferencia de temperatura para encendido de la bomba:  $5K$ .

- Diferencia de temperatura para apagado de la bomba:  $3,4K$ .
- Limitación de temperatura máxima:  $70^{\circ}C$ .
- Protección contra congelamiento: apagada.
- Limitación de temperatura mínima: apagada.

Es recomendable encender la protección electrónica contra el congelamiento ya que este sistema funciona con agua potable como fluido térmico, por lo que el riesgo de que se produzca congelamiento en invierno es alto.

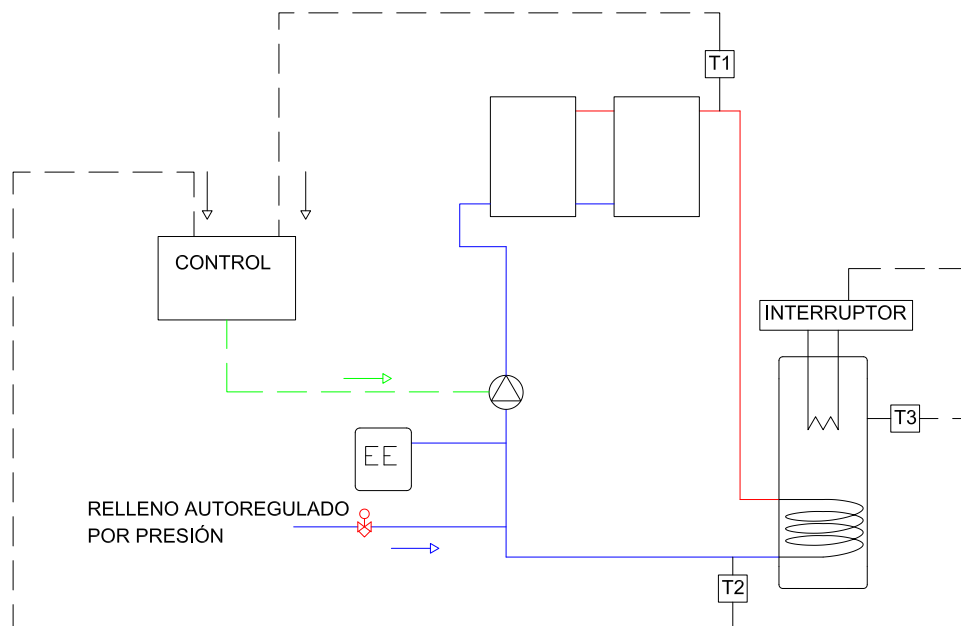


Figura 5.3: Diagrama del sistema de control, vivienda particular

## 5.2. Mediciones Realizadas en Vivienda Unifamiliar

Las variables registradas con los equipos de medición fueron las siguientes:

- Temperatura de entrada solar, T1, medida en la superficie de la cañería antes de la entrada al intercambiador de calor.

- Temperatura de retorno solar, T2, medida en la superficie de la cañería después de la salida del intercambiador de calor.
- Temperatura de entrada del agua sanitaria, T3.
- Temperatura del agua caliente sanitaria, T4.
- Tiempo de funcionamiento de la bomba.

Las mediciones de radiación solar en este caso no resultaron válidas, debido a un problema en la conexión con el Data Logger, por lo que se deberán utilizar datos de la estación meteorológica del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. El problema se debió a que una de las conexiones de entrada del Data Logger marca Hobo se encontraba en mal estado, por lo que no se guardaron correctamente los datos enviados por el piranómetro.

Además de lo anterior, hubo algunos otros problemas que resolver antes de obtener series de mediciones válidas. El primero se debió que se dejó activada la opción de "*compensación interna de temperatura*" (internal temperature compensation) en el Data Logger Omega, lo que generó medidas incorrectas. Luego, al dejar los sensores de temperatura y de funcionamiento de la bomba funcionando correctamente, se encontró en la primera revisión de datos que se había desconectado el sensor de la bomba, por lo que los datos tomados entre el 18 y el 24 de abril quedaron incompletas. Sin embargo, en este punto se notó que la bomba mostraba un comportamiento muy irregular, con ciclos de encendido y apagado con intervalos de pocos minutos, por lo que en adelante se aumentó la frecuencia de medición de datos de 10 minutos a 1 minuto, como se observa en las figuras 5.7 y 5.8.

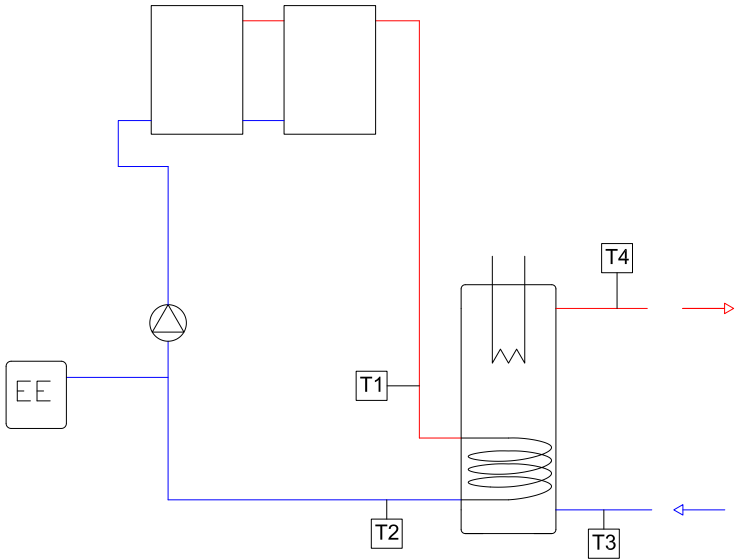


Figura 5.4: Diagrama de posición de los sensores de temperatura.

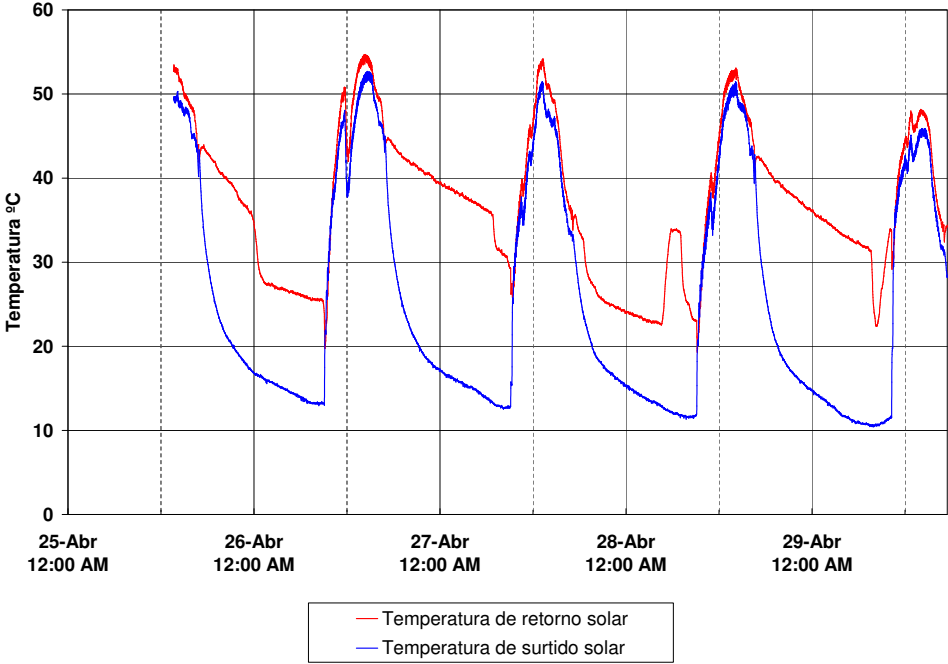


Figura 5.5: Mediciones temperatura del circuito solar primario, entrada y salida del intercambiador de calor.

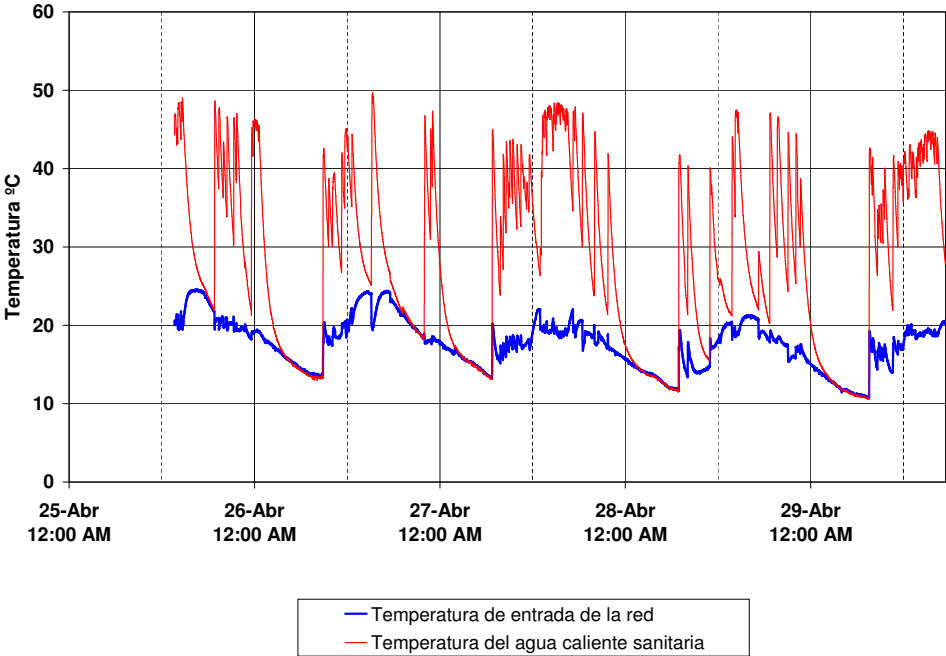


Figura 5.6: Mediciones del circuito secundario, entrada y salida del estanque acumulador.

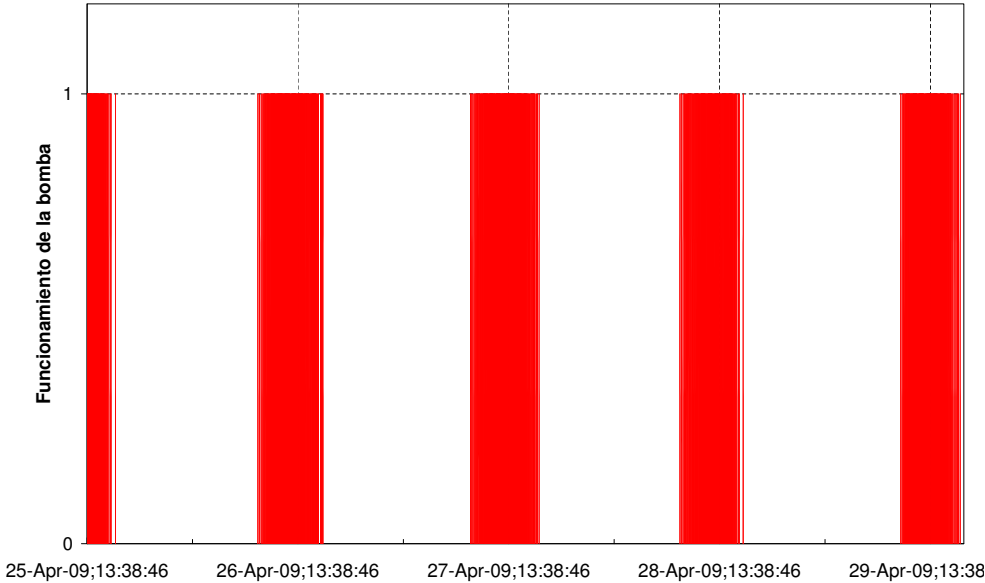


Figura 5.7: Mediciones del funcionamiento de la bomba del circuito primario en Vivienda Unifamiliar (0=apagada, 1=funciona).

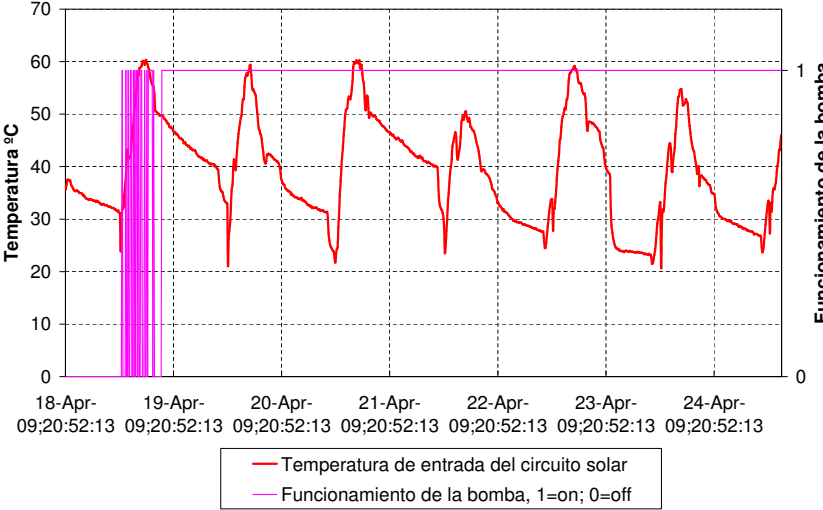


Figura 5.8: Mediciones del funcionamiento de la bomba del circuito primario en Vivienda Unifamiliar (0=apagada, 1=funciona).

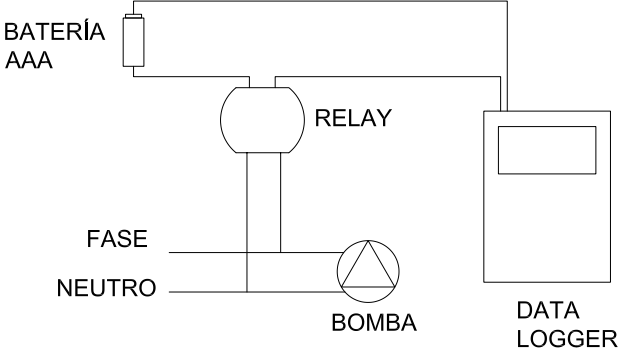


Figura 5.9: Diagrama de la conexión del relay y la batería para registrar el funcionamiento de la bomba.



### 5.3. Resultados Vivienda Unifamiliar

Como se mencionó en el capítulo anterior, el período de mediciones válidas realizadas en este sistema se extendió desde el 25 abril a las 13:38 horas hasta el 29 de abril a las 17:26 horas, y por lo tanto los resultados fueron calculados dentro de este período de tiempo.

En cuanto a los datos de radiación que debieron ser extraídos de la estación de medición del Departamento de Geofísica (DGF), éstos fueron revisados antes de incluirlos en los cálculos. Se compararon datos de radiación obtenidos en las mediciones del Edificio Spazio con datos del DGF en el mismo período, ya que se sabe que en los últimos el sensor de radiación utilizado no recibe limpieza y puede arrojar medidas menores que la realidad. Se eligieron los datos del Edificio Spazio y no del Edificio Amazonía porque en el primer caso el piranómetro se encontraba en un plano inclinándose en sólo  $3^\circ$ , que es más cercano al plano horizontal usado por el DGF en comparación con Amazonía, donde la inclinación es de  $30^\circ$ . Se encontró que los datos comparados se ajustan muy bien una relación lineal, la cual se muestra en la ecuación A.1.

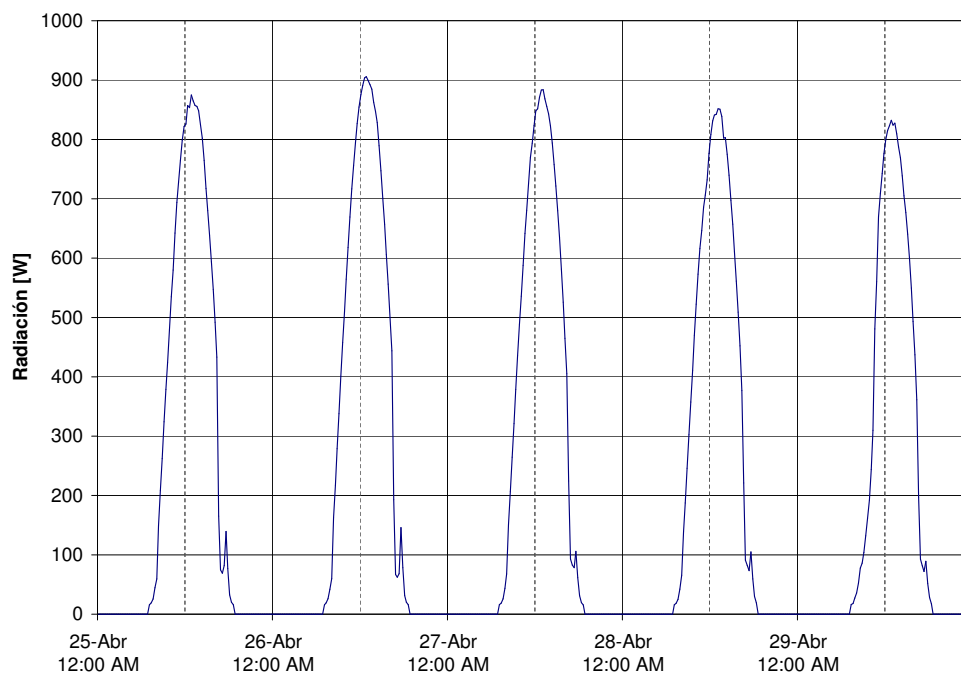


Figura 5.10: Mediciones de radiación obtenidas en base a los datos publicados por el DGF.

El caudal del circuito solar primario se calculó según lo expuesto en la sección 4.3.1. Se obtuvo

que el caudal es el siguiente:

$$\dot{m} = 13,5[\text{lt}/\text{min}] \quad (5.1)$$

Este es el caudal total del circuito solar primario, el que cuenta en este caso con dos colectores conectados en paralelo. Se puede ver que este valor es superior al caudal recomendado por el fabricante, que sugiere entre 1 y 2  $\text{lt}/\text{min}$  por cada  $\text{m}^2$  de colector, lo que significa entre 5,1 y 10,2  $\text{lt}/\text{min}$  en total para este sistema.

En este proyecto se observó un comportamiento inusual de la bomba del circuito solar primario, la cual parte y se detiene en ciclos muy cortos, de uno o dos minutos. Es muy probable que esta situación se deba al caudal muy elevado para la cantidad de colectores, lo que genera que el diferencial de temperatura que lee el controlador del sistema disminuya rápidamente, ya que el fluido térmico no tiene tiempo de disminuir su temperatura en el intercambiador de calor. Como no es posible aumentar el área de intercambio de calor, se recomienda cambiar la posición de la bomba al nivel 1 (actualmente está en nivel 3), ya que el funcionamiento intermitente puede influir negativamente en la eficiencia global del sistema. En adición a lo anterior, se puede disminuir el diferencial de temperatura programado en el controlador, el cual al momento de las mediciones se encontraba aproximadamente en 12 °C, pero no se recomienda bajar de los 8 °C. El diferencial de temperatura se ajusta mediante una perilla ubicada dentro del controlador y tiene un rango entre 2 y 16 °C.

### 5.3.1. Energía Entregada por el Sistema Solar

A continuación se grafica la energía entregada por el sistema solar en el intercambiador de calor del estanque acumulador.

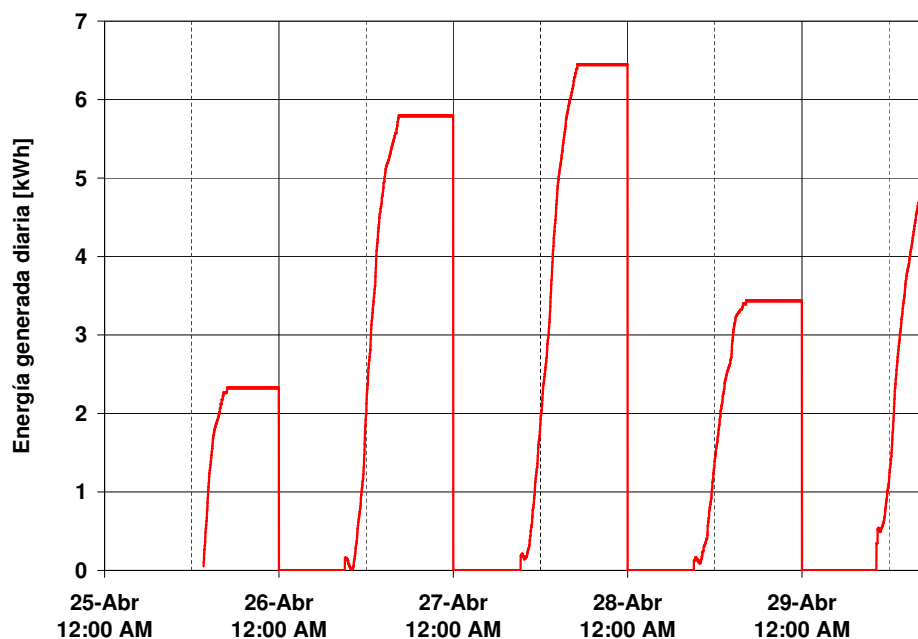


Figura 5.11: Energía entregada por el sistema solar en el intercambiador de calor a lo largo del día en Vivienda Unifamiliar, en intervalos de 1 minuto.

### 5.3.2. Resultados Diarios

En la tabla 5.5 se muestran los resultados diarios calculados para la Vivienda Unifamiliar.

Tabla 5.5: Resultados diarios Vivienda Unifamiliar

| Día                 | Radiación incidente                 |                  | Energía generada<br>kWh/día | Eficiencia del sistema solar<br>% |
|---------------------|-------------------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
|                     | Unitaria<br>kWh/m <sup>2</sup> .día | Total<br>kWh/día |                             |                                   |
| 25 de abril de 2009 | 2,2                                 | 11,4             | 2,3                         | 20,5 %                            |
| 26 de abril de 2009 | 5,7                                 | 29,2             | 5,8                         | 19,9 %                            |
| 27 de abril de 2009 | 5,5                                 | 28,1             | 6,4                         | 22,9 %                            |
| 28 de abril de 2009 | 5,3                                 | 27,0             | 3,4                         | 12,8 %                            |
| 29 de abril de 2009 | 4,6                                 | 23,6             | 5,1                         | 21,5 %                            |

Se puede observar que los resultados de eficiencia diarios son bastante bajos, especialmente si se considera que la eficiencia calculada de los colectores durante el tiempo de las mediciones no

disminuye del 60% en los períodos en los que la bomba está en funcionamiento. Se estima que el bajo rendimiento se debe principalmente al funcionamiento poco constante de la bomba. A pesar de esto, cabe destacar que entre diciembre del 2008 y febrero del 2009 el consumo eléctrico por agua caliente sanitaria fue cercano a cero, según lo informado por el propietario, quien pudo obtener esta información gracias a que al sistema de respaldo eléctrico se le ha instalado un medidor de energía exclusivo para este consumo. El nulo consumo de electricidad durante el verano sumado a la baja eficiencia encontrada para el sistema solar permite concluir que el sistema está sobredimensionado para la cantidad de usuarios.

A pesar de que el sistema esté sobredimensionado, se sugiere tomar medidas para aumentar la eficiencia. La primera recomendación es mover la posición de la bomba al mínimo y observar si se logra mantener un funcionamiento más continuo de ésta. Si esta medida no resulta suficiente, se puede reducir artificialmente el caudal en el circuito primario mediante la instalación de una válvula en línea con la bomba.

## Capítulo 6

### Edificio Amazonía

#### 6.1. Descripción del Sistema

Este proyecto fue realizado por la empresa Cypco, y cumple la función apoyar a la generación de agua caliente utilizada en el edificio Amazonía, ubicado en Los Leones 900, Providencia, Santiago. Se han utilizado colectores de tubo al vacío, con 30 tubos por colector. En este proyecto, el sistema solar precalienta el agua de consumo que luego entra a un estanque de acumulación, el cual puede recibir un aporte energético desde una caldera, aa través de un intercambiador de calor de placas. Los colectores se ubican en líneas o bancas conectadas en paralelo. Las bancas cuentan con 2 ó 3 colectores en serie. En la tabla 6.1 se pueden encontrar las características generales de los colectores utilizados en este proyecto.

Tabla 6.1: Características generales de colectores usados en Edificio Amazonía

|                   |                          |
|-------------------|--------------------------|
| Fabricante        | Sunrain                  |
| Modelo            | <i>TZ58 – 1800 – 30R</i> |
| Tipo de colector  | Tubo al vacío            |
| Cantidad de tubos | 30                       |



Figura 6.1: Colectores solares Edificio Amazonía

El Edificio Amazonía tiene 46 departamentos, de 1, 2, 3 y 4 dormitorios, contándose 16 de un dormitorio y 10 de cada uno del resto. Para esta cantidad de departamentos se espera una ocupación de 152 personas, contando una persona por cada dormitorio simple y dos por cada dormitorio matrimonial. Durante el período en que se realizaron las mediciones se encontraban ocupados 12 departamentos de 1 dormitorio, 8 departamentos de 2 dormitorios, 4 departamentos de 3 dormitorios y 7 departamentos de 4 dormitorios, por lo que se estima que 99 personas habitaban el edificio.

Tabla 6.2: Características generales de la instalación solar, Edificio Amazonía.

|   |                                |
|---|--------------------------------|
| Cantidad de colectores:                                 | 23                             |
| Cantidad estimada de habitantes : <sup>1</sup>          | 152                            |
| Área total de apertura:                                 | 64,17 [m <sup>2</sup> ]        |
| Volumen de acumulación solar:                           | 3000 [lt]                      |
| Volumen total de acumulación:                           | 6000 [lt]                      |
| Área de apertura por habitante: <sup>1</sup>            | 0,42 [m <sup>2</sup> /persona] |
| Volumen de acumulación por habitante: <sup>1</sup>      | 39,47 [lt/persona]             |
| Relación volumen de acumulación solar/área de apertura: | 46,75 [lt/m <sup>2</sup> ]     |

<sup>1</sup>Valores estimados para una ocupación completa del edificio

### 6.1.1. Características Técnicas de los Componentes Principales del Sistema Solar

#### Características Técnicas de los Colectores Solares

Tabla 6.3: Características técnicas de colectores Sunrain TZ58-1800-30R

| <b>Dimensiones Generales</b>          |        |                             |
|---------------------------------------|--------|-----------------------------|
| Ancho                                 | 2,42   | <i>m</i>                    |
| Largo                                 | 2,025  | <i>m</i>                    |
| Espesor                               | 0,198  | <i>m</i>                    |
| Área total                            | 4,901  | <i>m</i> <sup>2</sup>       |
| Área de apertura                      | 2,791  | <i>m</i> <sup>2</sup>       |
| <b>Constantes curva de eficiencia</b> |        |                             |
| $\eta_0$                              | 73,4   | %                           |
| $a_1$                                 | 1,529  | $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$   |
| $a_2$                                 | 0,0166 | $[\frac{W}{m^2 \cdot K^2}]$ |

#### Características Técnicas de la Bomba de Circulación

Tabla 6.4: Características generales de bomba de circulación, edificio Amazonía

|            |              |
|------------|--------------|
| Fabricante | Dab          |
| Modelo     | A80/180 – XM |

Esta bomba tiene tres velocidades de funcionamiento. Sus curvas características de operación se pueden ver en la figura 6.2.

**A 80/180 XM -**

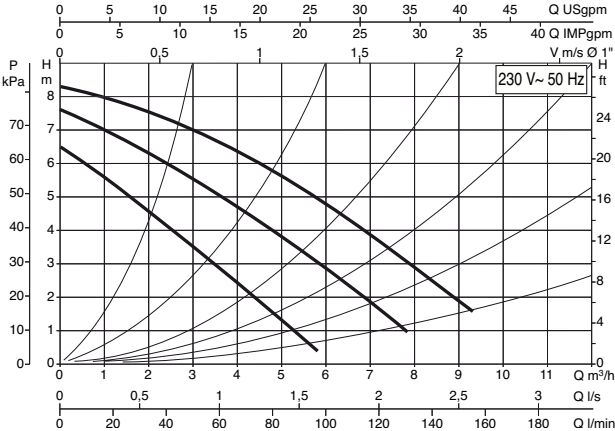


Figura 6.2: Curvas características de bomba de circulación utilizada en edificio Amazonía



6.1.2. Configuración del Sistema Solar

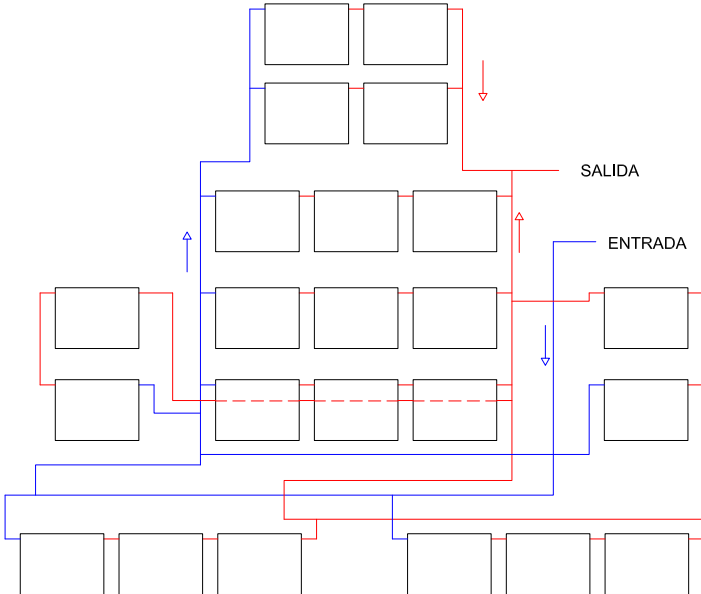


Figura 6.3: Diagrama de conexión de los colectores de edificio Amazonía, vista en planta.

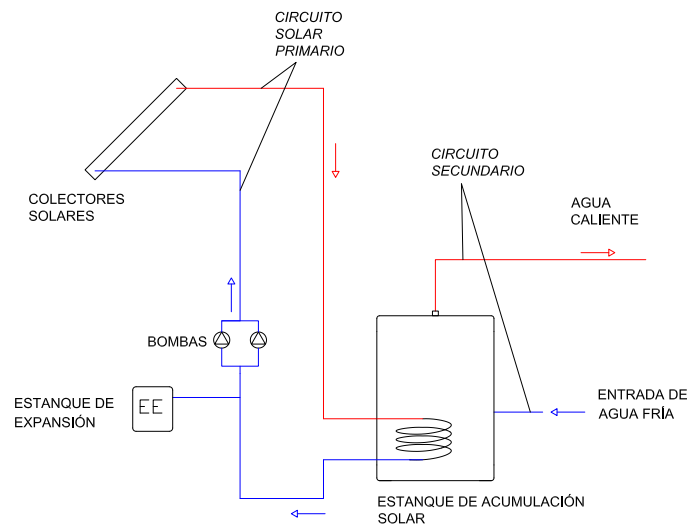


Figura 6.4: Diagrama de general del sistema solar de edificio Amazonía.

### Control del Sistema Solar

El sistema de control de este proyecto es más simple que el que se ha mostrado en la vivienda particular. El funcionamiento de las bombas está controlado sólo por un interruptor termostático ubicado en el punto más alto de las cañerías en la zona de los colectores. Este sistema también cuenta con un variador de funcionamiento alternativo, el cual tiene la función de hacer funcionar las bombas del sistema solar en forma consecutiva con el objetivo de que ninguna de las bombas pase mucho tiempo sin operar y evitar así que se produzcan fallas por poco uso.

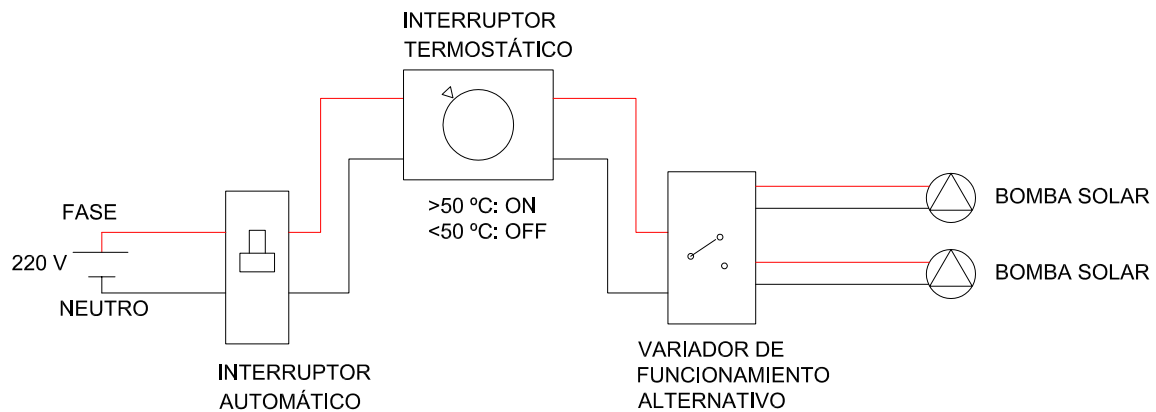


Figura 6.5: Diagrama de control del sistema solar de edificio Amazonía.

## 6.2. Mediciones Realizadas en Edificio Amazonía

Las variables registradas con los equipos de medición fueron las siguientes:

- Temperatura de entrada solar, T1, medida en la superficie de la cañería antes de la entrada al intercambiador de calor.
- Temperatura de retorno solar, T2, medida en la superficie de la cañería después de la salida del intercambiador de calor.
- Temperatura de entrada del agua sanitaria, T3.
- Temperatura del agua caliente sanitaria, T4.
- Tiempo de funcionamiento de la bomba.

En este caso la conexión para registrar el funcionamiento de la bomba fue similar a la realizada en la vivienda particular, con la diferencia de que en este caso se utilizó un relay” que ya se encontraba

en la instalación, el cual recibe la señal del termostato que se encuentra en los colectores solares y envía corriente a una de las dos bombas de circulación.

El piranómetro se sujetó al manifold de uno de los colectores, para lograr que quede en el mismo plano que forman los tubos de un colector. El Data Logger Hobo se guardó en un envase plástico al que se le hicieron perforaciones por los lados para que circule el aire del ambiente y se ubicó en la estructura metálica que soporta los colectores, en un punto protegido de la lluvia y del agua que se utiliza para limpiar los tubos.

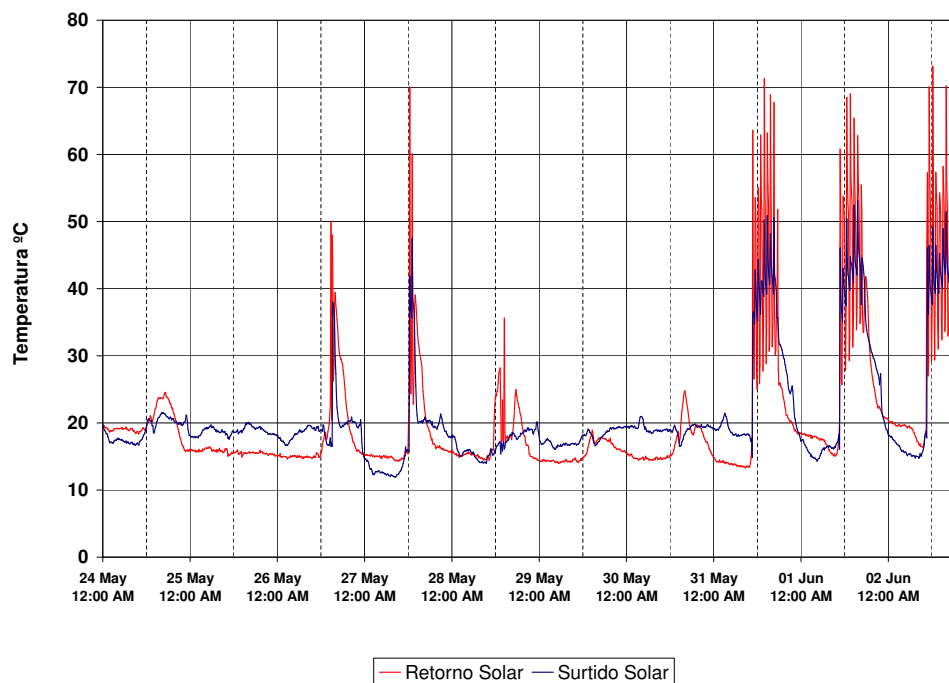


Figura 6.6: Mediciones del circuito solar primario, entrada y salida del intercambiador de calor.

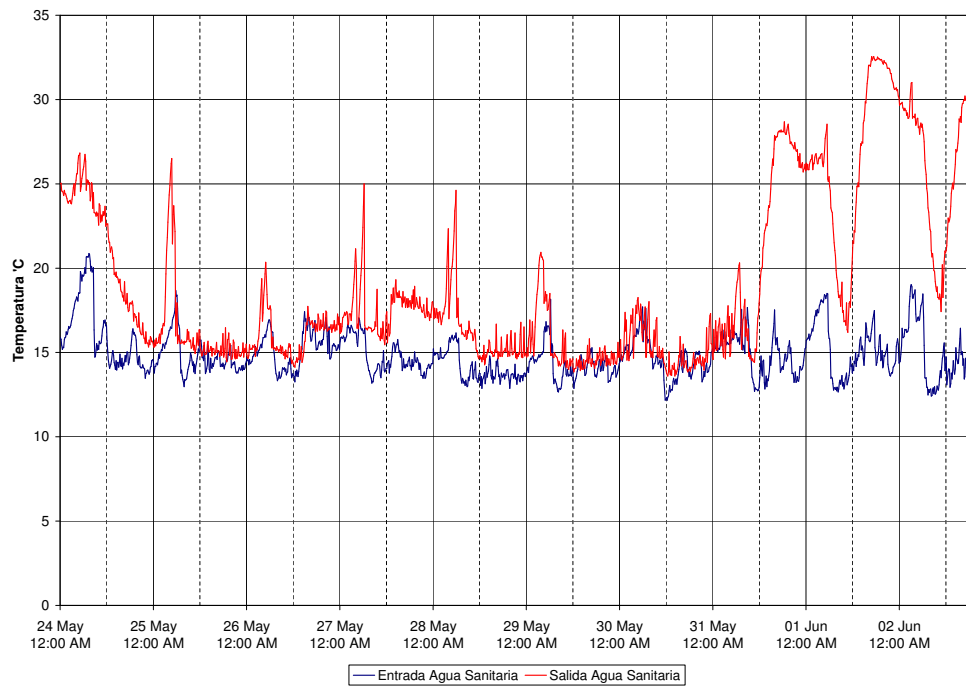


Figura 6.7: Mediciones del circuito solar secundario, entrada y salida del estanque acumulador.

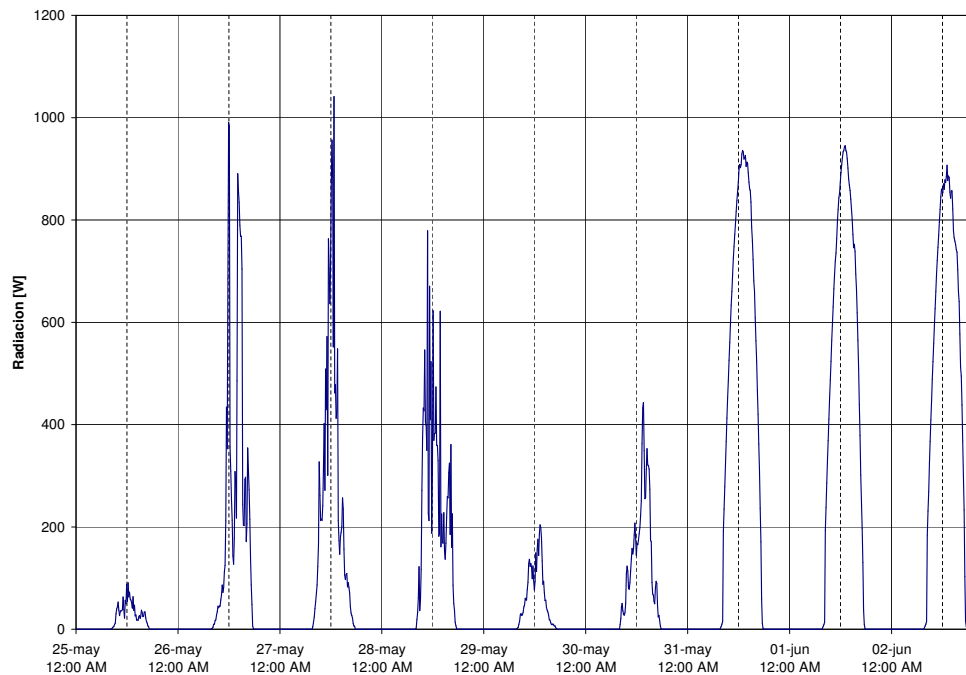


Figura 6.8: Mediciones de radiación incidente sobre el plano de los colectores en el Edificio Amazonía.

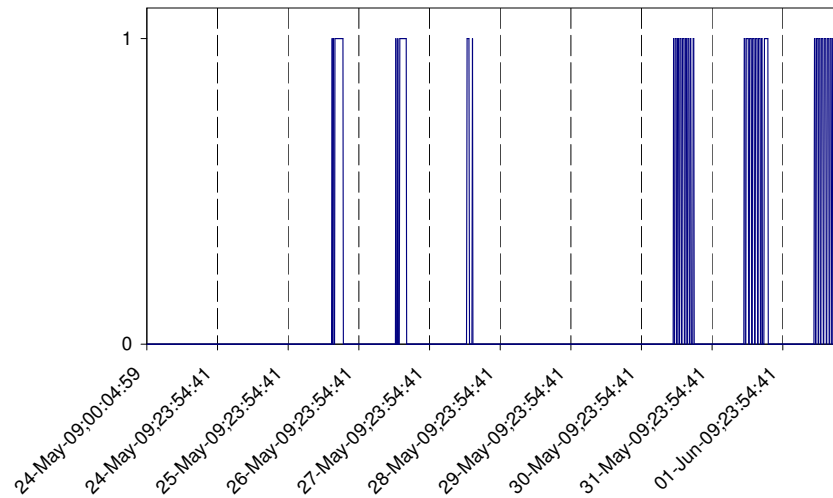


Figura 6.9: Mediciones del funcionamiento de la bomba del circuito primario en el Edificio Amazonía (0=apagada, 1=funciona).

### 6.3. Resultados Edificio Amazonía

El período de mediciones válidas realizadas en este sistema se extendió desde el 24 de mayo a las 19:22 horas hasta el 02 de junio a las 19:22 horas.

Para calcular el caudal del circuito solar primario se utilizó el mismo método que en la Vivienda Unifamiliar, pero tomando en cuenta que en este caso los colectores no están todos conectados en paralelo, sino que se encuentran en bancas de 2 y 3 colectores en serie, y por lo tanto el aumento de temperatura en los colectores se debe asociar a un área de apertura mayor. El caudal estimado para el sistema fue el siguiente:

$$\dot{m} = 46,8 [kg/min] \quad (6.1)$$

El caudal recomendado para los colectores utilizados es de 50 a 150  $[lt/(h \cdot m^2)]$ , considerando el área de apertura del colector. Por lo tanto, para esta instalación se tendría un caudal total recomendado entre 21 y 63  $[kg/min]$  en total. Luego, el caudal estimado se encuentra dentro del rango recomendado.

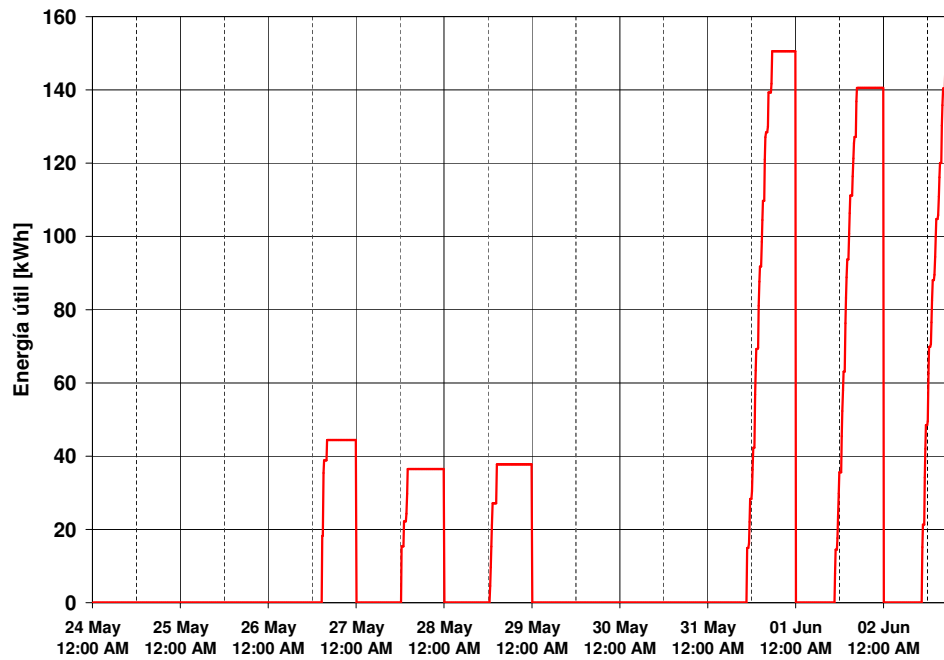


Figura 6.10: Energía entregada por el sistema solar en el intercambiador de calor a lo largo del día en Edificio Amazonía, en intervalos de 10 minutos.

### 6.3.1. Resultados Diarios

En la tabla 6.5 se muestran los resultados diarios calculados para el Edificio Amazonía.

Tabla 6.5: Resultados diarios Edificio Amazonía

| Día                | Radiación incidente                 |                  | Energía útil solar<br>kWh/día | Eficiencia |
|--------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------|------------|
|                    | Unitaria<br>kWh/m <sup>2</sup> .día | Total<br>kWh/día |                               |            |
| 25 de mayo de 2009 | 0,30                                | 19,5             | 0,0                           | 0,0 %      |
| 26 de mayo de 2009 | 2,68                                | 172,2            | 44,4                          | 25,8 %     |
| 27 de mayo de 2009 | 2,82                                | 181,2            | 36,5                          | 20,2 %     |
| 28 de mayo de 2009 | 2,52                                | 162,0            | 37,8                          | 23,3 %     |
| 29 de mayo de 2009 | 0,67                                | 42,7             | 0,0                           | 0,0 %      |
| 30 de mayo de 2009 | 1,46                                | 93,5             | 0,0                           | 0,0 %      |
| 31 de mayo de 2009 | 6,07                                | 389,8            | 150,6                         | 38,6 %     |
| 1 de junio de 2009 | 5,99                                | 384,1            | 140,5                         | 36,6 %     |
| 2 de junio de 2009 | 5,90                                | 378,7            | 149,5                         | 39,5 %     |

Se observa que en los días de mayor radiación solar aumenta la eficiencia del sistema y que los valores máximos de eficiencia son superiores a los de la instalación de la Vivienda Unifamiliar. La radiación mínima registrada para que el sistema pueda producir energía fue de 2,52 [ $kWh/(m^2 \cdot dia)$ ], y la máxima eficiencia registrada fue del 39,5 %.

En este sistema las mediciones de temperatura fueron tomadas cada 10 minutos, ya que durante el verano se había observado un funcionamiento muy constante de la bomba, la cual entraba en funcionamiento cerca de las 11:00 de la mañana y no se detenía hasta más aya de las 18:00 horas. Sin embargo, este comportamiento no se repitió durante el período de mediciones. Esto se debe a que el control no se hace en base a un diferencial de temperatura, sino que se utiliza un termostato en el punto más alto de los colectores, y la bomba funciona toda vez que se sobrepase la temperatura seteada en el termostato. Esto hace que el circuito primario no circule cuando hay radiaciones bajas, aunque la temperatura en los colectores sea superior a la temperatura en el estanque de acumulación. Es por esto que sería recomendable cambiar el sistema de control por uno más sofisticado, que funcione en base a un diferencial de temperatura y que cuente con protección contra el congelamiento, ya que en este caso se trabaja con agua potable sin más aditivos como fluido térmico.

Por otro lado, se observó que en el intercambiador de calor se produce un salto térmico del circuito primario que supera los 9°C mientras el sistema está en funcionamiento en días de alta



radiación. Este salto térmico habla de un buen dimensionamiento del intercambiador de calor. También se observó un salto térmico de más de  $15^{\circ}\text{C}$  en el circuito secundario, entre la entrada y la salida del estanque acumulador, lo que es muy positivo. Estos resultados ponen en evidencia que la eficiencia de captación del colector no es la única variable a tener en cuenta en el momento de diseñar una instalación solar, sino que se debe mantener un equilibrio entre la eficiencia de captación (que es mayor cuando la temperatura del circuito primario es baja) y la eficiencia del intercambiador de calor (que es mayor cuando la temperatura del circuito primario es alta).

## Capítulo 7

### Edificio Spazio

#### 7.1. Proyecto Edificio Spazio

Este proyecto fue realizado por Chilectra, y cumple la función apoyar a la generación de agua caliente utilizada en el edificio Spazio, ubicado en Román Díaz 1180, Providencia, Santiago. Se han utilizado colectores planos, del fabricante Chromagen. En este proyecto, el sistema solar precalienta el agua de consumo que luego entra a dos estanques de acumulación, los cuales pueden recibir un aporte energético mediante un sistema eléctrico. En este caso, todos los colectores están conectados en paralelo. En la tabla 5.2 se muestran las características generales de los colectores utilizados en este proyecto.

A diferencia de los otros dos proyectos estudiados, en este caso se ha utilizado un intercambiador de calor externo para llevar a cabo la transferencia de calor entre el circuito primario y el secundario. Se trata de un intercambiador de placas de la marca UNEX, modelo Z2/10-21. Un intercambiador de calor de placas como el utilizado tiene el inconveniente de generar pérdidas de calor hacia el ambiente mucho mayores a las que se tienen en un intercambiador de calor del tipo serpentín sumergido (como los utilizados en los otros proyectos estudiados), pero a su vez tiene la gran ventaja de permitir un fácil mantenimiento. Dado que se espera que para instalaciones solares térmicas se espera una vida útil de 15 a 20 años, el factor de mantenimiento es de gran importancia en el proyecto. Por último, cabe señalar que el intercambiador de calor no cuenta con aislación térmica más allá de la que tienen las propias placas. No es necesario realizar mediciones para ver que esta situación no es la más ideal, ya que al funcionar el circuito primario se puede sentir el flujo de calor hacia el ambiente sólo con acercar la mano a las placas, y por lo tanto se recomienda generar algún tipo de envolvente para disminuir estas pérdidas.

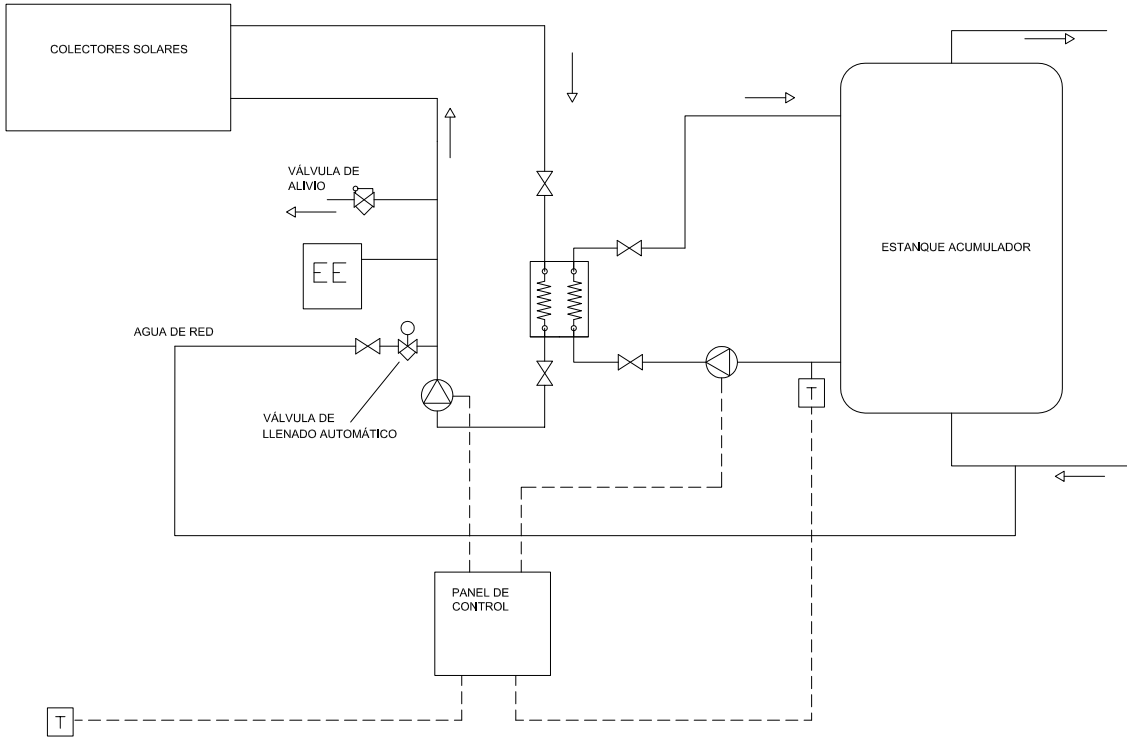


Figura 7.1: Diagrama general del sistema solar, Edificio Spazio

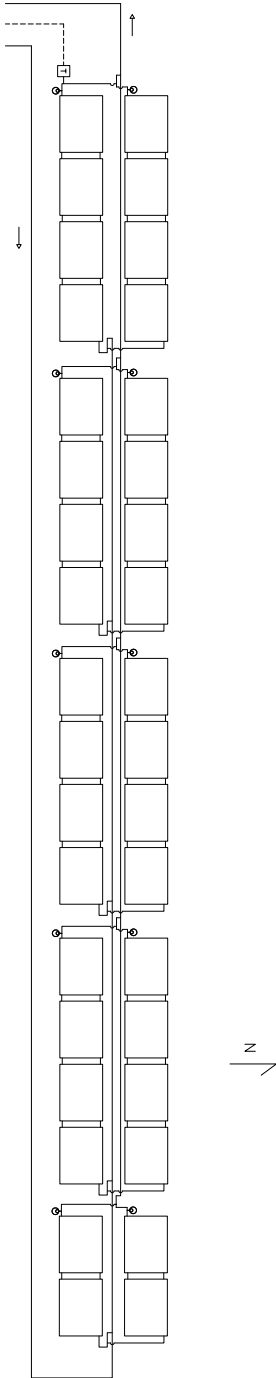


Figura 7.2: Diagrama de disposición de colectores, Edificio Spazio



Figura 7.3: Colectores solares Edificio Spazio

El Edificio Spazio cuenta con 92 departamentos distribuidos en 8 plantas, y se ha estimado una cantidad de 420 habitantes en base al número de camas [15]. Al momento de realizar las mediciones existía aproximadamente un 50 % de ocupación del edificio, por lo tanto, se estiman 210 habitantes.

Tabla 7.1: Características generales de la instalación solar, Edificio Spazio.

|   |                                |
|---|--------------------------------|
| Cantidad de colectores:                                 | 36                             |
| Cantidad estimada de habitantes : <sup>1</sup>          | 420                            |
| Área total de apertura:                                 | 92,16 [m <sup>2</sup> ]        |
| Volumen de acumulación solar:                           | 5000 [lt]                      |
| Volumen total de acumulación:                           | 15000 [lt]                     |
| Área de apertura por habitante: <sup>1</sup>            | 0,22 [m <sup>2</sup> /persona] |
| Volumen de acumulación por habitante: <sup>1</sup>      | 35,71 [lt/persona]             |
| Relación volumen de acumulación solar/área de apertura: | 54,25 [lt/m <sup>2</sup> ]     |

<sup>1</sup>Valores estimados para una ocupación completa del edificio

### 7.1.1. Circuito Solar Primario

El fluido térmico del circuito solar primario está compuesto por una mezcla de 75 % de agua y 25 % de glicol, para proteger al sistema contra el congelamiento en invierno. Esta mezcla tiene un punto de congelamiento de aproximadamente  $-10^{\circ}\text{C}$ , mientras que la temperatura mínima histórica registrada en la ciudad de Santiago, específicamente en la comuna de Pudahuel, es de  $-6^{\circ}\text{C}$  [17, 4]. La presión de trabajo del sistema es de 2,5 [bar]. El circuito primario cuenta con una válvula de alivio de presión de 6 [bar], un estanque de expansión con capacidad de 12 litros y purgadores de aire automáticos, estos últimos ubicados en la zona de los colectores solares. También se tiene una válvula de llenado automático conectada a la red de agua potable.

### 7.1.2. Características Técnicas de los Componentes Principales del Sistema Solar

#### Características Técnicas de los Colectores Solares

En este proyecto se han utilizado los mismos colectores que los usados en la vivienda unifamiliar. Las especificaciones técnicas de los colectores se pueden ver en la tabla 5.2. Los colectores están orientados hacia el norte, con un azimut de aproximadamente  $0^{\circ}$ , y tienen una inclinación de  $3^{\circ}$  con respecto a la horizontal. Esta baja inclinación se debe a un requerimiento del mandante del proyecto con el objetivo de conseguir una mejor integración con la arquitectura del edificio.

#### Características Técnicas de las Bombas de Circulación

Como en este caso se cuenta con un intercambiador de calor externo, se deben utilizar dos bombas: una para el circuito primario y otra para el secundario. Ambas bombas funcionan siempre de manera simultánea para producir el aporte de energía al agua sanitaria.

Tabla 7.2: Características generales de bombas de circulación, edificio Spazio

| <b>Bomba circuito primario</b>   |   |
|----------------------------------|---|
| Fabricante:                      | UNEX  |
| Modelo:                          | PENTAX U7S-180/4  |
| Tipo:                            | Bomba de circulación para caliente sanitaria y calefacción      |
| <b>Bomba circuito secundario</b> |   |
| Fabricante:                      | UNEX  |
| Modelo:                          | PENTAX ULTRA U5S-70/2   |
| Tipo:                            | Bomba de circulación para agua caliente sanitaria y calefacción |

En las figuras 7.4 y 7.5 se muestran las curvas de operación de las dos bombas de circulación.

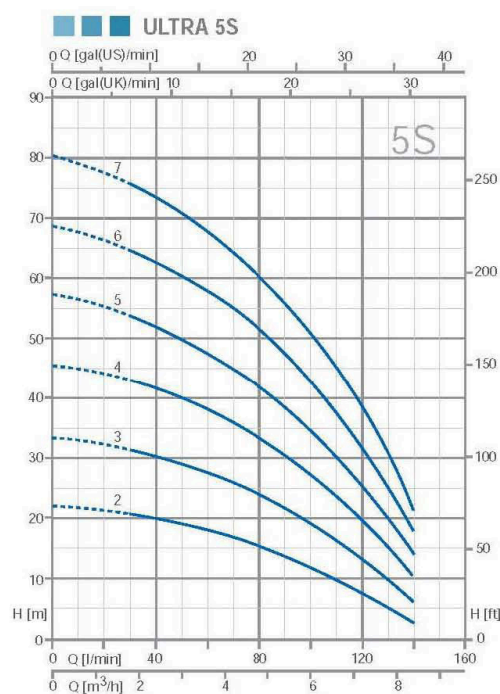


Figura 7.4: Curvas características de bomba de circulación circuito secundario utilizada en edificio Spazio (curva 2)

### Control del Sistema Solar

El controlador del sistema solar es un equipo marca *Resol*, modelo *DeltaSol BS*. El controlador recibe señales de dos sensores de temperatura y está programado para encender las bombas circulatorias cuando se cumple una diferencia de temperatura de  $6^{\circ}\text{C}$  y para apagarlas una vez que la

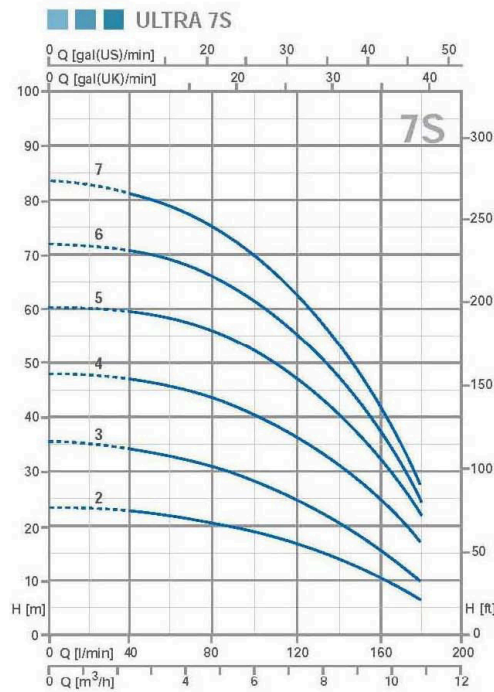


Figura 7.5: Curvas características de bomba de circulación circuito primario utilizada en edificio Spazio (curva 4)

diferencia baje de 2 °C. Los sensores están ubicados a la salida de los colectores y a la salida desde el estanque acumulador hacia el intercambiador (Fig. 7.1).

## 7.2. Mediciones Realizadas en Edificio Spazio

Las variables registradas con los equipos de medición fueron las siguientes:

- Temperatura de entrada solar, T1, medida en la superficie de la cañería antes de la entrada al intercambiador de calor.
- Temperatura de retorno solar, T2, medida en la superficie de la cañería después de la salida del intercambiador de calor.
- Temperatura de entrada del agua sanitaria al intercambiador de calor, T3.
- Temperatura del agua caliente sanitaria a la salida del intercambiador de calor, T4.
- Tiempo de funcionamiento de la bomba.





Figura 7.6: Controlador solar utilizado en Edificio Spazio, marca *Resol* y modelo *DeltaSol BS*

Los equipos de medición estuvieron instalados en el Edificio Spazio entre el 15 de junio y el 17 de julio. Este período tan extendido de mediciones (en comparación con los otros dos casos) se debe a que se produjeron algunos problemas que provocaron la pérdida de datos de algunos días. En las mediciones entre el 15 y el 22 de junio hubo un error en la configuración del Data Logger Omega, ya que se habilitó la función de compensación interna de temperatura del equipo, lo que arruinó estas mediciones. Luego, en las mediciones entre el 22 y el 30 de junio, se corrompió el archivo de datos al conectar el Data Logger Omega al computador, con lo que se perdieron estos datos.

Las mediciones de temperaturas se extendieron hasta el 17 de julio, pero las de radiación sólo se pudieron realizar hasta el 3 de julio ya que no se contaba con más tiempo para utilizar el piranómetro.

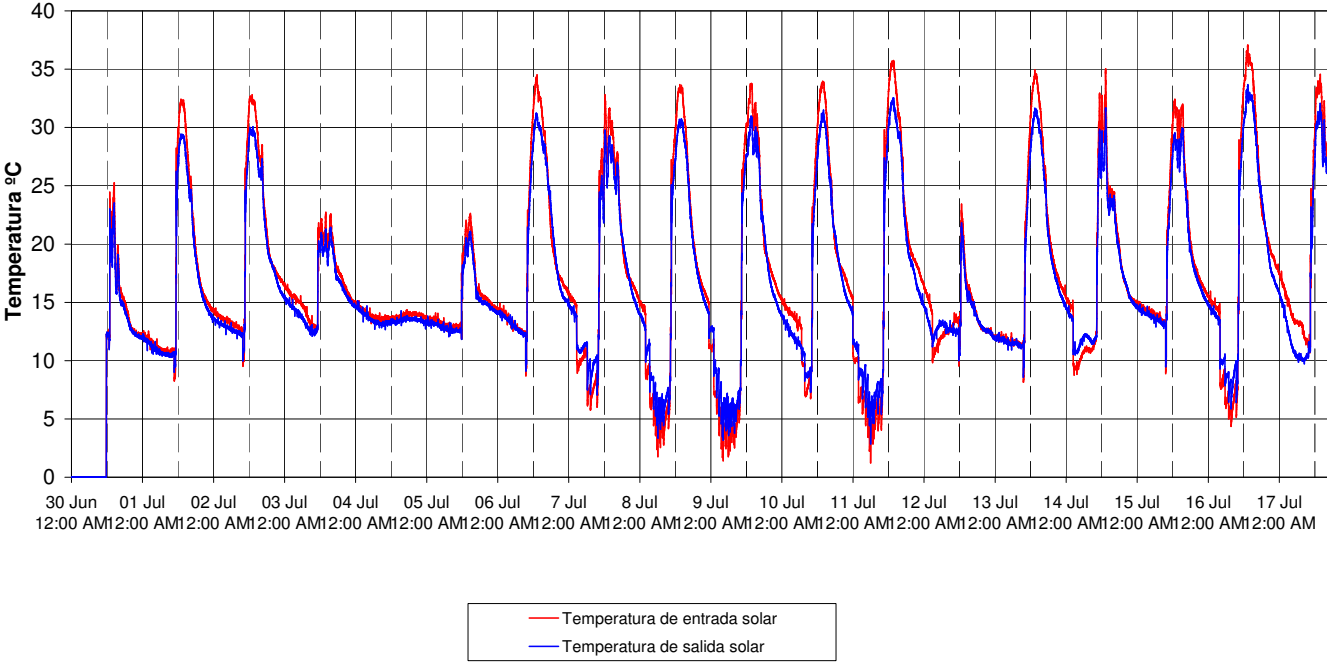


Figura 7.7: Mediciones del circuito solar primario, entrada y salida del intercambiador de calor.

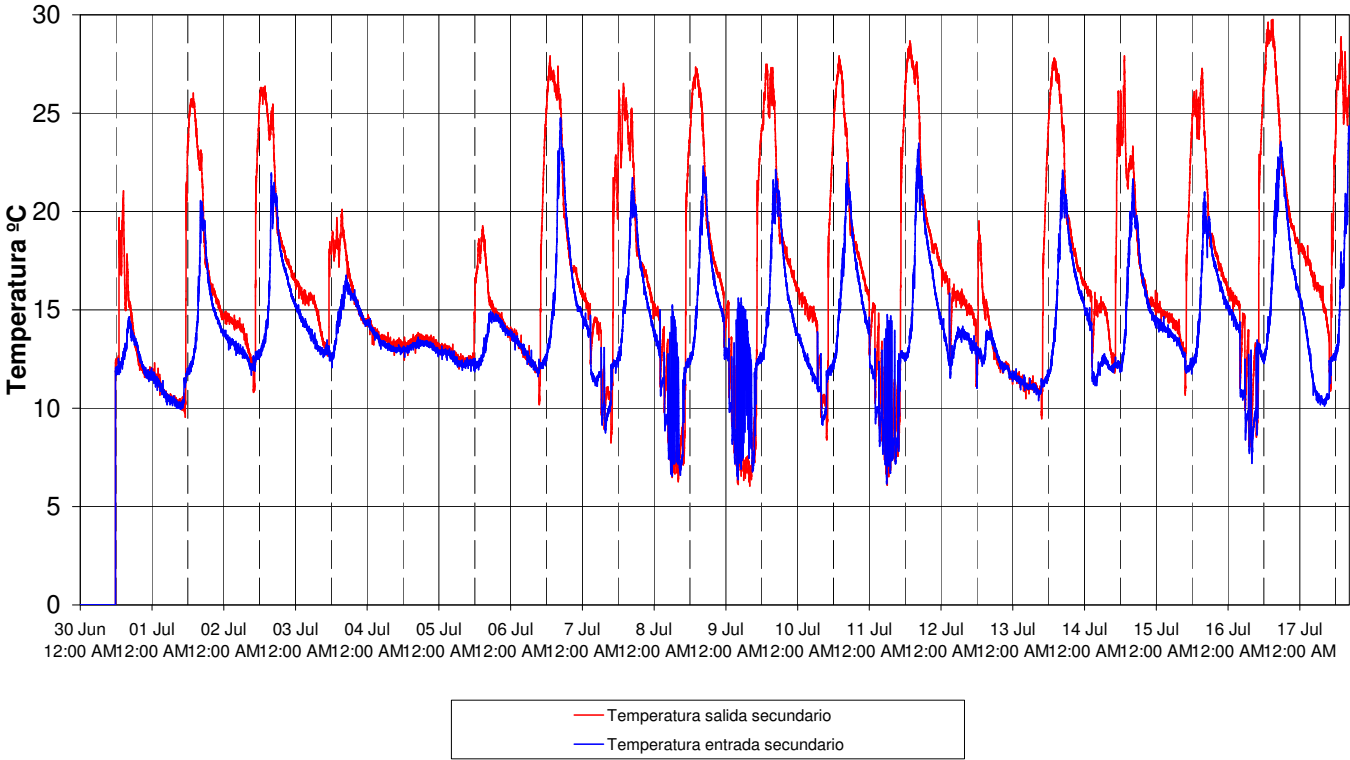


Figura 7.8: Mediciones del circuito solar secundario, entrada y salida del intercambiador de calor.

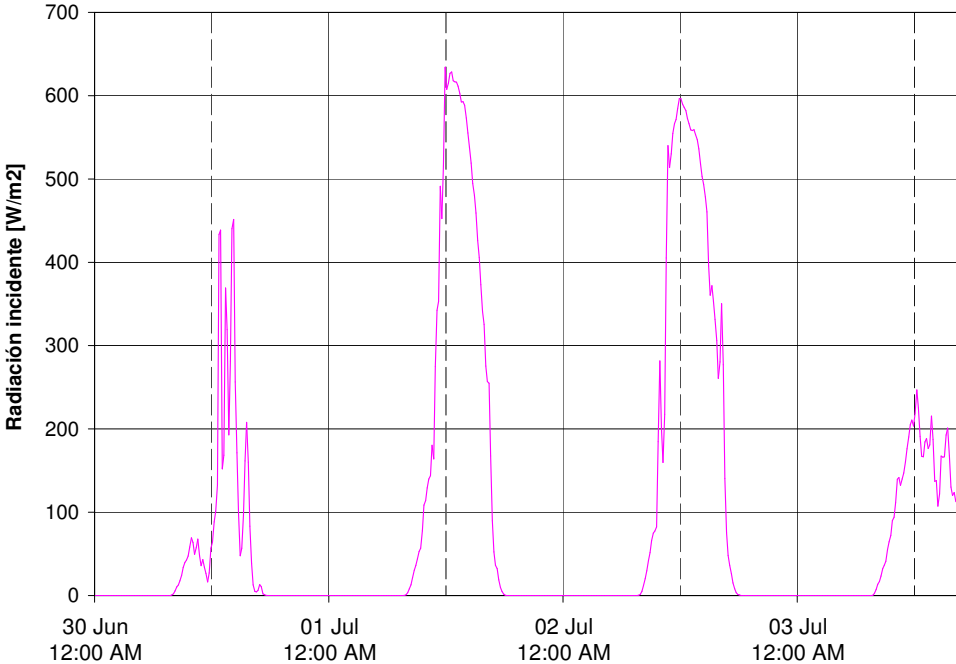


Figura 7.9: Mediciones de radiación incidente sobre el plano de los colectores en el Edificio Spazio.

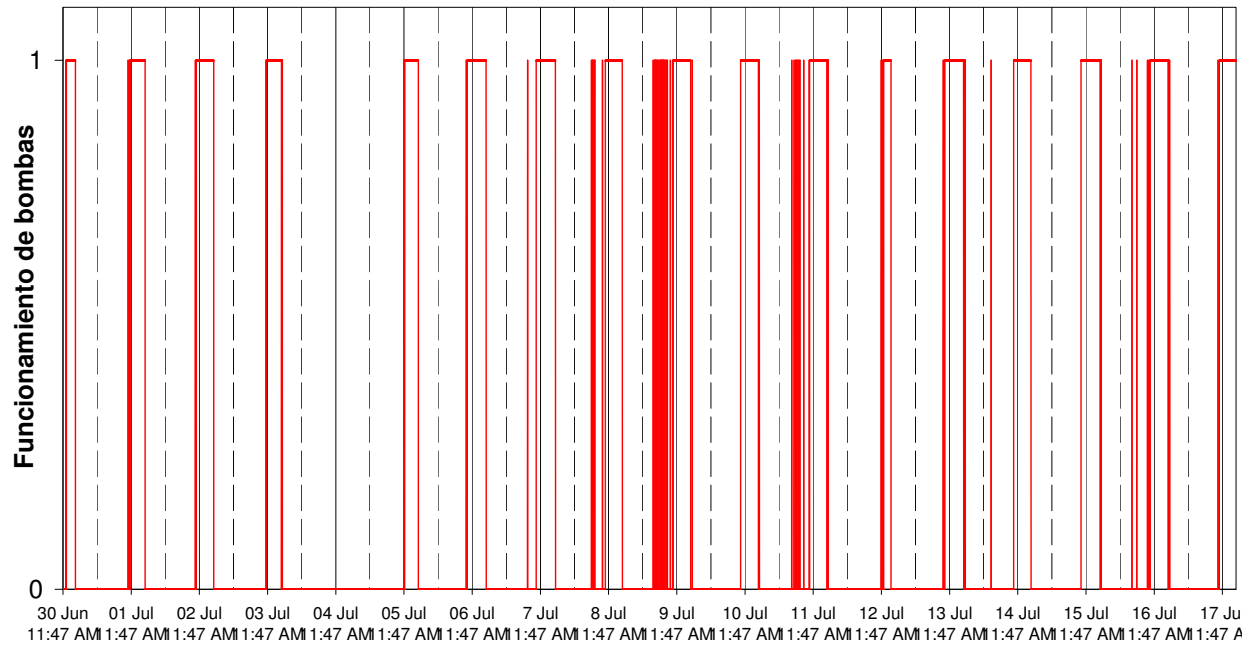


Figura 7.10: Mediciones del funcionamiento de las bombas del circuito primario en el Edificio Spazio (0=apagadas, 1=funcionan).

### 7.3. Resultados Edificio Spazio

El período de mediciones válidas realizadas en este sistema se extendió desde el 30 de junio a las 11:47 horas hasta el 17 de julio a las 16:34 horas.

El cálculo del caudal del circuito primario arrojó el siguiente resultado:

$$\dot{m} = 183,9[kg/min] \quad (7.1)$$

Al ver la curva característica de la bomba de circulación del circuito primario, se puede notar que la pérdida de carga mínima de la bomba es de 15 [*m.c.a.*], lo que es muy elevado para un circuito de estas características. Para esta pérdida de carga la bomba genera un caudal de 180 [*lt/min*], lo que confirma que la bomba está funcionando en su punto más bajo. Finalmente, el caudal que

circula por cada colector es de  $5,1 [lt/min]$ , lo que está dentro del rango de caudales recomendados ( $3,9$  a  $7,8 [lt/min]$  por colector).

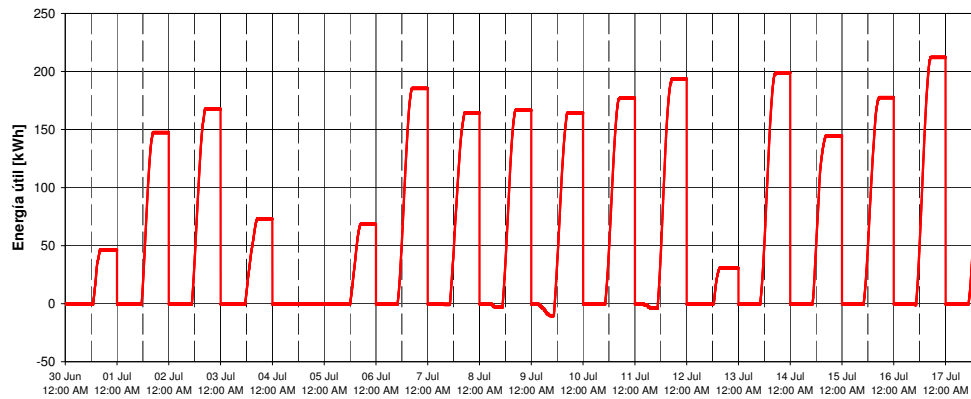


Figura 7.11: Energía entregada por el sistema solar en el intercambiador de calor a lo largo del día en Edificio Spazio, en intervalos de 1 minuto.

Los resultados negativos indican el funcionamiento de la protección contra el congelamiento del circuito solar primario, aunque también hay algunos días donde se produce un salto de temperatura negativo del fluido térmico en el intercambiador de calor al entrar en funcionamiento el sistema. Esta última situación también se observó en la instalación de la Vivienda Unifamiliar.

Tabla 7.3: Resultados diarios Edificio Spazio

|                     | Radiación incidente    |                | Energía generada | Eficiencia |
|---------------------|------------------------|----------------|------------------|------------|
|                     | Unitaria               | Total Apertura |                  |            |
| Día                 | Wh/m <sup>2</sup> .día | kWh/día        | kWh/día          | %          |
| 30 de junio de 2009 | 990,7                  | 91             | 46,6             | 51,0 %     |
| 1 de julio de 2009  | 3.066,1                | 283            | 147,9            | 52,3 %     |
| 2 de julio de 2009  | 3.212,4                | 296            | 167,9            | 56,7 %     |
| 3 de julio de 2009  | 1.224,6                | 113            | 73,3             | 65,0 %     |
| 4 de julio de 2009  | 700,2                  | 65             | 0,0              | 0,0 %      |
| 5 de julio de 2009  | 1.303,4                | 120            | 68,7             | 57,2 %     |
| 6 de julio de 2009  | 3.856,9                | 355            | 185,8            | 52,3 %     |
| 7 de julio de 2009  | 3.743,2                | 345            | 164,7            | 47,7 %     |
| 8 de julio de 2009  | 3.959,1                | 365            | 166,9            | 45,8 %     |
| 9 de julio de 2009  | 4.087,9                | 377            | 164,6            | 43,7 %     |
| 10 de julio de 2009 | 3.945,3                | 364            | 177,4            | 48,8 %     |
| 11 de julio de 2009 | 4.034,1                | 372            | 193,9            | 52,1 %     |
| 12 de julio de 2009 | 1.200,0                | 111            | 30,9             | 28,0 %     |
| 13 de julio de 2009 | 4.076,8                | 376            | 199,2            | 53,0 %     |
| 14 de julio de 2009 | 2.454,8                | 226            | 144,8            | 64,0 %     |
| 15 de julio de 2009 | 3.843,6                | 354            | 177,9            | 50,2 %     |
| 16 de julio de 2009 | 4.115,2                | 379            | 212,6            | 56,0 %     |
| 17 de julio de 2009 | 3.194,1                | 294            | 147,5            | 50,1 %     |

Se puede observar que este sistema presenta mejores resultados de eficiencia que los sistemas anteriores. También se observa que, al contrario de la instalación del Edificio Amazonía, en este caso el sistema solar puede funcionar en días de baja radiación solar, hasta los 1,2 [ $kWh/(m^2 \cdot dia)$ ]. Por otro lado, en este sistema sí se observa un comportamiento muy constante de la bomba del circuito primario. Todo lo anterior influye en que se logre un buen desempeño del sistema solar.

Este caso ha demostrado la importancia del sistema de control, ya que se habían observado situaciones que hacían suponer en un principio que la eficiencia del sistema no sería óptima. Estas situaciones son: un ángulo de inclinación muy pequeño de los colectores, falta de aislación térmica en algunos tramos de cañerías y en el intercambiador de calor de placas y presencia de condensación en la pared interna del vidrio de algunos de los colectores.

En cuanto a las recomendaciones, resulta evidente que ya no resultaría práctico modificar el

ángulo de inclinación de los colectores, pero sí se podría mejorar aun más la eficiencia del sistema si se instala aislación térmica en los tramos de cañería que en este momento no tienen, tanto en el circuitos primario como en el secundario. También se recomienda apagar la función de protección electrónica contra el congelamiento, ya que si el fluido térmico tiene la cantidad de anticongelante que se menciona en la memoria de cálculo del sistema, entonces este problema ya estaría resuelto y sólo se estaría perdiendo energía cuando la protección entra en funcionamiento.

Por último, el rápido aumento de temperatura en el circuito secundario, a la entrada del intercambiador de calor, puede ser consecuencia de que se ha perdido la estratificación de temperatura dentro del estanque acumulador. Se recomienda estudiar más a fondo este punto, porque la temperatura de entrada influye en la eficiencia del intercambiador de calor.



## Capítulo 8

### Conclusiones y Recomendaciones

Se pudieron conseguir todos los equipos necesarios para realizar las mediciones propuestas y se obtuvo la aprobación de los dueños de los tres sistemas solares térmicos elegidos para llevar a cabo el estudio. Para esto se contó con el apoyo de la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) y con el auspicio de Chilectra y el profesor Roberto Román, quienes proporcionaron los equipos de medición y registro de datos.

Se realizaron las mediciones propuestas en los tres sistemas solares elegidos y se calcularon los valores de desempeño en términos diarios para los períodos en que se obtuvieron datos válidos, para lo cual se tuvieron que resolver distintas dificultades asociadas a la instalación y programación de los equipos de medición.

Los valores de eficiencia de los sistemas solares térmicos fueron bastante variables, siendo el sistema de la Vivienda Unifamiliar el que resultó con peores resultados y el sistema del Edificio Spazio el que obtuvo los mejores. Las variables que más influyeron en la eficiencia fueron la radiación solar, la configuración del sistema de control y el caudal del circuito solar primario. En general los resultados fueron muy positivos, y a pesar de las diferencias en el nivel de eficiencia entre los sistemas solares y de los puntos que pueden ser mejorados, todos mostraron un funcionamiento correcto y probaron ser un método efectivo de generar agua caliente sanitaria para consumo en viviendas tanto unifamiliares como multifamiliares.

En el caso de la Vivienda Unifamiliar, se concluye que el sistema está sobredimensionado en relación con el consumo, ya que a pesar de la baja eficiencia encontrada, se sabe que durante el verano el sistema de respaldo prácticamente no presentó consumo de energía. A pesar de esto, para mejorar la eficiencia del sistema se recomienda disminuir el caudal en el circuito solar primario, para lo cual se puede cambiar la posición de la bomba al mínimo y si esta medida no resulta suficiente, se puede reducir artificialmente el caudal mediante la instalación de una válvula en línea con la bomba.

En el caso del Edificio Amazonía, como en la Vivienda Unifamiliar, se observó un funcionamiento irregular de la bomba. Sin embargo, observaciones anteriores a las realizadas en este trabajo indican que durante el verano la bomba sí funciona de manera continua a lo largo del día. Esto se debe a que el sistema de control en base a un termostato no es adecuado, por lo que se recomienda implementar un control en base a un diferencial de temperaturas, como es usual en sistemas solares térmicos de flujo forzado. Esta mejora también aumentaría la cantidad de días al año en los que el sistema solar funciona.

En el caso del Edificio Spazio se obtuvieron los mejores resultados de desempeño, lo que se atribuye principalmente a un buen sistema de control y a un caudal dentro de los rangos recomendados para el circuito primario (en relación con la cantidad de colectores y su configuración). Se observa una discordancia en la protección contra el congelamiento, ya que a pesar de que el fluido térmico contiene anticongelante, de todas maneras se está utilizando la protección electrónica del controlador, lo que hace perder un poco de energía de manera innecesaria. Se recomienda para este sistema mejorar la aislación térmica en los circuitos primario y secundario así como en el intercambiador de calor. Además de lo anterior, sería positivo estudiar en más detalle el estado de estratificación de temperatura dentro del estanque acumulador solar, ya que hay indicios de que ésta se puede estar perdiendo por el uso del intercambiador de calor externo.

## Capítulo 9

### Bibliografía

- [1] Base de Datos electrónica del Diario Oficial de Chile <http://www.diariooficial.cl/actualidad/20uulle/20365.html>, revisado el 18 de agosto del 2009.
- [2] John Perlin, página web del *California Solar Center*, [http://www.californiasolarcenter.org/history\\_solarthermal.html](http://www.californiasolarcenter.org/history_solarthermal.html). Revisado el 01/10/2008.
- [3] Transénergie S.A., *Estudio del mercado solar térmico chileno, Plan Nacional de fomento al uso de colectores solares*, Informe Final, Versión Corregida, Noviembre 2006.
- [4] H. Petersen. «*Elementos para la creación de un manual de buenas prácticas para instalaciones solares térmicas domiciliarias*», Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico, Santiago de Chile 2007, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile.
- [5] M. Cifuentes. «*Desarrollo de ingeniería conceptual y básica de un laboratorio nacional de homologación para sistemas de energía térmica solar*», Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico, Santiago de Chile 2008, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile.
- [6] S. Araneda. «*Diseño de banco de ensayos para homologación de colectores solares*», Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico, Santiago de Chile 2008, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile.
- [7] Normas oficiales chilenas relacionadas con sistemas solares térmicos: NCh2904.Of2004, NCh2906/2.Of2004.
- [8] Norma oficial chilena NCh2904.Of2004, «*Energía solar térmica - Vocabulario*». Instituto Nacional de Normalización, Chile, 2004.
- [9] Sitio web oficial de International Organization for Standardization (ISO), [www.iso.org](http://www.iso.org), revisado el 10 de octubre del 2008.

- [10] Sitio web oficial de la organización ASHRAE, [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org), revisado el 10 de octubre del 2008.
- [11] Sitio web oficial de la organización ASTM (American Standard for Testing and Materials), <http://www.astm.org/Standards/E904.htm>, revisado el 10 de octubre del 2008.
- [12] D. Rojas, J. Beermann, S.A. Klein y D.T. Reindl, «*Thermal performance testing of flat-plate collectors*», Solar Energy 82 (2008) 746–757.
- [13] O. Garcí-Valladares, I. Pilatowsky, V. Ruíz, «*Outdoor test method to determine the thermal behavior of solar domestic water heating systems*», Solar Energy 82 (2008) 613–622.
- [14] Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems, «*KTB Nr. 2007-07-en : Collector test according to EN 12975-1,2:2006 Jiangsu sunrain solar energy co. ltd , TZ58-1800*». 23 Marzo 2007, Fraunhofer-ISE, Heidenhofstraße 2, D-79110 Freiburg, Alemania.
- [15] Isener y Chiletra Solar Electric, " *Memoria Descriptiva, Instalación de Energía Solar Térmica para Producción de Agua Caliente Sanitaria a Edificio Spazio*" , Santiago, Chile.  
«*Outdoor test method to determine the thermal behavior of solar domestic water heating systems*», Solar Energy 82 (2008) 613–622.
- [16] Sitio web de la «*Universidad de Wisconsin, Madison*» dedicado al sistema TRNSYS, [http://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d\\_363.html](http://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d_363.html), revisado en junio del 2009.
- [17] Sitio web " *EngineeringToolbox*" , <http://www.astm.org/Standards/E904.htm>, revisado el 10 de octubre del 2008.

## Anexo A

### Datos de Radiación Externos

Se compararon datos de radiación obtenidos en las mediciones del Edificio Spazio con datos del DGF en el mismo período, ya que se sabe que en los últimos el sensor de radiación utilizado no recibe limpieza y puede arrojar medidas menores que la realidad. Se eligieron los datos del Edificio Spazio y no del Edificio Amazonía porque en el primer caso el piranómetro se encontraba en un plano inclinándose en sólo 3°, que es más cercano al plano horizontal usado por el DGF en comparación con Amazonía, donde la inclinación es de 30°. Se encontró que los datos comparados se ajustan muy bien una relación lineal, la cual se muestra en la ecuación A.1.

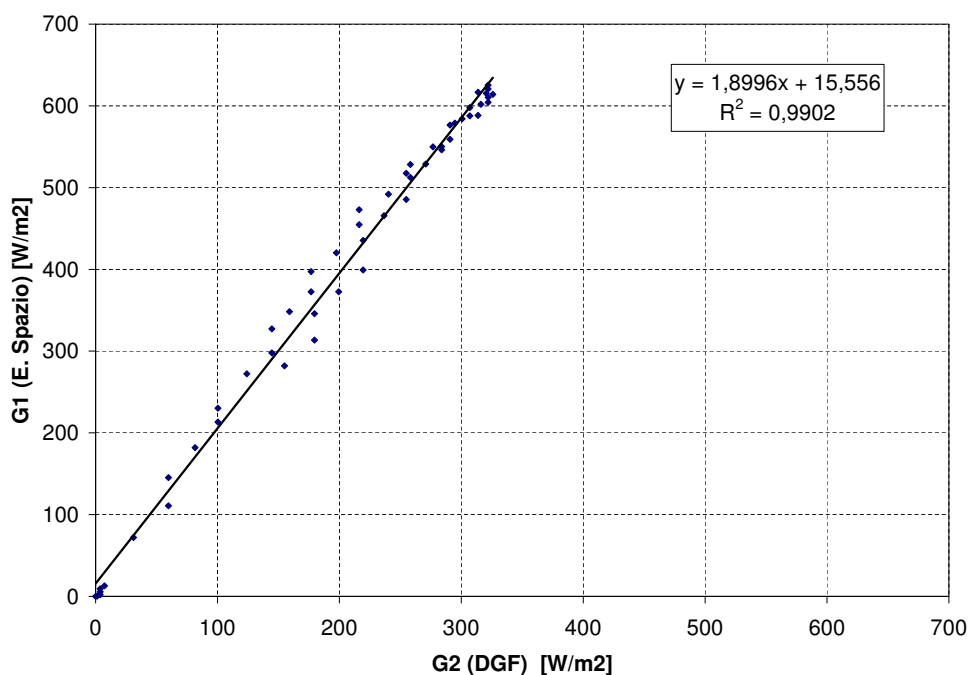


Figura A.1: Comparación entre datos de radiación obtenidos en Edificio Spazio y publicados por DGF.

$$G_1 = 1,8996 \cdot G_2 + 15,556 \quad (\text{A.1})$$

Donde:

- $G_1$  = Dato de radiación global (difusa + directa) tomado en Edificio Spazio, en  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .
- $G_2$  = Dato de radiación global (difusa + directa) tomado del DGF, en  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ .