



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

**SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO DE UNA VIVIENDA  
ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**JUAN FRANCISCO HINOJOSA ESPINOSA**

**PROFESOR GUÍA:**

**ROBERTO HERNÁN ROMÁN LATORRE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**RAMÓN LUIS FREDERICK GONZÁLEZ**

**JESÚS ANDRÉS TORREALBA RIQUELME**

**SANTIAGO DE CHILE**

**OCTUBRE 2011**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: JUAN FCO. HINOJOSA E.  
FECHA: 22/09/2011  
PROF. GUÍA: SR. ROBERTO ROMÁN

## SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO DE UNA VIVIENDA ENERGÉTICAMENTE EFICIENTE

El presente trabajo de título tiene como objetivo general estudiar, por medio de la experimentación y simulación, el circuito primario del Sistema Solar Térmico (SST) instalado en una vivienda energéticamente eficiente. Para realizar el estudio experimental se registran variables relevantes del SST que permiten, en base a cálculos energéticos, caracterizar su funcionamiento. Luego, realizando un análisis detallado de los equipos y registros, se utiliza el software TRNSYS para generar un modelo computacional que se ajuste al comportamiento real del sistema. Los objetivos de este modelo son conocer cómo se desenvuelve el sistema durante el año y explorar cambios no invasivos que permitan mejorar su rendimiento.

Los cálculos realizados con la información del registro de datos indican que el sistema presenta un rendimiento del 26%, aportando 123,08[kWh] durante la semana de medición. De esta misma forma, la situación simulada corresponde a un rendimiento del 24%, aportando un total de 111,13[kWh] semanales. Esto indica que el modelo posee un error relativo menor al 10% en la aproximación del comportamiento de la vivienda. Por otro lado, al proceder con la simulación anual del sistema se obtiene un rendimiento de un 42%, lo que significa un aporte anual de 7642,5[kWh]. Este aporte en energía renovable evita la emisión de 1,6 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales.

En relación a las modificaciones que se pueden realizar para mejorar el rendimiento, se procedió identificando los puntos más sensibles del SST en base a los resultados detallados del registro, resolviendo cómo actuar frente a ellos para optimizar el funcionamiento del sistema. En este contexto, se identificó como uno de los puntos más críticos al sistema de control, al cual se le aplicaron cambios que significaron un incremento en el rendimiento desde un 24% a un 26%, implicando un aumento en el aporte solar del orden de 10[kWh] durante la semana de simulación.

Gracias a los resultados obtenidos se concluye principalmente que es posible utilizar el registro de datos y la simulación computacional para estudiar el comportamiento de un sistema existente, proponiendo soluciones que mejoren su desempeño en base a la simulación de distintos escenarios. De esta forma, se posee la capacidad de evaluar en el corto plazo una gran cantidad de soluciones con un elevado nivel de representatividad, existiendo la posibilidad de escoger la que más se ajuste a las necesidades del sistema en estudio.

## **Agradecimientos**

Dedico todo mi trabajo y años de estudio a mi familia, especialmente a mis padres que siempre se han preocupado de entregarme todas las herramientas posibles para sobrellevar cada obstáculo presentado. Todo lo logrado en estos años es fruto del apoyo incondicional de ellos y de mis hermanas, sin el cual llegar a este momento hubiese sido mucho más complicado.

Agradezco a mis amigos con los cuales conviví durante estos seis años y medio, gracias al trabajo en conjunto, sus consejos y apoyo esta memoria, y todos los proyectos emprendidos, resultaron en un enriquecimiento personal muy importante.

Agradezco a todos los profesores del departamento, en estos momentos valoro enormemente sus clases y peculiares métodos de enseñanza. Específicamente agradezco a aquellos que me dieron la oportunidad de pertenecer al cuerpo docente y así ampliar mis conocimientos en distintas áreas. Adicionalmente, agradezco a los profesores miembros de mi comisión, sin su guía y apoyo este trabajo no hubiese sido posible.

Por último dedico estas líneas a mi polola Jacqueline. Estar con ella durante la mayor parte de los años de universidad ha sido la experiencia más bella que he tenido en mi vida, permitiéndome descubrir que la mezcla de nuestras personalidades y conocimiento resulta en una fuente inagotable de soluciones a cualquier problema que se nos presenta. En fin, haber llegado a este momento es en gran parte gracias a ti, quiero que compartamos nuestras vidas para agradecerte y emprender juntos en muchos otros proyectos.

# Contenidos

|                   |   |          |
|-------------------|---|----------|
| <b>Capítulo 1</b> | <b>Introducción</b>                         | <b>1</b> |
| 1.1               | Antecedentes Generales                      | 1        |
| 1.2               | Motivación                                  | 2        |
| 1.3               | Objetivos y Alcances                        | 2        |
| 1.3.1             | Objetivo General                            | 3        |
| 1.3.2             | Objetivos Específicos                       | 3        |
| 1.3.3             | Alcances                                    | 3        |
| <b>Capítulo 2</b> | <b>Antecedentes</b>                         | <b>5</b> |
| 2.1               | Antecedentes Teóricos                       | 5        |
| 2.1.1             | Energía Solar                               | 5        |
| 2.1.1.1           | Radiación Solar en Chile                    | 7        |
| 2.1.1.2           | Medición de Radiación                       | 7        |
| 2.1.2             | Transferencia de Calor                      | 9        |
| 2.1.2.1           | Conducción                                  | 10       |
| 2.1.2.2           | Convección                                  | 11       |
| 2.1.2.3           | Radiación                                   | 12       |
| 2.1.2.4           | Números Adimensionales                      | 13       |
| 2.1.3             | Sistemas Solares Térmicos                   | 18       |
| 2.1.3.1           | Tipos de Colectores Solares                 | 18       |
| 2.1.3.2           | Colector Solar Plano con Cubierta de Vidrio | 19       |
| 2.1.4             | Intercambiadores de Calor                   | 21       |
| 2.1.4.1           | Intercambio de calor entre dos fluidos      | 24       |
| 2.1.5             | Software                                    | 28       |
| 2.1.5.1           | HOBOWare                                    | 28       |
| 2.1.5.2           | TRNSYS                                      | 29       |
| 2.2               | Antecedentes del Proyecto                   | 32       |
| 2.2.1             | Ubicación y Descripción General             | 32       |
| 2.2.2             | Arquitectura Bioclimática                   | 33       |
| 2.2.2.1           | Orientación                                 | 33       |
| 2.2.2.2           | Construcción                                | 33       |
| 2.2.2.3           | Efecto Chimenea                             | 34       |
| 2.2.2.4           | Ventilación Cruzada                         | 35       |
| 2.2.2.5           | Vegetación Vertical de Hoja Caduca          | 35       |
| 2.2.3             | Envolvente Térmica                          | 35       |

|                   |   |           |
|-------------------|---|-----------|
| 2.2.3.1           | Muros .....   | 36        |
| 2.2.3.2           | Techumbre.....  | 37        |
| 2.2.3.3           | Pisos.....  | 38        |
| 2.2.3.4           | Ventanas y Puertas .....  | 38        |
| 2.2.3.5           | Resumen y Comportamiento general de la Vivienda .....             | 39        |
| 2.2.4             | Sistemas Presentes.....   | 41        |
| 2.2.4.1           | Sistema Solar Térmico (SST).....                                  | 41        |
| 2.2.4.2           | Sistema de Iluminación .....                                      | 47        |
| 2.2.4.3           | Sistema Domótico .....  | 47        |
| <b>Capítulo 3</b> | <b>Metodología .....</b>  | <b>50</b> |
| 3.1               | Levantamiento de Equipos.....                                     | 51        |
| 3.2               | Desarrollo del Modelo .....                                       | 51        |
| 3.2.1             | Colectores Solares .....  | 53        |
| 3.2.2             | Estanques de Acumulación.....                                     | 55        |
| 3.2.2.1           | Supuestos .....   | 57        |
| 3.2.2.2           | Modelo .....  | 58        |
| 3.2.3             | Intercambiador de Calor.....                                      | 63        |
| 3.2.4             | Bomba de Recirculación .....                                      | 64        |
| 3.2.5             | Válvulas, Divisores de Flujo y Mezcladores de Flujo.....          | 64        |
| 3.3               | Monitoreo y Registro .....  | 64        |
| 3.4               | Validación del Modelo .....                                       | 65        |
| 3.5               | Cálculos.....   | 66        |
| <b>Capítulo 4</b> | <b>Resultados.....</b>  | <b>67</b> |
| 4.1               | Registro de Variables.....  | 67        |
| 4.1.1             | Variables de Clima.....   | 67        |
| 4.1.2             | Variables del SST.....  | 70        |
| 4.1.2.1           | Circuito Primario.....  | 70        |
| 4.1.2.2           | Circuito ACS.....   | 73        |
| 4.1.2.3           | Circuito Calefacción.....   | 75        |
| 4.1.2.4           | Circuito Piscina/Jacuzzi.....                                     | 78        |
| 4.1.2.5           | Resumen de Resultados .....                                       | 79        |
| 4.2               | Validación del Modelo .....                                       | 81        |
| 4.2.1             | Modelo Computacional.....   | 81        |
| 4.2.2             | Comparación de Variables .....                                    | 82        |
| 4.2.2.1           | Temperatura de entrada intercambiador EACS.....                   | 83        |
| 4.2.2.2           | Temperatura de salida intercambiador EACS.....                    | 85        |
| 4.2.2.3           | Temperatura entrada y salida intercambiador Piscina/Jacuzzi.....  | 87        |
| 4.2.2.4           | Estado encendido/apagado BR1, V1, V2 y Resistencia Eléctrica..... | 89        |

|                   |   |            |
|-------------------|---|------------|
| 4.2.3             | Comparación de Resultados.....                                | 92         |
| 4.2.4             | Estanque de Acumulación ACS .....                             | 95         |
| 4.3               | Simulación Computacional.....                                 | 97         |
| <b>Capítulo 5</b> | <b>Discusiones .....</b>                                      | <b>100</b> |
| 5.1               | Registro de Variables.....                                    | 100        |
| 5.1.1             | Variables de Clima.....                                       | 100        |
| 5.1.2             | Variables del SST.....  | 101        |
| 5.1.2.1           | Circuito Primario.....  | 102        |
| 5.1.2.2           | Circuito ACS.....   | 110        |
| 5.1.2.3           | Circuito de calefacción .....                                 | 112        |
| 5.1.2.4           | Circuito Piscina/Jacuzzi.....                                 | 112        |
| 5.2               | Validación del Modelo.....                                    | 113        |
| 5.3               | Simulación Computacional.....                                 | 113        |
| 5.3.1             | Simulación anual del SST original .....                       | 113        |
| 5.3.2             | Alternativas al SST original .....                            | 114        |
| 5.3.2.1           | Sistema de Control.....                                       | 115        |
| 5.3.2.2           | Sistema de Colección .....                                    | 117        |
| 5.3.2.3           | Estanques de Acumulación .....                                | 120        |
| 5.3.2.4           | Sistema de Tuberías.....                                      | 121        |
| <b>Capítulo 6</b> | <b>Conclusiones y Recomendaciones .....</b>                   | <b>122</b> |
| 6.1               | Conclusiones .....  | 122        |
| 6.2               | Recomendaciones .....   | 126        |
| <b>Capítulo 7</b> | <b>Glosario .....</b>   | <b>127</b> |
| <b>Capítulo 8</b> | <b>Referencias .....</b>                                      | <b>131</b> |
| <b>Capítulo 9</b> | <b>Anexos .....</b>   | <b>134</b> |
| 9.1               | Anexo A: Registro Solarimétrico .....                         | 134        |
| 9.2               | Anexo B: Diagrama del SST .....                               | 137        |
| 9.3               | Anexo C: Colectores Solares.....                              | 138        |
| 9.4               | Anexo D: Estanques de Acumulación.....                        | 139        |
| 9.5               | Anexo E: Levantamiento de Equipos del Circuito Primario ..... | 140        |
| 9.6               | Anexo F: Conducción Longitudinal .....                        | 142        |
| 9.7               | Anexo G: Intercambiador de Calor.....                         | 144        |
| 9.8               | Anexo H: Código programa estanques acumuladores .....         | 149        |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1: Coordenadas Horizontales .....   | 6  |
| Figura 2.2: Irradiancia Solar anual sobre Sud América .....                                      | 7  |
| Figura 2.3: Pirheliómetro de Angström .....  | 8  |
| Figura 2.4: Piranómetro con banda de sombreado .....   | 8  |
| Figura 2.5: Piranómetro .....  | 9  |
| Figura 2.6: Curva de rendimiento para radiación incidente $G = 800 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ..... | 20 |
| Figura 2.7: Intercambiador de carcasa y tubos .....  | 22 |
| Figura 2.8: Intercambiador de placas .....   | 23 |
| Figura 2.9: Perfil de temperatura flujo paralelo y contracorriente .....                         | 24 |
| Figura 2.10: Curvas de eficiencia intercambio térmico .....                                      | 27 |
| Figura 2.11: Interfaz gráfica HOBOWare .....   | 29 |
| Figura 2.12: Interfaz TRNSYS .....   | 30 |
| Figura 2.13: Representación gráfica de la vivienda .....   | 32 |
| Figura 2.14: Orientación de la vivienda .....  | 33 |
| Figura 2.15: Uso de aleros y marquesinas .....   | 34 |
| Figura 2.16: Efecto chimenea e infiltraciones .....  | 35 |
| Figura 2.17: Sistema EIFS .....  | 37 |
| Figura 2.18: Interacción circuitos del SST .....   | 41 |
| Figura 2.19: Circuito Primario .....   | 42 |
| Figura 2.20: Circuito ACS .....  | 42 |
| Figura 2.21: Circuito Calefacción .....  | 43 |
| Figura 2.22: Circuito Calefacción Piscina/Jacuzzi .....  | 43 |
| Figura 2.23: Esquema SST Domo <sup>2</sup> .....   | 46 |
| Figura 3.1: Modelo computacional SST .....   | 52 |
| Figura 3.2: Nodos o volúmenes de control .....   | 59 |
| Figura 3.3: Intercambiador de calor compartido por dos nodos .....                               | 61 |
| Figura 3.4: Balance energético i-ésimo nodo .....  | 62 |
| Figura 4.1: Medición de radiación y temperatura en el primer período .....                       | 68 |
| Figura 4.2: Medición de radiación y temperatura en el segundo período .....                      | 68 |
| Figura 4.3: Medición de radiación y temperatura en el tercer período .....                       | 69 |
| Figura 4.4: Variables de temperatura del Circuito Primario .....                                 | 70 |
| Figura 4.5: Estado encendido/apagado de BR1 y V1 .....   | 71 |
| Figura 4.6: Volumen de circulación acumulado del Circuito Primario .....                         | 72 |
| Figura 4.7: Perfil flujo másico del Circuito Primario .....                                      | 73 |
| Figura 4.8: Estado encendido/apagado de Resistencia Eléctrica .....                              | 74 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.9: Volumen de consumo acumulado del Circuito ACS.....                                 | 74  |
| Figura 4.10: Perfil flujo másico del Circuito ACS.....   | 75  |
| Figura 4.11: Variables de temperatura del Circuito de Calefacción .....                        | 76  |
| Figura 4.12: Estado encendido/apagado de BR2 y Bomba de Calor.....                             | 77  |
| Figura 4.13: Volumen de circulación acumulado del Circuito Calefacción .....                   | 77  |
| Figura 4.14: Temperatura de Piscina y Jacuzzi.....   | 78  |
| Figura 4.15: Modelo computacional del SST.....   | 81  |
| Figura 4.16: Detalle modelo del SST.....   | 82  |
| Figura 4.17: Comparación temperatura de entrada intercambiador de EACS.....                    | 83  |
| Figura 4.18: Influencia resistencia eléctrica en temperatura de entrada de EACS .....          | 84  |
| Figura 4.19: Comparación temperatura de salida intercambiador de EACS.....                     | 85  |
| Figura 4.20: Influencia de la falta de flujo en temperatura de entrada de EACS.....            | 86  |
| Figura 4.21: Comparación temperatura de entrada/salida del intercambiador Piscina/Jacuzzi..... | 88  |
| Figura 4.22: Comparación estado BR1 .....  | 90  |
| Figura 4.23: Comparación estado V1 .....   | 91  |
| Figura 4.24: Comparación estado Resistencia Eléctrica.....                                     | 91  |
| Figura 4.25: Comportamiento de EACS en semana de validación.....                               | 95  |
| Figura 4.26: Efecto del consumo de ACS sobre estratificación.....                              | 96  |
| Figura 4.27: Efecto del encendido/apagado resistencia eléctrica sobre estratificación.....     | 97  |
| Figura 5.1: Relación entre el comportamiento de temperaturas y radiación.....                  | 103 |
| Figura 5.2: Detalle comportamiento temperaturas circuito primario .....                        | 104 |
| Figura 5.3: Relación entre estado BR1 y radiación.....   | 106 |
| Figura 5.4: Detalle comportamiento BR1 en relación a radiación .....                           | 107 |
| Figura 5.5: Efecto resistencia eléctrica sobre BR1y T2.....                                    | 108 |
| Figura 5.6: Temperatura máxima a la salida de los colectores.....                              | 118 |
| Figura 9.1: Conducción Longitudinal .....  | 142 |
| Figura 9.2: Representación circuital del intercambio térmico .....                             | 145 |



## Índice de Tablas

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 2.1: Superficies Vidriadas .....  | 39  |
| Tabla 2.2: Resumen características térmicas elementos de la vivienda .....                | 39  |
| Tabla 4.1: Resultados característicos variables de clima.....                             | 69  |
| Tabla 4.2: Detalle temperaturas Circuito Primario .....                                   | 71  |
| Tabla 4.3: Detalle volumen acumulado Circuito Primario.....                               | 72  |
| Tabla 4.4: Resultados característicos del Circuito Primario.....                          | 73  |
| Tabla 4.5: Resultados característicos del Circuito ACS.....                               | 74  |
| Tabla 4.6: Detalle temperaturas en la Bomba de Calor.....                                 | 76  |
| Tabla 4.7: Detalle temperaturas de entrada/salida a Losa Radiante.....                    | 77  |
| Tabla 4.8: Resultados característicos de la Bomba de Calor .....                          | 78  |
| Tabla 4.9: Resultados característicos Circuito Piscina/Jacuzzi.....                       | 78  |
| Tabla 4.10: Resumen de resultados.....  | 79  |
| Tabla 4.11: Emisiones de CO <sub>2</sub> .....  | 80  |
| Tabla 4.12: Emisiones de CO <sub>2</sub> evitadas sin considerar sistemas auxiliares..... | 80  |
| Tabla 4.13: Emisiones de CO <sub>2</sub> evitadas considerando sistemas auxiliares.....   | 80  |
| Tabla 4.14: Resumen resultados temperatura entrada intercambiador de EACS.....            | 84  |
| Tabla 4.15: Efecto de eliminar datos relacionados a resistencia eléctrica.....            | 85  |
| Tabla 4.16: Efecto de eliminar datos relacionados a falta de flujo por EACS.....          | 87  |
| Tabla 4.17: Comparación temperatura de entrada de IC.....                                 | 89  |
| Tabla 4.18: Comparación temperatura de salida de IC.....                                  | 89  |
| Tabla 4.19: Comparación resultados situación real y simulada período N°1.....             | 92  |
| Tabla 4.20: Análisis de error en resultados de simulación período N°1.....                | 93  |
| Tabla 4.21: Comparación del rendimiento sistema simulado período N°1.....                 | 93  |
| Tabla 4.22: Comparación resultados situación real y simulada período N°2.....             | 94  |
| Tabla 4.23: Análisis de error en resultados de simulación período N°2.....                | 95  |
| Tabla 4.24: Resultados generales de simulación anual.....                                 | 98  |
| Tabla 4.25: Detalle mensual de simulación anual .....                                     | 98  |
| Tabla 4.26: Emisiones de CO <sub>2</sub> evitadas durante el año de simulación.....       | 99  |
| Tabla 5.1: Comparación registro de temperatura .....                                      | 100 |
| Tabla 5.2: Comparación registro de irradiancia.....                                       | 101 |
| Tabla 5.3: Rendimientos promedio real y simulados .....                                   | 114 |
| Tabla 5.4: Modificación sistema de control.....   | 116 |
| Tabla 5.5: Comparación uso de seguimiento en sistema de colección.....                    | 119 |
| Tabla 5.6: Comparación uso de aislación en tuberías.....                                  | 121 |

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes Generales

Últimamente ha aumentado la cantidad de proyectos que proponen suplir el uso de combustibles fósiles por combustibles limpios y renovables. Esto se debe principalmente a la concientización del daño que continuamente se produce al medio ambiente con el uso convencional de la energía. Ejemplo de lo anterior es la meta que se ha impuesto el Gobierno de Chile, de poseer una matriz energética cuyo 20% esté generado por Energías Renovables No Convencionales (ERNC) para el año 2020.

En este marco han surgido iniciativas que permiten llevar esta conciencia como país a un ámbito más personal, con el objetivo de promover el desarrollo sustentable en espacios de esparcimiento o de convivencia. Algunos ejemplos de estas iniciativas son la aprobación reciente del beneficio tributario para la instalación de colectores solares térmicos en viviendas nuevas de hasta 4500 UF y la creciente implementación de soluciones habitacionales que promueven el confort térmico en base al uso mejorado de tecnologías convencionales (como la aislación perimetral) y al uso de los recursos naturales disponibles.

Dentro de este contexto en el año 2008 comienza a construirse el proyecto domiciliario Domo<sup>2</sup>, vivienda unifamiliar que posee la capacidad de optimizar el gasto energético y, por lo tanto, de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> liberadas al ambiente. Estas características se logran principalmente gracias al uso de la energía solar disponible por medio de tecnologías pasivas y activas.

Las tecnologías solares pasivas se caracterizan por utilizar la energía solar en forma directa, es decir, sin requerir sistemas mecánicos ni fuentes externas de energía. En el caso de Domo<sup>2</sup> este tipo de tecnología consiste básicamente en la implementación de una construcción basada en el aprovechamiento de los recursos naturales disponibles. Por otro lado, las tecnologías solares activas se caracterizan por utilizar la energía solar en conjunto con sistemas mecánicos y eléctricos que permiten ampliar su potencial de uso. En Domo<sup>2</sup> este tipo de tecnología consiste en la

implementación de un sistema solar térmico (SST) destinado a apoyar el consumo de agua caliente sanitaria (ACS), calefacción ambiental y calefacción de piscina y jacuzzi.

Además, la vivienda cuenta con un conjunto de sensores que se ubican en sus habitaciones y en distintos componentes de sus sistemas, otorgando la capacidad de monitorear y registrar datos concernientes a su comportamiento térmico y al funcionamiento de sus sistemas. Esta es una de las características más relevantes de Domo<sup>2</sup> ya que permite obtener una gran cantidad de información que puede ser utilizada para estudiar y evaluar el desempeño de las distintas tecnologías instaladas en la vivienda.

## **1.2 Motivación**

Actualmente existe en el país un aumento en la demanda de proyectos inmobiliarios con una marcada orientación a la eficiencia energética y al uso de energías renovables, lo que ha incidido en un incremento en la cantidad de empresas que ofrecen el diseño e instalación de este tipo de tecnologías como su principal producto de desarrollo. En este contexto, es importante contar con herramientas que permitan diseñar y evaluar estas tecnologías con el objetivo de reducir errores en su diseño e instalación, los cuales son producidos en su mayoría por la poca experiencia que en general se posee en este tipo de proyectos.

En distintas partes del mundo el desarrollo de tecnologías que utilizan Energías Renovables No Convencionales (ERNC), y de todas las tecnologías en general, está muy ligado a la utilización de software especializado en su diseño y evaluación. En este sentido, el análisis computacional ha permitido evaluar viviendas y sistemas en distintos escenarios climatológicos sin la necesidad de hacer experimentos costosos y que toman un mayor tiempo.

Debido a estos motivos resulta interesante realizar un estudio en la vivienda Domo<sup>2</sup> aprovechando la facilidad que ésta presenta para la obtención de datos relacionados al funcionamiento de su SST. Con esta información se puede realizar un estudio general del sistema solar instalado en la vivienda y desarrollar una herramienta computacional que permita evaluar sistemas solares térmicos y así identificar si éstos funcionan correctamente o si es posible mejorarlos al reconocer los puntos críticos en su funcionamiento.

## **1.3 Objetivos y Alcances**

A continuación se hará referencia a los objetivos planteados para el trabajo de título y las limitaciones que éste tiene.

### 1.3.1 Objetivo General

El objetivo general del Trabajo de Título es evaluar el circuito primario del sistema solar térmico instalado en la vivienda por medio del análisis de datos experimentales y de resultados obtenidos mediante la simulación de un modelo computacional del circuito.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para llevar a desarrollar el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos.

- Analizar el diseño e instalación del SST, realizando una descripción detallada de sus componentes que permita generar un modelo inicial del sistema.
- Registrar y analizar la información relevante al funcionamiento del SST, caracterizando el comportamiento de los elementos que forman parte de éste en función de las condiciones de radiación y temperatura ambiente.
- Desarrollar un modelo de simulación del circuito primario del SST en base a la descripción de componentes y a su funcionamiento, dicho modelo se debe ajustar al comportamiento real del circuito.
- Determinar, gracias al análisis del registro de variables y a los resultados de las simulaciones, los consumos y aportes energéticos que presenta el sistema. Adicionalmente, se presentan los rendimientos que poseen sus equipos y las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas con su uso.
- Proponer mejoras al SST actual en base al análisis de los resultados obtenidos, utilizando la simulación como método de evaluación de las propuestas generadas.

### 1.3.3 Alcances

A continuación se presentan las limitaciones del trabajo de título:

- Análisis de información: Se analizará únicamente la información correspondiente al sistema solar térmico. La vivienda cuenta con distintos sistemas que inciden de una u otra forma en su comportamiento térmico, como la disposición de ventanas y accionamiento de Muro Trombe. Por este motivo es relevante presentar y definir los elementos que componen el SST instalado en la vivienda:

- Circuito Primario: Los colectores solares de la vivienda se encuentran conectados en un circuito cerrado y forzado. Todos los componentes por los cuales circula el fluido caloportador proveniente de los colectores forman parte de este circuito.
  - Circuito Agua Caliente Sanitaria: Corresponde al conjunto de componentes por los cuales circula el agua de consumo de la vivienda.
  - Circuito de Calefacción Ambiental: Corresponde a todos los componentes por los cuales circula el fluido utilizado para calefacción ambiental.
  - Circuito Piscina/Jacuzzi: Corresponde a todos los componentes por los cuales circula el fluido utilizado en la piscina y jacuzzi.
- Interacciones entre sistemas: Se discutirán interacciones entre SST y otros sistemas sólo cuando sea pertinente. Si bien existen sistemas completamente aislados del SST, otros tienen una relación directa con éste por lo que resulta imperante discutir sus interacciones.
  - Modelo: El modelo que se somete a simulación corresponde a una recreación del circuito primario del SST, sin considerar la presencia de los otros circuitos. Sin embargo, la simulación sobre este circuito proporcionará información relevante con respecto a la interacción de éste con el resto de los circuitos del sistema.
  - Generación de propuestas: Las propuestas al SST de la vivienda se realizarán en base a los resultados de la simulación y al análisis de datos registrados en la vivienda.
  - Evaluación de propuestas: La evaluación de las propuestas se efectuará por medio de un análisis técnico y por la simulación de éstas en el modelo. De corresponder se añadirá un sencillo análisis económico.
  - Implementación de propuestas: Se implementarán las mejoras propuestas al SST siempre y cuando no impliquen la modificación de aspectos constructivos de la vivienda ni de la instalación del sistema.

## Capítulo 2

### Antecedentes

En este capítulo se presentan los antecedentes del Trabajo de Título, para lo cual se utiliza el siguiente esquema:

- Antecedentes Teóricos: Corresponde básicamente a las materias a tratar en el Trabajo de Título
- Antecedentes de la Vivienda: Se presentarán las principales características de la vivienda Domo<sup>2</sup>.

#### 2.1 Antecedentes Teóricos

En la presente sección se exponen los principales antecedentes de contenidos que serán utilizados para el desarrollo del Trabajo de Título.

##### 2.1.1 Energía Solar

El Sol es un cuerpo en el cual ocurren reacciones químicas que le permiten alcanzar temperaturas cercanas a los 6000 [K] en su superficie. Producto de esto el Sol emite energía en forma de ondas electromagnéticas que abarcan parte del espectro Ultra Violeta (UV), el espectro visible y parte del espectro infrarrojo (IR), esta energía se denomina irradiancia espectral.

El máximo de la curva de irradiancia espectral extraterrestre representa la irradiación incidente fuera de la atmósfera, este valor depende principalmente de la curvatura de la tierra y de la época del año. Para efectos prácticos se considera una aproximación de este valor conocida como Constante Solar ( $G_{SC}$ ). [1]

$$G_{SC} = 1353 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad 2.1$$

La radiación global ( $G$ ) en la superficie de la tierra está compuesta por distintos tipos, lo que se debe principalmente a la presencia de la atmósfera y a los efectos de absorción, reflexión y difusión que esta produce. En este contexto la radiación global se puede expresar como: [2]

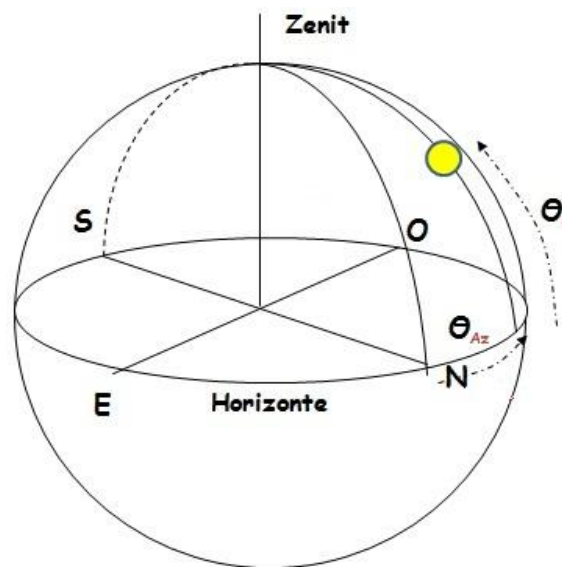
$$G = I_b + D$$

2.2

donde:

- Radiación Directa ( $I_b$ ): Es la radiación solar que incide en la tierra sin ser dispersada por la atmósfera. Presenta atenuación producto de la presencia de la atmósfera y de la época del año, por lo que varía entre 800 y 1000[W/m<sup>2</sup>] como valor máximo. Predomina en cielos despejados.
- Radiación Difusa ( $D$ ): Es la radiación solar que incide en distintas direcciones al ser dispersada por la atmósfera. Incluye además la radiación incidente producto de la reflexión, la cual depende del albedo de los objetos. Predomina en días nublados.

Con los datos anteriores se tiene una mayor aproximación a la radiación global que incide en la superficie de la tierra. Por otro lado, para definir completamente la radiación global se debe incluir información de la posición del sol. La Figura 2.1 [1] presenta un esquema donde se muestra el uso de coordenadas horizontales para definir la posición solar.



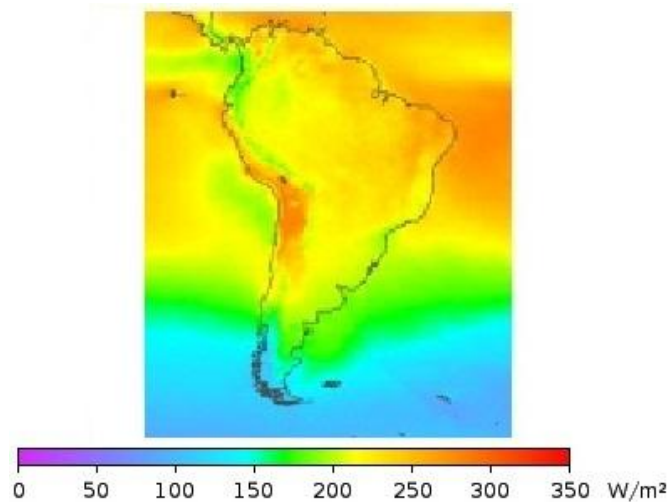
**Figura 2.1: Coordenadas Horizontales**

donde:  $\theta_{Az}$  es el ángulo acimutal del sol  
 $\theta_h$  es la altura solar

En este mismo contexto existen modelos que predicen con gran exactitud la radiación solar en un lugar y momento determinado. A continuación se describe uno de los modelos más simples para obtener una aproximación de la radiación global incidente.

### 2.1.1.1 Radiación Solar en Chile

El territorio chileno continental comprende desde los 17°30' a los 56°30' Latitud Sur, de lo que se desprende que la radiación incidente sobre el país es muy variada. Por este motivo existen zonas con muchas ventajas para el uso de radiación solar (Zona Norte) y otras con menos posibilidades de desarrollar este tipo de proyectos (Zona Austral). La Figura 2.2 [3] muestra un esquema que representa la irradiancia promedio anual incidente en el territorio sudamericano.



**Figura 2.2: Irradiancia Solar anual sobre Sud América**

De la Figura 2.2 se puede observar que la situación del desierto chileno es privilegiada frente a cualquier territorio de Sudamérica gracias a su latitud y a sus cielos claros. Además se evidencia que la irradiancia incidente sobre gran parte del territorio chileno es considerablemente alta, existiendo gran variación a medida que se aumenta la latitud.

Debido a que el proyecto a estudiar se ubica en Santiago se focalizará en mediciones de radiación sobre esta ciudad. Para mostrarlas características de la radiación en Santiago se presenta en el Anexo A un extracto del Registro Solarimétrico entregado por el Gobierno de Chile en el año 2008, este documento se titula *“Irradiancia Solar en Territorios de la República de Chile”*.

### 2.1.1.2 Medición de Radiación

Existen diversos tipos de instrumentos que permiten medir la radiación solar que incide sobre la tierra. Las diferencias que presentan estos instrumentos radican básicamente en la componente de radiación que se mide. En este sentido se presenta la siguiente clasificación de instrumentos:

- **Instrumentos de Radiación Directa:** Para medir la radiación directa se utiliza un instrumento conocido como Pirheliómetro. El principio básico de funcionamiento consiste en una



superficie receptora que debe estar dispuesta normalmente a los rayos solares incidentes y a un obturador que permite el ingreso de la radiación proveniente solamente del sol. El más conocido es el Pirheliómetro de compensación de Angström que se presenta en la Figura 2.3. [4]



**Figura 2.3: Pirheliómetro de Angström**

- Instrumentos de Radiación Difusa: Para medir la radiación difusa se utiliza un instrumento de medición de radiación global con pantalla de sombreamiento. El principio básico de funcionamiento consiste en medir la radiación que incide sobre el instrumento sin considerar la radiación directa proveniente del sol, para lo cual se debe bloquear el disco solar con una pantalla de sombreamiento. Los instrumentos más utilizados son los Piranómetros con dispositivo de sombreamiento como el que se muestra en la Figura 2.4. [4]



**Figura 2.4: Piranómetro con banda de sombreamiento**

- Instrumentos de Radiación Global: Para medir la radiación global que incide sobre la tierra se utilizan los Piranómetros, los cuales básicamente consisten en una superficie receptora protegida por una cúpula de vidrio. La superficie receptora posee una termocupla que al calentarse genera una diferencia de potencial que se asocia a radiación según un parámetro característico de cada instrumento. Entre las particulares del piranómetro destaca la posibilidad de medir la radiación global incidente sobre una superficie horizontal o inclinada y la reflejada por la tierra. En la Figura 2.5 [4] se muestra este instrumento.



Figura 2.5: Piranómetro

### 2.1.2 Transferencia de Calor

Para introducir algunos conceptos de transferencia de calor es necesario hacer una primera mención al Primer Principio de la Termodinámica o Principio de Conservación de la Energía. A continuación se enuncia este principio para sistemas cerrados.

$$Q = W + \frac{dE}{dt} \quad 2.3$$

donde:  $Q$  es la tasa de transferencia de calor absorbido por el sistema [ $W$ ]  
 $W$  es la tasa de transferencia de trabajo realizado por el sistema [ $W$ ]  
 $E$  es la energía interna del sistema [ $J$ ]

Si se considera que la mayoría de los análisis de transferencia de calor se realizan sin transferencia de trabajo y que las sustancias participantes son incompresibles, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{dE}{dt} = mC_p \frac{dT}{dt} \quad 2.4$$

donde:  $m$  es la masa del sistema [ $kg$ ]  
 $C_p$  es el calor específico del sistema [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ]  
 $\frac{dT}{dt}$  es la variación de temperatura por unidad de tiempo [ $\frac{K}{s}$ ]

Para estudiar el comportamiento de un sistema solar térmico es necesario describir los mecanismos de transferencia de calor presentes y las principales herramientas existentes que permiten caracterizar el traspaso de calor entre fluidos. En este contexto, se procederá a describir brevemente los modelos de transferencia de calor [5], haciendo hincapié en la influencia de éstos sobre los sistemas solares térmicos, y se incorporará una discusión de los números adimensionales que se utilizan para resolver dichos modelos.

2.1.2.1 Conducción

La conducción corresponde a la transferencia de calor en un sólido o un fluido en reposo mediante movimientos de rotación y vibración a escala molecular. Estos movimientos son más intensos a altas temperaturas por lo que la transferencia de calor ocurre desde zonas de alta a baja temperatura. En este sentido, el matemático y físico francés Fourier describe el flujo de calor como proporcional al gradiente local de temperatura y a la conductividad térmica del medio, relación matemática conocida como la Ley de Fourier.

Si en un medio existe un campo de temperatura  $T(x, y, z, t) = T(\vec{r}, t)$ , la ley de Fourier expresa los flujos de calor instantáneos por:

$$\vec{q} = -k\nabla T \tag{2.5}$$

donde:  $k$  es la conductividad térmica  $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$

$\vec{q}$  es el flujo de calor por unidad de tiempo y área  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

La Ecuación 2.5 puede escribirse en sus componentes direccionales como:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \tag{2.6}$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \tag{2.7}$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \tag{2.8}$$

Es importante destacar que la conductividad térmica se representa como:

$$k = k(\vec{r}, T(\vec{r}, t)) \tag{2.9}$$

Por lo que la conductividad depende tanto de la posición como de la temperatura. Sin embargo, la mayoría de los medios son bastante homogéneos por lo que la conductividad puede considerarse dependiente solamente de la temperatura ( $k = k(T)$ ).

Este mecanismo de transferencia de calor permite calcular las pérdidas por conducción que ocurren en el sistema solar térmico. Estas pérdidas están representadas principalmente por la transferencia de calor en los sistemas placa colectora/medio, tuberías/medio y estanques/medio. Como ejemplo se presenta a continuación la ecuación para calcular las pérdidas entre la placa colectora y el medio.

$$q = k \frac{(T_p - T_a)}{e} \quad 2.10$$

donde:  $T_p$  es la temperatura de la placa colectora  
 $T_a$  es la temperatura ambiente  
 $e$  es el espesor de la placa [m]

### Resistencia y Transmitancia Térmica

Dentro del fenómeno de conducción se hace relevante referirse a la resistencia y transmitancia térmica. La resistencia térmica mide la capacidad de un material para oponerse al flujo de calor y se calcula como:

$$R = \frac{e}{k} \quad 2.11$$

donde:  $R$  es la resistencia térmica del material  $\left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right]$

Este concepto permite la facilidad de calcular la resistencia térmica de un elemento heterogéneo, como un muro, a través de la suma de las resistencias de todos los materiales que lo componen. Por otro lado, la transmitancia térmica es el coeficiente de transferencia de calor del elemento en cuestión, coeficiente que permite caracterizar el comportamiento térmico de dicho elemento.

$$U = \frac{1}{R} \quad 2.12$$

donde:  $U$  es la transmitancia térmica o coeficiente de transferencia de calor  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

Así, el flujo de calor derivado de la Ecuación 2.10 se puede escribir como:

$$Q = UA(T_p - T_a) \quad 2.13$$

donde:  $Q$  es el flujo de calor del elemento en cuestión [W]  
 $A$  es el área de la sección transversal del elemento en cuestión [m<sup>2</sup>]

#### 2.1.2.2 Convección

La convección corresponde a la transferencia de calor dentro de un fluido que fluye con movimientos a escala macroscópica, es decir, la transferencia de calor ocurre por la mezcla de porciones del fluido a distintas temperaturas. Este movimiento macroscópico del fluido se conoce como campo de velocidades y es el encargado de generar el traspaso de calor. Newton planteó, en la

que se conoce como la Ley de Enfriamiento de Newton, que el flujo de calor de un cuerpo al espacio es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y sus alrededores.

En este sentido se describe la siguiente ecuación para el cálculo del flujo de calor por convección en estado estacionario:

$$q = h(T_b - T_\infty) \quad 2.14$$

donde:  $h$  es el coeficiente convectivo  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

$T_b$  es la temperatura del cuerpo

$T_\infty$  es la temperatura de los alrededores del cuerpo

Este modelo de transferencia permite calcular la pérdida de calor producto de la convección que se origina entre la superficie del colector y el medio. Además, se utiliza en la modelación de componentes como los estanques de acumulación, donde el traspaso de energía entre porciones diferentes de fluidos se hace relevante.

Es importante mencionar que la Ecuación 2.12 puede ser utilizada como representación tanto del mecanismo de conducción como del de convección, debido a que puede definirse una resistencia térmica en base al coeficiente convectivo, lo que conlleva al cálculo de una resistencia global que considera efectos convectivos junto a mecanismos de conducción.

### 2.1.2.3 Radiación

El intercambio de calor radiativo entre cuerpos a temperaturas distintas del cero absoluto y que se encuentra en el rango de longitudes de onda entre 0,1 y 100[ $\mu m$ ] se puede expresar por:

$$q = \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad 2.15$$

donde:  $\varepsilon$  es el factor de emisividad del cuerpo 1

$T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas del cuerpo 1 y 2 respectivamente [K]

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right]$  es la constante de Stefan - Boltzmann

La Ecuación 2.15 representa el flujo de calor desde el cuerpo 1 al cuerpo 2, considerando a este último como cuerpo negro que rodea al cuerpo 1 completamente. De esta forma, la Ecuación 2.15 se utiliza principalmente para calcular las pérdidas radiativas que se producen entre la superficie del colector y el medio.

#### 2.1.2.4 Números Adimensionales

Los números adimensionales corresponden a valores que no poseen unidades físicas pero que representan propiedades físicas determinadas. En este contexto, los números adimensionales permiten caracterizar el comportamiento de sistemas en relación al valor que éstos toman en situaciones dadas.

A continuación se presentan algunos números adimensionales que, según las propiedades físicas que representan, son utilizados durante el desarrollo del trabajo de título.[6]

##### Número de Reynolds

El número de Reynolds fue propuesto por Osborne Reynolds en base a sus estudios en el movimiento de fluidos viscosos. Su desarrollo se basa en el análisis de las fuerzas de inercia y viscosidad relacionadas con la geometría del fluido. De esta forma, el número de Reynolds para un fluido que circula en un ducto se expresa comúnmente como:

$$Re_D = \frac{\rho V d}{\mu} \quad 2.16$$

donde:  $Re_D$  es el número de Reynolds para ductos

$\rho$  es la densidad del fluido  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$V$  es la velocidad del fluido  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$d$  es el diámetro del ducto  $[m]$

$\mu$  es la viscosidad del fluido  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$

Si se realiza un pequeño desarrollo algebraico se puede escribir el número de Reynolds en función del flujo másico dentro del ducto circular:

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad 2.17$$

donde:  $\dot{m}$  es el flujo másico del fluido dentro del ducto  $\left[\frac{kg}{s}\right]$

El número de Reynolds permite determinar si un fluido se encuentra en régimen laminar o turbulento analizando su valor crítico. Si el fluido se encuentra en un ducto se presentan los siguientes casos:

$$\begin{aligned} Re_D < 2300 &\rightarrow \text{Flujo Laminar} \\ Re_D > 4000 &\rightarrow \text{Flujo Turbulento} \end{aligned} \quad 2.18$$

Para valores de  $Re_D$  entre 2300 y 4000 se está en un régimen de transición en el cual puede desarrollarse flujo laminar y/o turbulento.

### Número de Prandtl

El número de Prandtl fue introducido por Ludwig Prandtl en base a los estudios realizados sobre el comportamiento de la capa límite que se produce entre un cuerpo y el fluido. Su desarrollo se basa en el análisis de la razón entre la viscosidad cinemática y la difusividad térmica, por lo que el número de Prandtl permite establecer una relación entre la difusión de momento y la difusión de calor. Su expresión más común es:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha_t} \quad 2.19$$

donde:  $Pr$  es el número de Prandtl

$\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

$\alpha_t$  es la difusividad térmica del fluido  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Otra forma de escribir el número de Prandtl es:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad 2.20$$

donde:  $C_p$  es la capacidad calorífica específica del fluido  $\left[\frac{J}{kg K}\right]$

$\mu$  es la viscosidad del fluido  $\left[\frac{kg}{m s}\right]$

$k$  es el coeficiente conductivo del fluido  $\left[\frac{W}{m K}\right]$

En este contexto, un número de Prandtl bajo indica que la difusión térmica es mayor que la viscosidad, por lo que predomina la transferencia de calor por conducción. En cambio, si el número de Prandtl es alto la difusión de momento es más relevante, por lo que predomina la transferencia de calor por convección. De esta forma el número de Prandtl permite comparar el ancho de la capa límite de momento o velocidad con el ancho de la capa límite térmica.

### Número de Grashof

El número de Grashof fue introducido por el ingeniero alemán Franz Grashof en base a sus estudios realizados sobre los efectos de la convección natural en fluidos. Su desarrollo se basa en el análisis de la razón entre las fuerzas de empuje y la viscosidad, por lo que permite relacionar los efectos de empuje con la difusión de momento en condiciones de convección natural. Una de las principales ecuaciones para el cálculo de este número es:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad 2.21$$

donde:  $Gr$  es el número de Grashof  
 $g$  es la aceleración de gravedad  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$   
 $\beta$  es el coeficiente térmico de expansión volumétrica  $\left[\frac{1}{^\circ C}\right]$   
 $\Delta T$  es la diferencia de temperatura  $[^\circ C]$   
 $L$  es la longitud del cuerpo donde circula el fluido  $[m]$   
 $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Al igual que el número de Reynolds, el Grashof indica si el flujo presente tiene régimen laminar o turbulento, dándose los siguientes valores para el caso de placas verticales en convección natural:

$$\begin{aligned} Gr < 10^8 &\rightarrow \text{Flujo Laminar} \\ Gr > 10^9 &\rightarrow \text{Flujo Turbulento} \end{aligned} \quad 2.22$$

Para los valores de  $Gr$  entre  $10^8$  y  $10^9$  se está en un régimen de transición en el cual puede desarrollarse flujo laminar y/o turbulento.

### Número de Rayleigh

El número de Rayleigh fue introducido por el físico británico John William Strutt Rayleigh (o más conocido como Lord Rayleigh) en base a sus estudios sobre el efecto de convección natural en fluidos, descubriendo una relación entre la fuerza de empuje, la difusividad térmica y la viscosidad. El desarrollo de este número adimensional se basa en el producto de los número de Grashof y Prandtl, por lo que su análisis físico corresponde a la razón entre las fuerzas de empuje y el producto entre la viscosidad con la difusividad térmica. Una de las principales ecuaciones de este número es:

$$Ra = Gr Pr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha_t} \quad 2.23$$

donde:  $Ra$  es el número de Rayleigh  
 $Gr$  es el número de Grashof  
 $Pr$  es el número de Prandtl  
 $g$  es la aceleración de gravedad  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$   
 $\beta$  es el coeficiente térmico de expansión volumétrica  $\left[\frac{1}{^\circ C}\right]$



$\Delta T$  es la diferencia de temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$L$  es la longitud del cuerpo donde circula el fluido [ $m$ ]

$\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido [ $\frac{m^2}{s}$ ]

$\alpha_t$  es la difusividad térmica del fluido [ $\frac{m^2}{s}$ ]

Las fuerzas de empuje promueven la convección dentro del fluido debido al ascenso de éste mientras la difusividad térmica y la viscosidad se oponen disipando dicho ascenso. Dentro de este contexto, si  $Ra = 0$ , entonces el gradiente de temperatura es nulo y el sistema está en equilibrio. Sin embargo, si  $Ra$  es muy grande, entonces la fuerza de flotamiento supera los efectos disipativos y se establece flujo convectivo. De esta forma se puede definir un valor crítico para el número de Rayleigh que indica si el mecanismo de transferencia de calor que predomina es la conducción o convección. Los principales resultados derivados de la experiencia indican que el valor crítico corresponde a

$$Ra_c = 1708 \pm 50 \quad 2.24$$

donde:  $Ra_c$  es el valor crítico de Rayleigh para un fluido entre placas horizontales

Es importante mencionar que el número de Rayleigh se utiliza principalmente para describir los procesos de transferencia de calor en superficies verticales con efectos de convección natural. Para el caso de superficies horizontales se debe analizar además el número de Nusselt, el cual permite representar el comportamiento térmico del fluido en distintos casos.

### Número de Nusselt

El número de Nusselt fue introducido por Wilhelm Nusselt en base a sus estudios en la transferencia de calor y momento en tubos. Su desarrollo se basa en el análisis de la transferencia de calor por convección y por conducción, considerando efectos de convección natural y forzada. La principal ecuación utilizada para calcular este número adimensional es:

$$Nu_D = \frac{hd}{k} \quad 2.25$$

donde:  $Nu_D$  es el número de Nusselt para ductos

$h$  es el coeficiente convectivo del fluido [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]

$d$  es el diámetro del ducto [ $m$ ]

$k$  es el coeficiente conductivo del fluido [ $\frac{W}{m K}$ ]

Entre los principales usos de este número adimensional se encuentra el cálculo del coeficiente convectivo de fluidos bajo ciertas características, para lo cual se despeja la Ecuación 2.25 como sigue:

$$h = \frac{Nu_D k}{D} \quad 2.26$$

Para calcular el número de Nusselt existen distintas correlaciones en base a las condiciones de flujo y geometría del fluido, utilizándose números adimensionales como parámetros de dichas correlaciones. A continuación se presentan las correlaciones utilizadas durante el desarrollo del trabajo de título: [7]

1. Correlación de Petukhov y Gnielinski: Esta correlación se utiliza para un flujo desarrollado en régimen crítico o turbulento al interior de un cilindro.

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad 2.27$$

$$f = [1,82 \log(Re_D) - 1,64]^{-2} \quad 2.28$$

2. Correlación de Hausen y Stephan: Esta correlación se utiliza para un flujo en desarrollo y en régimen laminar al interior de un cilindro.

$$Nu_D = 4,4 + \frac{a \left(\frac{Re_D Pr d}{L}\right)^{1,666}}{1 + b \left(\frac{Re_D Pr d}{L}\right)^{1,125}} \quad 2.29$$

$$a = (-1,7419 \cdot 10^{-4})(Pr - 0,7) + 0,00398 \quad 2.30$$

$$b = (-5,8387 \cdot 10^{-4})(Pr - 0,7) + 0,0114 \quad 2.31$$

donde:  $d$  es el diámetro interno del intercambiador de calor [m]

$L$  es el largo del intercambiador de calor [m]

3. Correlación de Churchill y Bernstein: Esta correlación se utiliza para un flujo desarrollado en el exterior de un cilindro considerando efectos de convección forzada.

$$Nu_D = \left[ 1,08 \sqrt{Re_{D,e}} \sqrt[3]{Pr_e} \left( 1 + \left( \frac{0,412}{Pr_e} \right)^{2/3} \right)^{-1/4} \right]^{1/3} \quad 2.32$$

4. Correlación de McAdams: Esta correlación se utiliza para un flujo desarrollado en el exterior de un cilindro en convección natural y es válida cuando la temperatura superficial es constante

$$Nu_D = 0,5(Ra_D)^{0,25} \quad 2.33$$

Los coeficientes 0,5 y 0,25 corresponden a una aproximación realizada por McAdams para una superficie cilíndrica con parte caliente hacia arriba y fría hacia abajo. Sin embargo, estos coeficientes se pueden variar para ajustar los resultados del modelo con los resultados experimentales.

### 2.1.3 Sistemas Solares Térmicos

Los sistemas solares térmicos permiten captar la energía radiante que aporta el Sol y transformarla en energía térmica para un uso específico. Dentro de este marco los sistemas solares térmicos se clasifican por la capacidad de energía que pueden entregar, determinando los diversos usos que a éstos se les puede dar. [8]

- **Temperatura Baja:** Los sistemas solares térmicos de baja temperatura son aquellos que se utilizan para calentar un fluido a temperaturas menores de 100[°C]. Para esto se utilizan los colectores solares planos cuyos principales usos son la producción de agua caliente sanitaria (ACS), calefacción de recintos y calefacción de piscinas.
- **Temperatura Media:** Para este tipo de sistemas las temperaturas de trabajo varían desde los 100[°C] a los 300[°C]. Los principales equipos utilizados son los colectores con concentración que, por medio de la óptica, concentran la radiación solar en una línea o punto, obteniéndose así mayores temperaturas.
- **Temperatura Alta:** Los sistemas de temperatura alta consideran temperaturas de trabajo cercanas a los 4000[°C]. De hecho, teóricamente la temperatura máxima que es posible de alcanzar es la de la superficie solar (6000[°C]). Un ejemplo de este tipo de sistemas consiste en las centrales solares de concentración en torre. [9]

De los sistemas descritos con anterioridad se profundizará en el de temperatura baja por ser el tipo de sistema utilizado en proyectos domiciliarios como Domo<sup>2</sup>.

#### 2.1.3.1 Tipos de Colectores Solares

A continuación se presenta una clasificación de los tipos de colectores según su fabricación y uso: [10]

- Colectores planos con cubierta de vidrio: Este tipo de colectores son los más comunes en sistemas de ACS y alcanzan mayores temperaturas por el uso del efecto invernadero producido por la cubierta de vidrio. Este tipo de colectores son los utilizados en el proyecto domiciliario Domo<sup>2</sup>.
- Colectores planos sin cubierta de vidrio: Este tipo de colectores son usados principalmente para calentar agua de piscinas, donde la demanda de temperatura no es alta.
- Colector de tubos al vacío: Consiste en un arreglo de tubos que se encuentran al vacío. La superficie absorbente y los tubos colectores se encuentra en el interior de estos tubos de vidrio, eliminándose así pérdidas por convección. En general, estos dispositivos son más eficientes en comparación con los colectores vidriados y permiten mayor versatilidad en su instalación. Se utilizan mayormente en zonas de climas extremos.
- Colector de calentamiento de aire: Estos colectores utilizan aire como transporte de calor. Suelen usarse en flujo directo, es decir, el mismo aire calentado es el que se utiliza para calentar un recinto.

#### 2.1.3.2 Colector Solar Plano con Cubierta de Vidrio

Todo colector certificado posee una ficha técnica en la cual se incluye información obtenida de las pruebas a las que fue sometido. Con estos datos es posible conocer el comportamiento térmico de los colectores instalados gracias a su ecuación de rendimiento. A continuación se presenta un procedimiento de obtención de la ecuación general de rendimiento térmico de colectores solares a partir de un balance energético sobre éstos. [11]

Se tiene la ecuación general de rendimiento en cualquier sistema:

$$\eta = \frac{Q_{util}}{G} \quad 2.34$$

donde:  $Q_{util}$  es la potencia térmica entregada al fluido del circuito  
 $G$  es la radiación incidente sobre el colector

Realizando un balance energético en el colector se obtiene:

$$\alpha\tau G = Q_{perd} + Q_{util} \quad 2.35$$

donde:  $\alpha$  es el coeficiente de absorbancia  
 $\tau$  es el coeficiente de transmitancia  
 $Q_{perd}$  es potencia perdida por mecanismos de transferencia de calor  
 $\alpha\tau G$  es la potencia absorbida por el colector

Las pérdidas principales de un colector son por convección en la superficie del vidrio, radiación hacia el espacio y conducción por las paredes del colector hacia el exterior.

En base a este balance y despejando la potencia útil, la ecuación de rendimiento se puede escribir como:

$$\eta = F_R(\alpha\tau) - F_R U_L \frac{(T_e - T_a)}{G} \quad 2.36$$

donde:  $F_R$  es el factor de remoción de calor, cuyo valor es entre 0 y 1

$U_L$  es el coeficiente global de pérdida de calor  $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$

$T_e$  es la temperatura de entrada del agua al colector  $[^\circ C]$

$T_a$  es la temperatura ambiente  $[^\circ C]$

De un ensayo de certificación de colectores solares se obtienen los parámetros  $F_R(\alpha\tau)$  y  $F_R U_L$ , factor de eficiencia óptica y factor de pérdidas térmicas respectivamente. Estos factores representan el comportamiento de un colector frente a las condiciones de operación a las cuales está expuesto. En este sentido, el parámetro  $F_R(\alpha\tau)$  representa el máximo de la curva de rendimiento de un colector producto de la capacidad óptica para captar la energía solar y, a su vez, el parámetro  $F_R U_L$  representa la disminución del rendimiento producto de las pérdidas térmicas en función del aumento de la diferencia de temperatura del ensayo ( $T_e - T_a$ ). En la Figura 2.6 [12] se muestra un ejemplo de curva de rendimiento para un colector ensayado según los parámetros anteriormente mencionados.

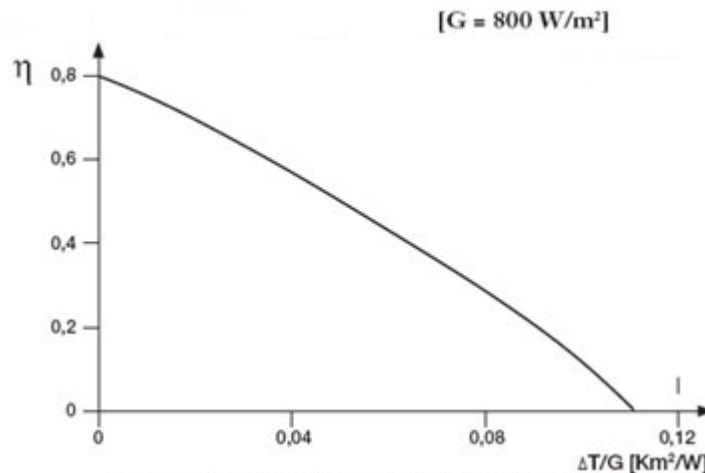


Figura 2.6: Curva de rendimiento para radiación incidente  $G = 800 [W/m^2]$

De un simple análisis de la curva se puede obtener que el parámetro  $F_R(\alpha\tau)$  es igual a 0,8 y, a modo de ejemplo, si se toma en consideración que el punto  $0,04[K m^2/W]$  del eje de las abscisas corresponde a un rendimiento de 0,55, se obtiene que el parámetro  $F_R U_L$  es igual a  $6,25[W/m^2 K]$ .

Es importante destacar que pueden existir diferencias entre los parámetros entregados por los ensayos de colectores, las cuales se explican principalmente por las distintas normas utilizadas en éstos. Algunas de estas diferencias corresponden a la utilización de distintos términos en la definición de diferencia de temperatura para el ensayo y a análisis de rendimiento más detallados que incluyen términos cuadráticos junto a un factor de pérdidas térmicas de segundo orden, lo que permite una definición más acertada de los colectores. Con respecto a esto último se obtienen, en conjunto con la Ecuación 2.36, las ecuaciones de rendimiento de Hottel: [1]

$$\eta = F_R(\alpha\tau) - F_R U_L \frac{(T_s - T_a)}{G} \quad 2.37$$

$$\eta = F_R(\alpha\tau) - F_R U_L \frac{(T_m - T_a)}{G} \quad 2.38$$

donde:  $T_s$  es la temperatura de salida del agua del colector

$T_m$  es la temperatura media del fluido en el colector  $((T_e + T_s)/2)$

En relación a lo anterior, es importante destacar que los parámetros  $F_R(\alpha\tau)$  y  $F_R U_L$  son dependientes de la ecuación de Hottel utilizada para describir un colector dado, es decir, los valores de dichos parámetros cambian al considerar distintas diferencias de temperaturas en los ensayos de rendimiento.

### 2.1.4 Intercambiadores de Calor

La teoría detrás de los intercambiadores de calor es bastante extensa, por lo que en esta sección se presentarán sus antecedentes generales, donde se provee de la información necesaria para comprender su funcionamiento y utilizar sus ecuaciones en el desarrollo del trabajo de título.

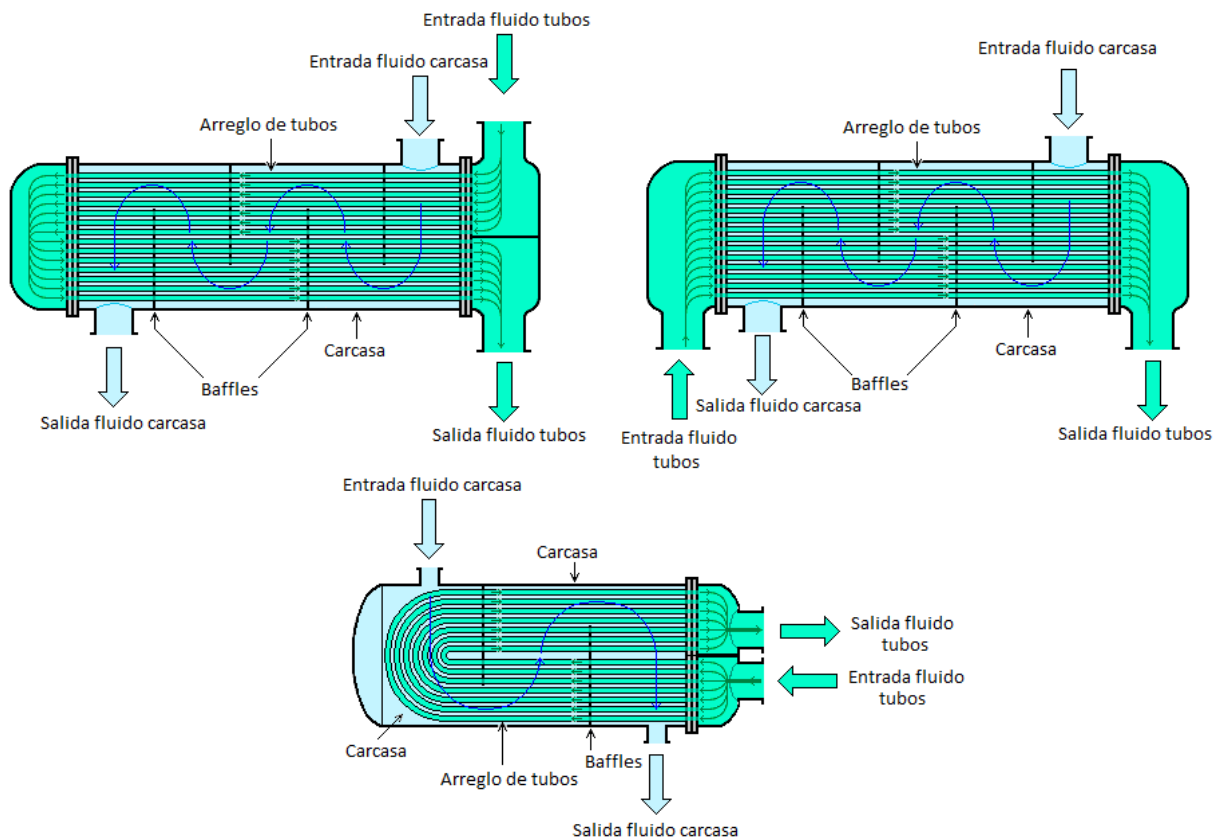
Un intercambiador de calor es un elemento diseñado para transferir el calor de un medio a otro, ya sea para enfriar o calentar el medio deseado. Así, los intercambiadores de calor se pueden clasificar en: [13]

- Intercambiador de contacto directo: Los medios se mezclan durante el intercambio térmico.
- Intercambiador de contacto indirecto: Los medios de intercambio no están en contacto, existiendo una superficie que los separa.

Los intercambiadores más utilizados son los de contacto indirecto, en los cuales una superficie separadora es el medio por el cual se produce el intercambio térmico. Este tipo de intercambiadores permite mayor flexibilidad al usar distintos medios que no se desea mezclar. Adicionalmente, esta configuración permite explorar distintas alternativas de intercambio según la geometría de los elementos usados y la disposición de los medios.

En base a lo anterior, se puede añadir que los intercambiadores de calor más utilizados corresponden principalmente a dos tipos de construcciones: [13]

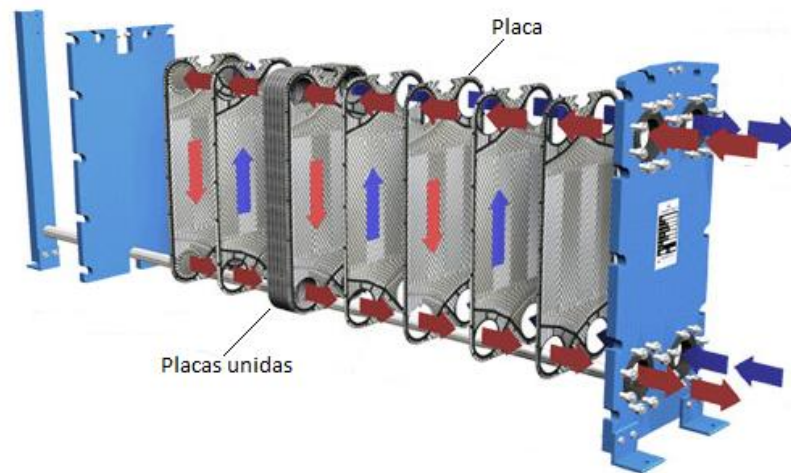
- Intercambiador de Carcasa y Tubos: Consiste básicamente en un conjunto de tubos que se encuentran distribuidos al interior de una carcasa. Se usa básicamente en configuraciones industriales que presentan alta exigencia de temperatura y presión. Típicamente el fluido de mayor presión se hace circular por los tubos mientras que el de menor por la carcasa. En la Figura 2.7 [14] se pueden apreciar esquemas de intercambiadores con este tipo de construcción, destacando las variantes de diseño que esta configuración permite.



**Figura 2.7: Intercambiador de carcasa y tubos**

- Intercambiador de Placas: Consiste básicamente en un conjunto de placas planas que separan los fluidos de intercambio alternándolos entre cada una de ellas. Esta configuración

permite una gran superficie de intercambio térmico utilizando un pequeño volumen, transfiriéndose más calor que en un sistema de carcasa y tubo del mismo tamaño. Este sistema no soporta altas temperatura ni presiones debido a la inhabilidad de sellar en forma perfecta la unión entre placas. Sin embargo, el uso de nuevas tecnologías de construcción ha permitido incrementar el uso de estos intercambiadores en aplicaciones industriales de mayor exigencia. En la Figura 2.8 [15] se puede apreciar un esquema en el cual se observa la configuración del fluido y la alta superficie de intercambio que otorgan estos intercambiadores.

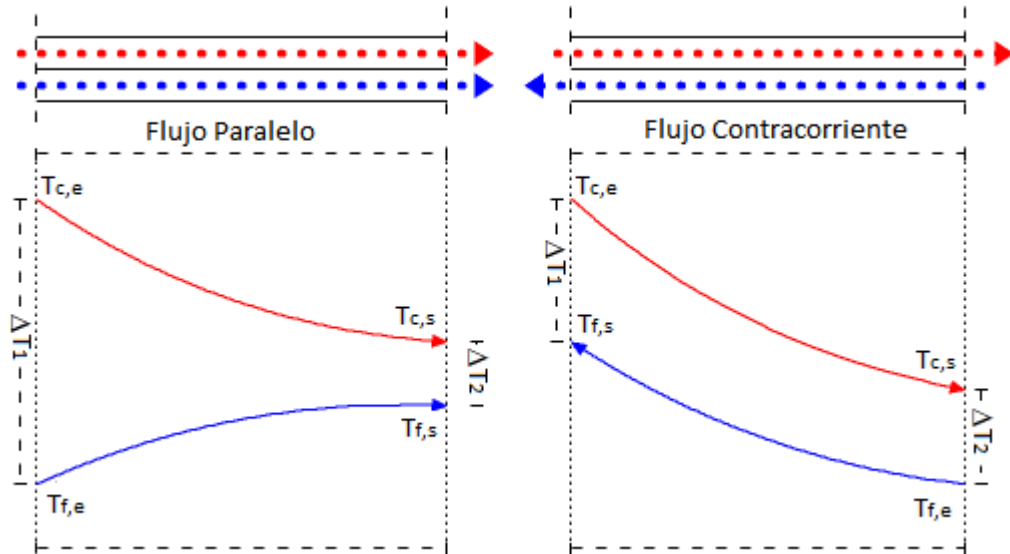


**Figura 2.8: Intercambiador de placas**

Como se puede observar en las Figuras 2.7 y 2.8 existen distintas configuraciones debido a la circulación de los fluidos, introduciéndose así la principal forma de clasificación de intercambiadores de calor:[13]

- Flujo paralelo: En este tipo de configuración el intercambio se produce entre flujos paralelos que circulan en el mismo sentido, es decir, cada flujo ingresa al intercambiador por el mismo extremo. En esta configuración los fluidos presentan gran diferencia térmica al comienzo y, a medida que se recorre el intercambiador, las temperaturas comienzan a tender al equilibrio. En la Figura 2.9 [16] puede apreciarse este efecto.
- Flujo contracorriente: En este tipo de configuración el intercambio se produce entre flujos paralelos que circulan en sentido contrario, es decir, cada flujo ingresa al intercambiador por diferentes extremos. Esta configuración permite mayor eficiencia que el caso anterior debido a que la temperatura de salida del fluido frío puede ser mayor que la temperatura de salida del fluido caliente. En la Figura 2.9 [16] puede apreciarse este efecto.





**Figura 2.9: Perfil de temperatura flujo paralelo y contracorriente**

En la Figura 2.9 se puede observar que, en el caso de flujo paralelo, ambos fluidos tienden a una temperatura de equilibrio en cambio, en el caso de flujo contracorriente, los perfiles de temperatura tienden a ser iguales. Esta distribución de temperatura permite que en el caso de flujo contracorriente se obtenga un mayor incremento de la temperatura de salida del fluido frío.

Conociendo las distintas configuraciones que presentan los intercambiadores de calor se pueden introducir las principales ecuaciones que caracterizan y gobiernan el funcionamiento de estos equipos

#### 2.1.4.1 Intercambio de calor entre dos fluidos

Los intercambiadores de calor utilizan como ecuación general la Ecuación 2.13. Sin embargo, como la diferencia de temperatura entre los fluidos de intercambio no se mantiene uniforme a lo largo del intercambiador, se utiliza otro tipo de diferencia de temperatura más representativa de estos sistemas. En relación a lo anterior, la diferencia de temperatura utilizada es la media logarítmica, la cual se define como: [17]

$$lmtd = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad 2.39$$

$$\Delta T_1 = \begin{cases} T_{c,e} - T_{f,s}, & \text{contracorriente} \\ T_{c,e} - T_{f,e}, & \text{paralelo} \end{cases} \quad 2.40$$

$$\Delta T_2 = \begin{cases} T_{c,s} - T_{f,e}, & \text{contracorriente} \\ T_{c,s} - T_{f,s}, & \text{paralelo} \end{cases} \quad 2.41$$

donde:  $lmtd$  es la diferencia de temperatura media logarítmica [°C]  
 $T_{c,e}$  es la temperatura del fluido caliente a la entrada [°C]  
 $T_{c,s}$  es la temperatura del fluido caliente a la salida [°C]  
 $T_{f,e}$  es la temperatura del fluido frío a la entrada [°C]  
 $T_{f,s}$  es la temperatura del fluido frío a la salida [°C]

Así, se tiene que la Ecuación 2.13 queda como:

$$Q_{hx} = UA_{hx}(lmtd) \quad 2.42$$

donde:  $Q_{hx}$  es la potencia entregada por el intercambiador de calor interno [W]  
 $UA_{hx}$  es el coeficiente global de intercambio térmico [W/K]  
 $lmtd$  es la diferencia de temperatura media logarítmica [°C]

Por otro lado, la mayoría de los intercambios entre fluidos ocurren en paredes cilíndricas por lo que al conocer la geometría de dicha pared, y usando el concepto de resistencias térmicas, se puede escribir la Ecuación 2.42 como sigue:

$$Q_{hx} = \frac{2\pi L(lmtd)}{\frac{1}{h_i r_i} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{k} + \frac{1}{h_e r_e}} \quad 2.43$$

donde:  $Q_{hx}$  es la potencia entregada por el intercambiador de calor interno [W]  
 $lmtd$  es la diferencia de temperatura media logarítmica [°C]  
 $L$  es la longitud de la superficie de intercambio térmico [m]  
 $h_i$  es el coeficiente convectivo al interior del cilindro [W/m<sup>2</sup>K]  
 $h_e$  es el coeficiente convectivo al exterior del cilindro [W/m<sup>2</sup>K]  
 $r_i$  es el radio interior del cilindro [m]  
 $r_e$  es el radio exterior del cilindro [m]

Luego, otra forma de expresar el flujo de calor en el intercambiador corresponde a la utilización de las propiedades del fluido según la Ecuación 2.4. Así, se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_{hx} = \dot{m}_c C_{p_c} (T_{c,e} - T_{c,s}) = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad 2.44$$

donde:  $Q_{hx}$  es la potencia entregada por el intercambiador de calor interno [W]  
 $\dot{m}_c$  es el flujo másico del fluido caliente  $\left[\frac{kg}{s}\right]$   
 $C_{p_c}$  es la capacidad calórica específica del fluido caliente  $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$   
 $\dot{m}_f$  es el flujo másico del fluido frío  $\left[\frac{kg}{s}\right]$

$C_{p_f}$  es la capacidad calórica específica del fluido frío  $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

Para facilitar la notación entre propiedades del fluido caliente y del fluido frío se introducen ecuaciones que representan el producto entre el flujo másico y la capacidad calórica del fluido:

$$C_c = \dot{m}_c C_{p_c} \quad 2.45$$

$$C_f = \dot{m}_f C_{p_f} \quad 2.46$$

De esta manera, otra nomenclatura a utilizar para el producto entre el flujo másico y la capacidad calórica del fluido corresponde a  $C_{min}$  para el producto menor y  $C_{max}$  para el mayor, pudiendo ambos corresponder al fluido cálido o al frío. Así surge la definición de razón de capacidad ( $C_r$ ) que es representativa de las condiciones de operación del intercambiador y cambia según su geometría y configuración de flujo. Esta razón se define como:

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad 2.47$$

Utilizando esta nomenclatura se tiene que la Ecuación 2.44 se expresa de la siguiente forma:

$$Q_{hx} = C_c(T_{c,e} - T_{c,s}) = C_f(T_{f,s} - T_{f,e}) \quad 2.48$$

donde:  $C_c$  es el producto entre flujo másico y capacidad calórica del fluido caliente  $\left[\frac{W}{K}\right]$

$C_f$  es el producto entre flujo másico y capacidad calórica del fluido frío  $\left[\frac{W}{K}\right]$

Con esta ecuación se puede calcular el calor cedido por el fluido caliente o el calor recibido por el fluido frío según convenga. Además, se puede definir el calor máximo posible de transferir que, en este caso, corresponde al rango máximo de temperatura del intercambiador ( $T_{c,e} - T_{f,e}$ ), donde  $T_{c,e}$  es la temperatura más caliente de los fluidos y  $T_{f,e}$  la temperatura más fría. Por lo tanto, si se posee de suficiente área de intercambio, el fluido que corresponda a  $C_{min}$  se podrá llevar desde su temperatura de entrada a la temperatura de entrada del otro fluido. Considerando lo anterior, la ecuación del calor máximo posible de entregar es:

$$Q_{max} = C_{min}(T_{c,e} - T_{f,e}) \quad 2.49$$

donde:  $Q_{max}$  es la potencia máxima entregada por el intercambiador de calor  $[W]$

$C_{min}$  es el producto menor entre flujo másico y capacidad calórica  $\left[\frac{W}{K}\right]$

Con las Ecuaciones 2.48 y 2.49 se puede presentar la eficiencia del intercambio como la razón entre la potencia real cedida y la potencia máxima teórica.

$$\varepsilon_f = \frac{Q_{real}}{Q_{max}} = \frac{C_c(T_{c,e} - T_{c,s})}{C_{min}(T_{c,e} - T_{f,e})} = \frac{C_f(T_{f,s} - T_{f,e})}{C_{min}(T_{c,e} - T_{f,e})} \quad 2.50$$

donde:  $\varepsilon_f$  es la eficiencia del intercambio térmico

$Q_{real}$  es la potencia real entregada [W]

$C_c$  es el producto entre flujo másico y capacidad calórica del fluido caliente  $\left[\frac{W}{K}\right]$

$C_f$  es el producto entre flujo másico y capacidad calórica del fluido frío  $\left[\frac{W}{K}\right]$

Otra forma de identificar el comportamiento de un intercambiador de calor corresponde a la utilización del número de unidades de transferencia (NUT). Este valor es un indicador de la superficie de transferencia o tamaño del intercambiador, por lo que a un mayor valor de  $NUT$  más cerca se está del límite termodinámico del intercambiador. Este indicador se define como:

$$NUT = \frac{UA_{hx}}{C_{min}} \quad 2.51$$

Así, la ecuación de eficiencia se puede diferenciar considerando las características de intercambio en flujos paralelos y contracorriente, obteniéndose las siguientes expresiones.

$$\text{Paralelo: } \varepsilon_f = \frac{1 - \exp(-NUT(1 + C_r))}{1 + C_r} \quad 2.52$$

$$\text{Contracorriente: } \varepsilon_f = \frac{1 - \exp(-NUT(1 - C_r))}{1 - C_r \exp(-NUT(1 - C_r))} \quad 2.53$$

Por último, en la Figura 2.10 [13] se pueden apreciar las curvas de eficiencia de intercambio térmico en función de NUT y de  $C_r$  en un caso de flujo paralelo y otro de flujo contracorriente.

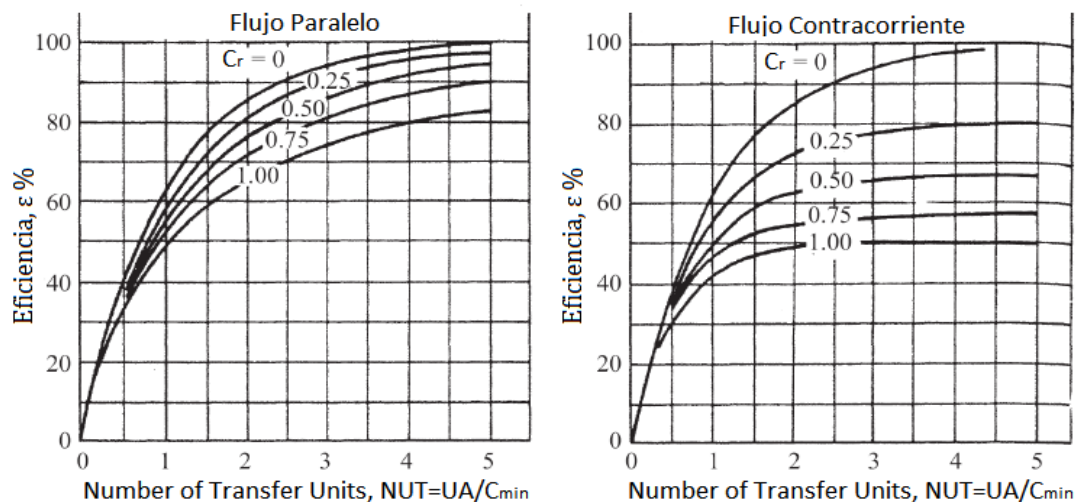


Figura 2.10: Curvas de eficiencia intercambio térmico

### 2.1.5 Software

Para el desarrollo del Trabajo de Título se utiliza el software HOBOWare desarrollado por la empresa Onset y el software TRNSYS desarrollado por la Universidad de Wisconsin-Madison y la Universidad del Colorado.

A continuación, se presenta una breve descripción de dichos programas, donde se señala la utilidad que éstos tienen para el desarrollo del trabajo de título.

#### 2.1.5.1 HOBOWare

Este programa permite obtener los datos provenientes de mediciones realizadas mediante equipos de la empresa Onset. Se encuentra representado por una interfaz sencilla que posee, entre otras características:

- Capacidad de procesamiento de información. Permite depurar y realizar operaciones sencillas en base a los datos registrados.
- Capacidad de análisis de información. Permite observar gráficos de los datos obtenidos, aplicar diferentes filtros sobre éstos y realizar distintas operaciones que facilitan el análisis de los datos registrados.
- Capacidad de exportar información. Permite exportar los datos en distintos formatos para, posteriormente, utilizar otras herramientas de análisis o, también, para crear los datos de entrada del modelo.

Los equipos de medición instalados para registrar los datos de clima, que corresponden a temperatura ambiente y radiación, requieren de este software para entregar dichos datos al usuario. En este contexto, la acción del software permite extraer los datos provenientes de la memoria del equipo registrador (datalogger), realizar un análisis preliminar de los datos y exportar en un formato compatible los datos de clima, con el objetivo de crear los archivos de entrada del modelo computacional desarrollado en TRNSYS. En la Figura 2.11 se muestra un ejemplo de la representación gráfica que ofrece el programa para el análisis de datos.

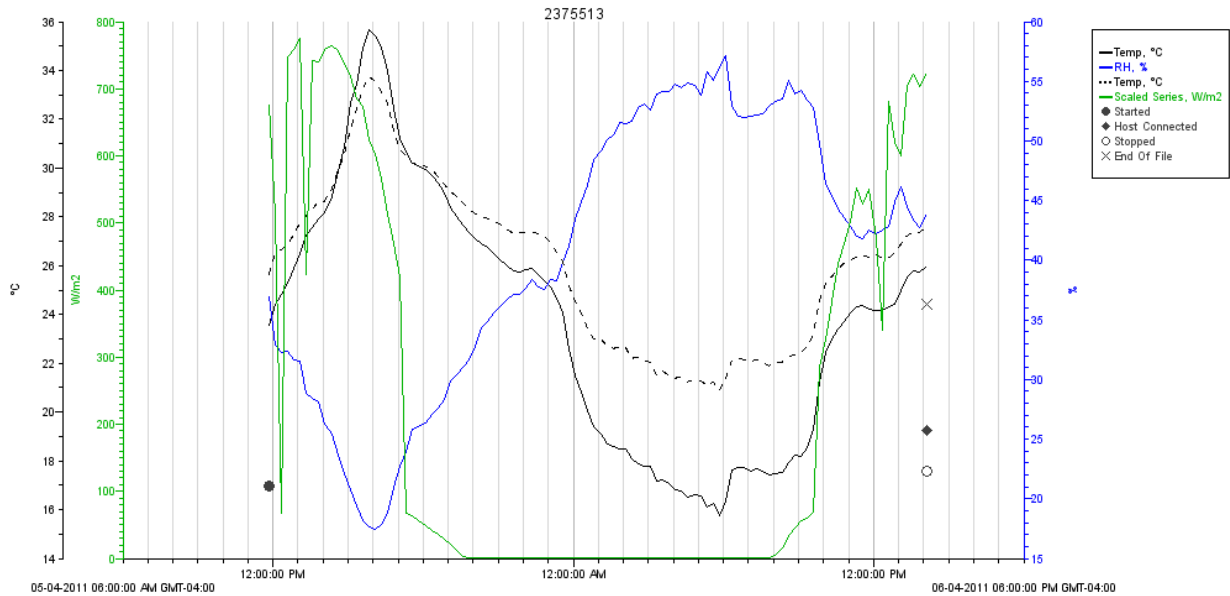


Figura 2.11: Interfaz gráfica HOBOWare

### 2.1.5.2 TRNSYS

Para la realización de las simulaciones sobre el modelo de SST se utiliza el software TRNSYS. Este software es una plataforma de simulación de sistemas transientes, lo que permite representar el comportamiento de distintos modelos con respecto al tiempo. Esto hace del programa una herramienta muy útil para el análisis de sistemas solares, ya que considera la variación temporal de la temperatura y energía incidente, simulando el comportamiento del sistema en base a dichas variables. En relación a lo anterior, es importante destacar que el software realiza una simulación discreta del tiempo en base a un intervalo de tiempo definido. [18]

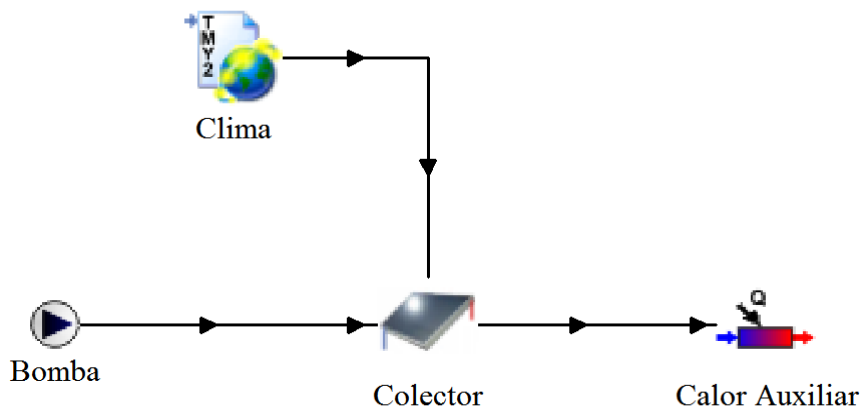
El software TRNSYS ofrece una base de datos con diversos componentes de sistemas térmicos, eléctricos y mecánicos, entre otros, gracias a los cuales se pueden representar la mayoría de los componentes de un sistema real. Cada componente posee distintas relaciones matemáticas que, en su conjunto, definen el comportamiento del componente al momento de realizar la simulación. De esta forma, el comportamiento de todas las ecuaciones del modelo definirá los resultados de la simulación. Las principales relaciones que se tienen por cada componente son:

- **Parámetros:** Corresponden a los datos inherentes a las características de cada componente. Representan principalmente restricciones en el funcionamiento del elemento en cuestión y/o propiedades derivadas del diseño del componente.
- **Inputs:** Corresponden a los datos de entrada del componente. Es toda la información requerida por el componente para resolver las ecuaciones que definen su comportamiento. Esta información es entregada por los componentes anteriores en la dirección del flujo.

- **Outputs:** Corresponden a los datos de salida del componente. Es toda la información que se obtiene como resultado de ejecutar las ecuaciones que definen el componente. Esta información se envía como input al siguiente elemento del modelo.

Es importante destacar que, si bien el programa cuenta con una librería de componentes bastante completa, sus definiciones son más bien básicas y pueden alejarse del nivel de detalle que se desea para simular un sistema específico. En este contexto, los componentes en TRNSYS se encuentran programados en lenguaje FORTRAN, existiendo la posibilidad de modificar el código que define sus relaciones matemáticas. Esta herramienta le otorga al programa una gran capacidad de simulación ya que permite modificar componentes existentes y crear componentes nuevos que se ajusten de mejor forma a los requerimientos del sistema a modelar.

La Figura 2.12 muestra un ejemplo de interacción entre componentes utilizando la interfaz del programa. En este esquema se puede apreciar una parte de un sistema solar en el cual destacan como componentes: una bomba, un colector solar y una fuente de calor auxiliar. A los que se suma un componente de clima. En este caso, el componente a analizar corresponde al colector solar, cuyas relaciones más importantes son:



**Figura 2.12: Interfaz TRNSYS**

- **Parámetros**
  - Número de colectores
  - Área del colector
  - Calor específico del fluido caloportador
  - Información correspondiente a ensayos
    - Factor de pérdidas ópticas
    - Factor de pérdidas térmicas de primer orden
    - Factor de pérdidas térmicas de segundo orden (si corresponde)
    - Flujo másico de ensayo

- Azimut
- Ángulo de superficie colectora con respecto a horizontal
- Inputs:
  - Temperatura del fluido
  - Flujo másico
  - Componentes de clima
    - Radiación incidente sobre horizontal
    - Radiación difusa sobre horizontal
    - Temperatura ambiente
- Outputs:
  - Temperatura del fluido
  - Flujo másico
  - Energía aportada al fluido



## 2.2 Antecedentes del Proyecto

En esta sección se presentan las principales características de Domo<sup>2</sup> que son relevantes para la realización del Trabajo de Título. [19]

### 2.2.1 Ubicación y Descripción General

La vivienda Domo<sup>2</sup> se ubica en la dirección Camino del Maillín 3244, comuna de Lo Barnechea. Sus coordenadas geográficas son: 33°20'26" Latitud Sur y 70°30'25" Longitud Oeste. En la Figura 2.13 [19] se aprecia una representación gráfica de la vivienda donde se pueden observar las características de su estructura.



**Figura 2.13: Representación gráfica de la vivienda**

En términos generales la vivienda cuenta con una superficie de 515,86 [m<sup>2</sup>] construidos emplazados en tres niveles de edificación que comprenden subterráneo, 1° piso y 2° piso. En su arquitectura se utilizó un concepto de diseño conocido como arquitectura bioclimática, que consiste principalmente en utilizar los recursos disponibles como luz natural y radiación solar. Además, se explotó el uso de aislación perimetral y de termopaneles para reducir pérdidas o ganancias por

conducción a través de la envolvente térmica. En resumen se posee un conjunto de sistemas que benefician la eficiencia energética de la vivienda.

## 2.2.2 Arquitectura Bioclimática

Entre los principales aspectos de la arquitectura bioclimática que se incorporan en la vivienda destacan los siguientes.

### 2.2.2.1 Orientación

La orientación de la casa considera la utilización del sol como principal fuente de energía calórica y luz, por lo que el uso de ventanales juega un rol importante en la vivienda. Ejemplo de lo anterior es que las fachadas correspondientes a los recintos de mayor uso como dormitorios, estar o escritorio, se orientaron hacia el norte y el oriente, considerando el uso de grandes ventanales. En cambio, hacia el sur sólo se consideraron dependencias como baños y cocina, resaltando el uso de ventanas pequeñas. Gracias a esta configuración se aprovechan las condiciones favorables del medio, sobre todo en período de invierno, lo que permite reducir la necesidad de calefacción para alcanzar la temperatura de confort de 20[°C]. En la Figura 2.14 se pueden apreciar las diferencias exteriores en la construcción según la orientación de la vivienda.



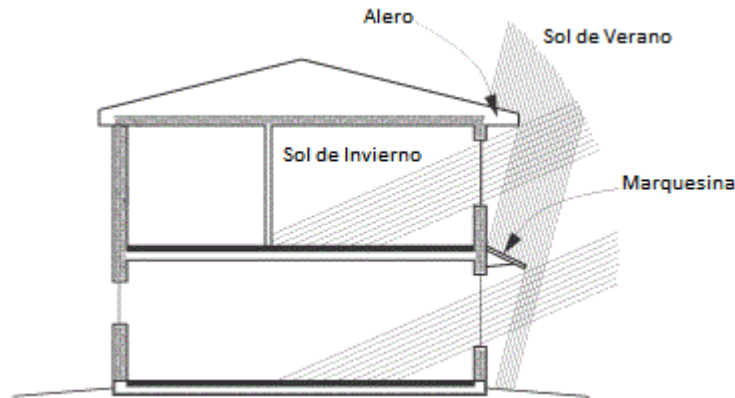
**Figura 2.14: Orientación de la vivienda.**

A la izquierda se observa la fachada norte y a la derecha la fachada sur

### 2.2.2.2 Construcción

Los aspectos constructivos de la fachada de la vivienda juegan un rol muy importante en el manejo de las ganancias térmicas. Si se toma en cuenta la distribución de ventanales discutida en el punto anterior, existirá un gran ingreso de energía en verano, lo que elevará la temperatura interna de la vivienda y, por lo tanto, se aumentará la necesidad de enfriar su interior. Para controlar esta ganancia térmica se utilizan elementos constructivos que impiden el ingreso de radiación en

períodos en los que ésta es desfavorable para el confort. En este sentido, un elemento bien diseñado permite reducir las ganancias en verano y aumentar las ganancias en invierno gracias a la variación del sombreado producto del cambio en el ángulo de declinación del sol durante el año. En la Figura 2.15 [20] se puede observar la forma en la que actúa el diseño de aleros y marquesinas, elementos utilizados para el control de iluminación y ganancias térmicas.



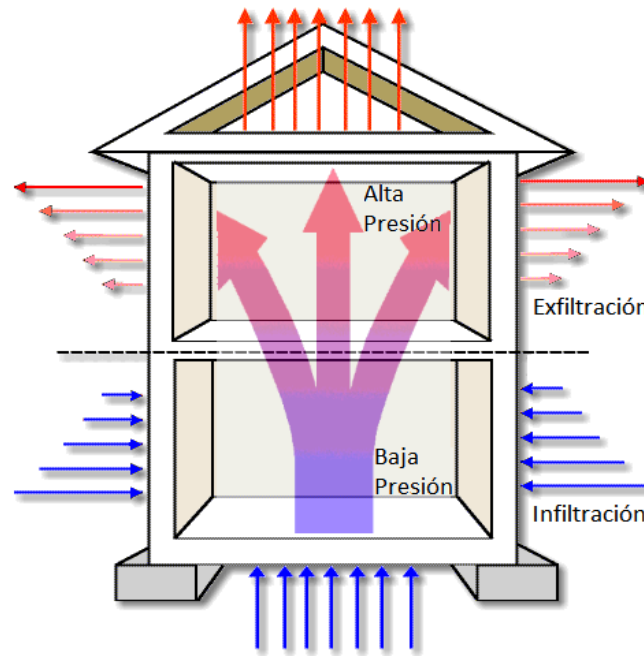
**Figura 2.15: Uso de aleros y marquesinas**

### 2.2.2.3 Efecto Chimenea

Otro concepto aprovechado por la arquitectura bioclimática es el efecto chimenea, que consiste principalmente en el ascenso de las masas de aire caliente dentro de la vivienda debido a su baja densidad con respecto a las masas de aire frío. Al combinar este efecto con el concepto de infiltraciones y exfiltraciones pueden producirse dos situaciones dependiendo del período del año.

- Condición de Invierno: El efecto chimenea favorece la pérdida de energía en la vivienda al ascender aire caliente a zonas de alta presión, como se muestra en la Figura 2.16 [21]. En este contexto el efecto se produce si el movimiento de masa de aire por diferencia de densidad es suficiente para vencer el movimiento por diferencia de presión.
- Condición de Verano: El efecto chimenea favorece la ventilación natural de la vivienda gracias a un núcleo central que comunica sus pisos con ventanas basculantes ubicadas en el techo, éstas son accionadas por medio del sistema domótico si se requiere ventilar la vivienda.

De esta forma, el uso del efecto chimenea puede resultar perjudicial al requerir mayor calefacción en situación de invierno, sin embargo, al utilizar una buena aislación perimetral de la vivienda y un diseño arquitectónico adecuado, se logra impedir en gran medida la pérdida de energía por conceptos de infiltración y exfiltración, lo que significa aprovechar el efecto chimenea para el beneficio del confort térmico dentro de la vivienda.



**Figura 2.16: Efecto chimenea e infiltraciones**

#### 2.2.2.4 Ventilación Cruzada

La ventilación cruzada es un recurso utilizado por la arquitectura bioclimática para producir una ventilación eficiente en todas las dependencias de la vivienda, para lo cual se usa la diferencia de presión entre dos zonas de ésta, ya sea por diferencias de temperatura y/o la acción del viento. De esta forma, el núcleo central de la vivienda y su orientación permiten una buena comunicación entre sus diferentes dependencias y el provecho de la acción del viento, favoreciendo el uso de la ventilación cruzada. Gracias a este efecto se logra una buena ventilación de la vivienda y reducir la carga de aire acondicionado en condiciones de verano.

#### 2.2.2.5 Vegetación Vertical de Hoja Caduca

Un último concepto de la arquitectura bioclimática utilizado en la vivienda consiste en el uso de vegetación vertical con hoja caduca para el control de las ganancias térmicas en situación de invierno y verano. La vegetación de hoja caduca se caracteriza por presentar follaje en los meses de verano y perderlo durante los meses de invierno, resultando una buena herramienta para bloquear el ingreso de radiación solar en verano y, una vez caídas las hojas, permitir el ingreso de radiación en invierno.

### 2.2.3 **Envolvente Térmica**

Un aspecto importante a resaltar en el diseño y construcción del proyecto es el mejoramiento de la envolvente térmica. En términos generales el diseño de la envolvente térmica considera la

utilización de sistemas de aislación sencillos como el poliestireno expandido y sistemas más complejos como el sistema EIFS, celulosa proyectada y DVH con gas Argón. El conjunto de elementos usados se traduce en una buena aislación y por lo tanto en la reducción de las pérdidas y ganancias térmicas con respecto al exterior.

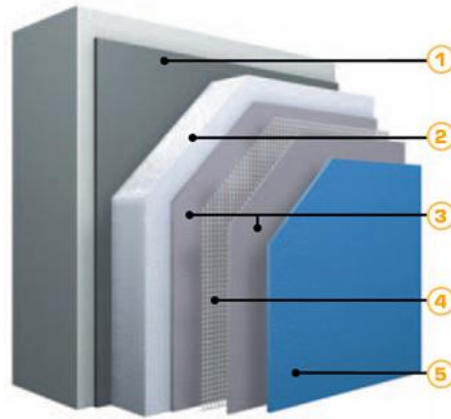
A continuación se presentan con mayor profundidad los principales componentes que constituyen la envolvente térmica de la vivienda, detallando sus elementos y comportamiento térmico.

### 2.2.3.1 Muros

El diseño de la vivienda considera la utilización de distintos tipos de muros según su ubicación. Estos muros se diferencian básicamente por los materiales que los constituyen y su disposición en la vivienda, donde se encuentran:

1. Muro con aislación EIFS: Este muro representa cerca del 67% de la superficie correspondiente a los muros de la vivienda, abarcando alrededor de 315,24 [m<sup>2</sup>]. Sus elementos principales son:
  - a) Terminación interior: Enlucido de yeso espesor 3[mm]
  - b) Estuco espesor 25[mm]
  - c) Muro estructural: Hormigón armado de 200[mm] de espesor
  - d) Estuco espesor 25[mm]
  - e) Aislación: Sistema EIFS que consiste básicamente en la aplicación de aislación por la cara externa del muro con un espesor de 100[mm]. En el caso del proyecto este sistema está compuesto por: una capa interna de EPS que provee la aislación, una capa intermedia de malla de fibra de vidrio para proveer de resistencia y, por último, una capa externa de terminación de 3[mm] de espesor para proveer el aspecto exterior de la vivienda. La principales ventajas de este sistema son: [22]
    - Aislación por exterior: Al existir aislación por el exterior del muro se mantiene la masa térmica dentro del espacio climatizado, permitiendo un mayor control sobre ésta. Además se disminuye el riesgo de condensación en muros al no presentar estos una baja temperatura.
    - Eliminación de puentes térmicos: Los puentes térmicos son zonas de la vivienda que favorecen la conducción de calor. Con el sistema EIFS éstos pueden ser cubiertos fácilmente desde el exterior.

En la Figura 2.17 [23] se presenta un esquema de este tipo de aislación en la cual se pueden apreciar sus componentes.



**Figura 2.17: Sistema EIFS.**

donde: 1) Adhesivo. 2) Aislación. 3) Recubrimiento del refuerzo. 4) Refuerzo. 5) Recubrimiento final

Considerando las resistividades térmicas de los elementos constituyentes del muro se obtiene una transmitancia térmica equivalente a  $0,34[W/m^2\text{°C}]$

2. Muros con aislación EIFS y terminación en piedra: Este muro consiste básicamente en el mismo muro anterior pero con un terminación en piedra como acabado superficial, por lo que luego del sistema EIFS se agrega una capa de mortero y piedras naturales, ambas de  $5[mm]$  de espesor. La superficie de este muro abarca  $87,35[m^2]$  y su transmitancia térmica corresponde a  $0,33[W/m^2\text{°C}]$
3. Muro subterráneo: El primer nivel de edificación de la vivienda es un subterráneo que, en parte, se encuentra bajo el nivel del suelo, por lo que una fracción del muro de esta planta se encuentra en contacto con el terreno. Específicamente, corresponde a una superficie de  $6,38[m^2]$ . Si bien los elementos del muro son los mismos que en el primer caso, exceptuando la terminación exterior, el comportamiento térmico en esta situación es diferente y la transmitancia térmica se reduce a  $0,24[W/m^2\text{°C}]$

### 2.2.3.2 Techumbre

El diseño de la vivienda considera el uso de dos tipos de techos, uno curvo de  $50,69[m^2]$  y otro horizontal de  $90,4[m^2]$ . A continuación se presentan los materiales y diferencias de los techos de la vivienda.

1. Techo horizontal: Este techo posee una cámara de aire débilmente ventilada. Sus capas de materiales, desde el interior al exterior, son:
  - a) Yeso cartón espesor  $10[mm]$
  - b) Barrera de vapor espesor  $0,02[mm]$



- c) Celulosa proyectada espesor 300[mm]
  - d) Filtro
  - e) Panel estructural OSB
  - f) Plancha de zinc-alum
2. Techo Curvo: Las principales diferencias entre este techo y el horizontal corresponden a que éste no posee cámara de aire, su configuración geométrica es curva y, por esto último, la primera capa de yeso cartón se reemplaza por un tinglado de madera de 20[mm] de espesor.

Debido a la pequeña diferencia en sus capas materiales, cámara de aire y principalmente por su geometría, existe diferencia en su comportamiento térmico. De esta manera, se tiene una transmitancia de 0,132[W/m<sup>2</sup>°C] para el cielo curvo y 0,129[W/m<sup>2</sup>°C] para el horizontal.

### 2.2.3.3 Pisos

La vivienda cuenta con un diseño que le otorga dos tipos de pisos: un piso apoyado sobre el nivel del terreno que abarca 68,61[m<sup>2</sup>] y un piso en profundidad que abarca 70,18[m<sup>2</sup>]. Ambos pisos están compuestos por los mismos elementos, siendo su única diferencia la profundidad a la cual están construidos con respecto al nivel del terreno. De esta forma, el primer tipo de piso posee una transmitancia térmica de 0,43[W/m<sup>2</sup>°C] y el segundo de 0,16[W/m<sup>2</sup>°C]. Los elementos que constituyen ambos pisos son:

1. Terminación interior (madera o cerámica) espesor 16[mm]
2. Sobrelosa espesor 54[mm]
3. Tuberías serpentín de calefacción losa radiante
4. Malla Acma para sostener tuberías
5. EPS espesor 20[mm] y densidad 30[kg/m<sup>3</sup>]
6. EPS espesor 110[mm] y densidad 20[kg/m<sup>3</sup>]
7. Radier espesor 100[mm]
8. Fólico de polietileno
9. Piedra espesor 200[mm]

Es importante resaltar que se usan dos capas de EPS de distinta densidad ya que las tuberías del sistema de calefacción deben colocarse sobre una superficie compacta, por lo cual se usa una capa de ESP delgada pero más densa.

### 2.2.3.4 Ventanas y Puertas

La vivienda cuenta con 52 ventanas y 6 puertas exteriores de las cuales 4 son vidriadas. En la Tabla 2.2 se presenta un resumen con las superficies vidriadas que posee la vivienda.

Tabla 2.1: Superficies Vidriadas

| Orientación                     | Superficie vidriada ventanas [ $m^2$ ] | Superficie vidriada puertas [ $m^2$ ] |
|---------------------------------|--|---------------------------------------|
| Norte                           | 33,81                                  | 3,19                                  |
| Sur                             | 10,97                                  | 0                                     |
| Oriente                         | 13,86                                  | 0                                     |
| Poniente                        | 15,12                                  | 6,16                                  |
| <b>Total [<math>m^2</math>]</b> | <b>83,11</b>                           |                                       |

Es importante mencionar que las superficies vidriadas son todas iguales y corresponden a termopaneles DVH con vidrios de 4[mm] de espesor, un gap de gas argón de 10[mm] y marcos de madera que representan el 15% del termopanel, lo que otorga una transmitancia térmica de 2,8[ $W/m^2\text{°C}$ ] según la información entregada por la constructora de la vivienda.

En relación a las puertas de la vivienda se tienen dos tipos, la puerta de acceso principal posee una superficie de 2,32[ $m^2$ ] y una transmitancia de 1,71[ $W/m^2\text{°C}$ ] y el resto de las puertas que, sin considerar las superficies vidriadas, abarcan 5,75[ $m^2$ ] con una transmitancia de 2,08[ $W/m^2\text{°C}$ ].

### 2.2.3.5 Resumen y Comportamiento general de la Vivienda

En esta sección se presenta la Tabla 2.3, en la cual se resumen las superficies y transmitancias de cada elemento discutido anteriormente:

Tabla 2.2: Resumen características térmicas elementos de la vivienda

| Conjunto        | Elemento            | Superficie $A[m^2]$ | Transmitancia Térmica $U[W/m^2\text{°C}]$ | $UA[W/\text{°C}]$ | Total $UA[W/\text{°C}]$ |
|-----------------|---------------------|---------------------|---|-------------------|-------------------------|
| <b>Muros</b>    | EIFS                | 315,24              | 0,34                                      | 107,18            | <b>152,18</b>           |
|                 | EIFS y piedra       | 87,35               | 0,33                                      | 28,83             |                         |
|                 | Subterráneo         | 67,38               | 0,24                                      | 16,17             |                         |
| <b>Techos</b>   | Horizontal          | 96,4                | 0,129                                     | 12,44             | <b>19,13</b>            |
|                 | Curvo               | 50,69               | 0,132                                     | 6,69              |                         |
| <b>Pisos</b>    | Normal              | 68,61               | 0,43                                      | 29,5              | <b>42,01</b>            |
|                 | Subterráneo         | 70,18               | 0,16                                      | 12,51             |                         |
| <b>Puertas</b>  | Acceso              | 2,32                | 1,71                                      | 3,97              | <b>15,93</b>            |
|                 | Secundarias         | 5,75                | 2,08                                      | 11,96             |                         |
| <b>Ventanas</b> | Superficie Vidriada | 83,11               | 2,8                                       | 232,71            | <b>232,71</b>           |
|                 |                     |                     |   | <b>Total</b>      | <b>461,96</b>           |

Para caracterizar el comportamiento térmico de la vivienda es necesario calcular el coeficiente volumétrico de transferencia de calor por transmitancia (considera efectos de conducción).



$$G_{cond.} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i A_i}{V} \quad 2.54$$

donde:  $G_{cond.}$  es el coeficiente volumétrico  $\left[\frac{W}{m^3 \cdot ^\circ C}\right]$   
 $U_i$  es la transmitancia térmica del elemento  $i$   $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$   
 $A_i$  es la superficie del elemento  $i$   $[m^2]$   
 $V$  es el volumen interno de la vivienda  $[m^3]$

Considerando que el volumen interno de la vivienda es  $938,6[m^3]$  se tiene un coeficiente volumétrico igual a:

$$G_{cond.} = 0,492 \left[\frac{W}{m^3 \cdot ^\circ C}\right]$$

Para calcular el coeficiente volumétrico de transferencia de calor por convección es necesario utilizar el número de renovaciones por hora del aire en la vivienda debido a discontinuidades de la envolvente que, en este caso, es  $n = 1,02$ . Con esta información y con la Ecuación 2.55 se calcula el coeficiente de pérdidas térmicas por infiltraciones (considera efectos de convección).

$$G_{convec.} = 0,35 * n \quad 2.55$$

Luego, el coeficiente volumétrico de transferencia de calor es:

$$G_{convec.} = 0,357 \left[\frac{W}{m^3 \cdot ^\circ C}\right]$$

Además, se puede calcular el coeficiente volumétrico global de transferencia de calor como la suma de las Ecuaciones 2.54 y 2.55.

$$G_T = G_{cond.} + G_{convec.} \quad 2.56$$

Así, el coeficiente volumétrico global que identifica el comportamiento térmico de la vivienda queda:

$$G_T = 0,85 \left[\frac{W}{m^3 \cdot ^\circ C}\right]$$

Por último, se puede expresar la transferencia de calor utilizando el resultado anterior y el volumen interno de la vivienda.

$$Q_T = G_T \cdot V = 797,81 \left[\frac{W}{^\circ C}\right] \quad 2.57$$

Con la Ecuación 2.57 solo bastaría usar la diferencia de temperatura o grados-día para estimar, por ejemplo, las pérdidas en período de calefacción.

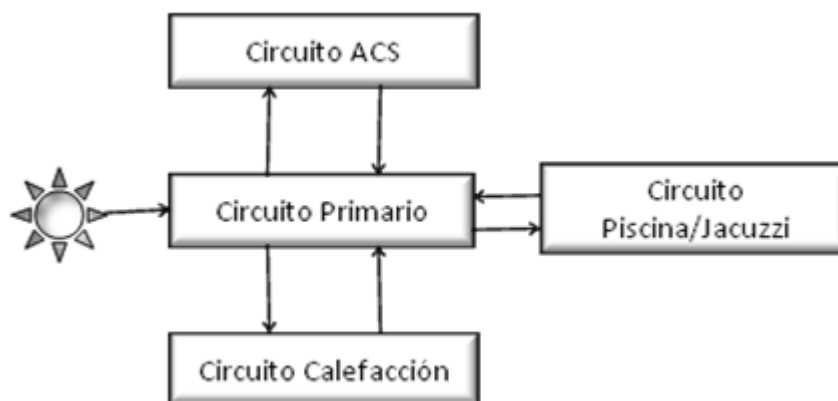
## 2.2.4 Sistemas Presentes

En esta sección se presenta una descripción de los Sistemas que operan en la vivienda Domo<sup>2</sup>. El objetivo de esta descripción es plantear el funcionamiento de los sistemas haciendo hincapié en la interacción que se produce entre éstos durante la operación de la vivienda.

### 2.2.4.1 Sistema Solar Térmico (SST)

El proyecto cuenta con un SST compuesto por tres circuitos independientes que se encuentran enlazados a un cuarto circuito denominado Circuito Primario, el cual corresponde al circuito de colección de energía solar. Los tres circuitos independientes reciben, en conjunto, el nombre de Circuitos Secundarios y corresponden al Circuito de Agua Caliente Sanitaria (Circuito ACS), Circuito de Calefacción y Circuito de Piscina/Jacuzzi. El control del aporte energético que se realiza a los circuitos secundarios se realiza por medio de sensores, válvulas y bombas conectados al sistema domótico de la vivienda, el cual se encarga de determinar, en base a una lógica específica o al deseo de los usuarios, hacia donde se dirige el aporte solar entregado por los colectores.

En la Figura 2.18 se presenta un esquema básico de la interacción de los circuitos que, en su conjunto, forman el SST de la vivienda. En esta figura se puede observar que la energía solar es recibida por el circuito primario y éste es el encargado de realizar el aporte energético a los demás circuitos de la vivienda por medio de intercambiadores de calor. En el Anexo B se presenta un diagrama más acabado del SST donde se puede apreciar de mejor forma la interacción física entre los circuitos que lo conforman.



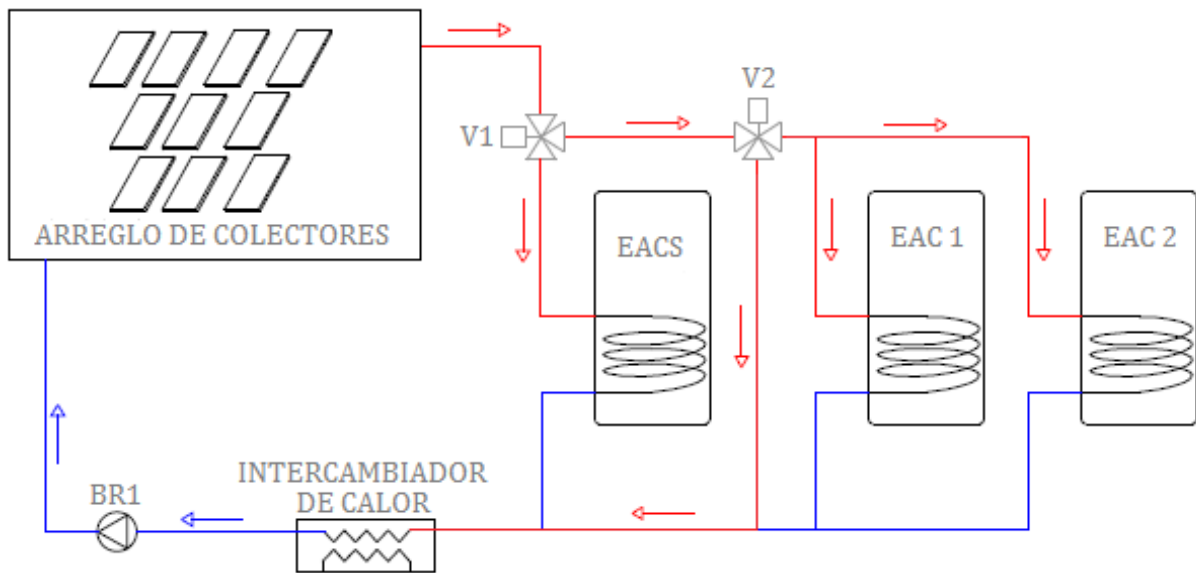
**Figura 2.18: Interacción circuitos del SST**

A continuación se describen con mayor detalle los circuitos involucrados en el SST de la vivienda.

Circuito Primario

El circuito primario es un circuito cerrado de circulación forzada que utiliza agua como fluido caloportador. Como ha mencionado anteriormente, este circuito se encuentra enlazado a los circuitos secundarios del SST y se encarga de entregar el aporte energético a éstos. Los elementos de enlace entre los circuitos primario y secundario corresponden a intercambiadores de calor que permiten realizar el traspaso de energía de un fluido a otro.

En la Figura 2.19 se desarrolla un esquema del circuito primario en el cual se pueden apreciar los elementos que los componen.

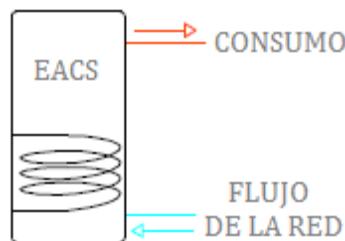


**Figura 2.19: Circuito Primario**

Circuitos Secundarios

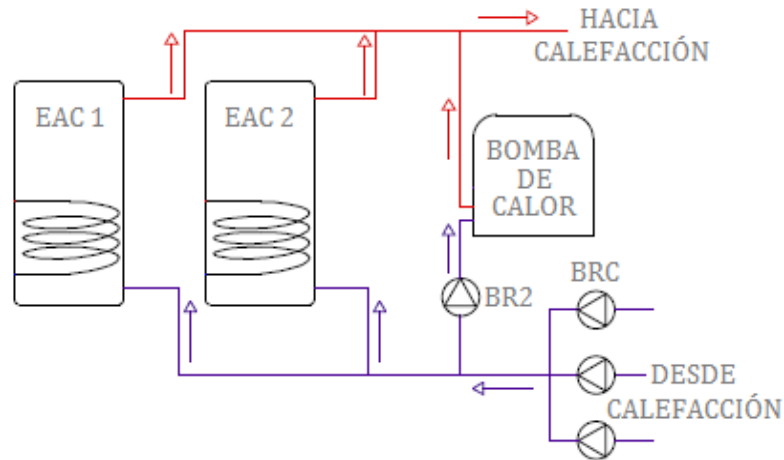
Los circuitos secundarios corresponden a los circuitos de ACS, calefacción y piscina/jacuzzi.

1. Circuito ACS: Corresponde al circuito de agua caliente que es consumida en la vivienda, por lo cual el fluido caloportador es el agua proveniente de la red. En la Figura 2.20 se presenta un esquema representativo de dicho circuito.



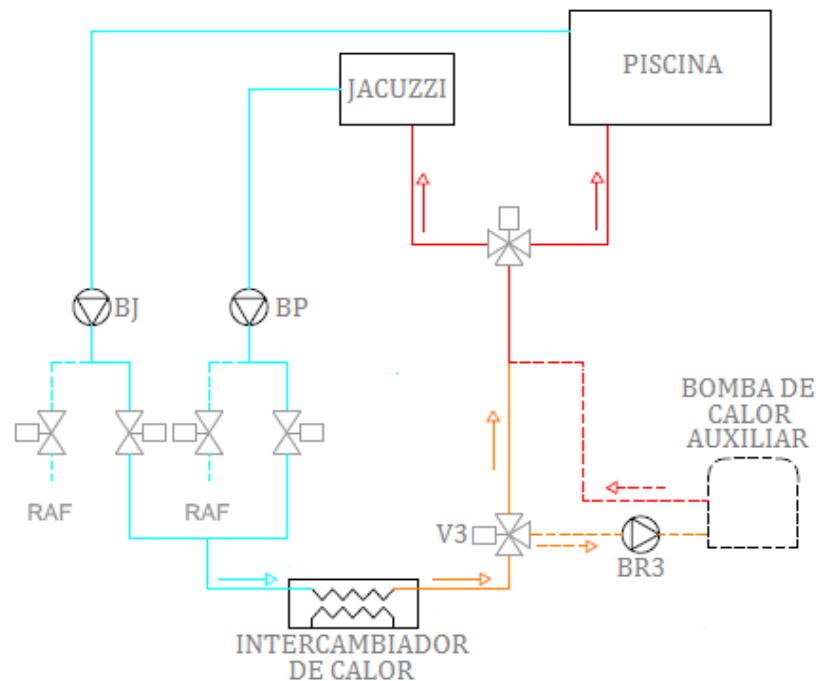
**Figura 2.20: Circuito ACS**

2. Circuito Calefacción: Corresponde al circuito utilizado para calefaccionar la vivienda por medio de la energía solar. Es un circuito cerrado de circulación forzada que utiliza agua como fluido caloportador. Posee un sistema de bombeo y un sistema auxiliar de calor para suplir la demanda energética de calefacción. En la Figura 2.21 se presenta un esquema representativo de dicho circuito.



**Figura 2.21: Circuito Calefacción**

3. Circuito Calefacción piscina/Jacuzzi: Corresponde al circuito utilizado para entregar energía al sistema piscina/jacuzzi. Básicamente es un circuito que posee un intercambiador de calor de placas que aporta la energía del circuito primario y un sistema auxiliar por bomba de calor. En la Figura 2.22 se presenta un esquema representativo de dicho circuito.



**Figura 2.22: Circuito Calefacción Piscina/Jacuzzi**

A continuación se presentan con mayor detalle las principales características de los equipos pertenecientes al SST de la vivienda:

#### 1. Colectores Solares:

La vivienda cuenta con 10 Colectores Selectivos marca Chromagen modelo CR 12-SN que se encargan de captar la energía solar y transmitirla al fluido caloportador del circuito primario. Los colectores se agrupan en tres arreglos en serie, dos de los cuales son de 3 colectores y uno de 4 colectores. Los tres arreglos que posee el sistema se conectan en paralelo al circuito primario. Entre las principales características que identifica el fabricante de los colectores solares destacan:

- Factor Óptico ( $F_R \alpha \tau$ ): 0,7132
- Factor de Pérdidas Térmicas ( $F_R U_L$ ): 4,396 [ $W/m^2 K$ ]
- Superficie del Absorbedor ( $A_{ab}$ ): 2,54 [ $m^2$ ]
- Presión Máxima de Trabajo ( $P_{max}$ ): 8 [ $bar$ ]

Su relación con los otros componentes se representa en la Figura 2.19. En el Anexo C se expone la hoja de especificaciones de los colectores en cuestión, donde se puede encontrar mayor información sobre éstos.

#### 2. Estanques acumuladores:

El SST cuenta con 3 estanques verticales marca Chromagen de 300 [l] cada uno y con intercambiadores de calor en su interior, gracias a los cuales se realiza el traspaso de energía entre el circuito primario y los circuitos de ACS y calefacción. De esta forma, los estanques acumuladores son los elementos de enlace entre el circuito primario y los circuitos secundarios de ACS y calefacción. Éstos se pueden clasificar en:

- Estanque ACS: El circuito de ACS posee un estanque cuyo intercambiador de calor forma parte del circuito primario, comunicando el Circuito de ACS al SST. Este estanque cuenta con una resistencia eléctrica interna de 2,5 [ $kW$ ] como sistema auxiliar de calor ( $Q_{aux}$ ). Su relación con los otros componentes se representa en las Figuras 2.18 y 2.19.
- Estanques Calefacción. El circuito de calefacción cuenta con dos estanques cuyos intercambiadores de calor forman parte del circuito primario, comunicando el Circuito de Calefacción al SST. Estos estanques sólo cumplen una función de acumulación ya que no poseen resistencia eléctrica en su interior. Su relación con los otros componentes se representa en las Figuras 2.19 y 2.21.

En el Anexo D se presenta la hoja de especificaciones de los estanques acumuladores en cuestión, dónde se puede encontrar mayor información sobre estos.

3. Bomba de Calor:

El SST posee una bomba de calor aire-agua Diamant modelo D16LW que consume 3,3 [kW]. Este equipo se usa como apoyo al Circuito de Calefacción, aportando calor al circuito cuando sea necesario según la lógica de control establecida para éste. Adicionalmente, existe una bomba de calor auxiliar que se encuentra proyectada para ser utilizada como apoyo al circuito piscina/jacuzzi. Dicha bomba aún no está instalada en el sistema pero sí se encuentra representada en la Figura 2.21. La relación de la bomba de calor del circuito de calefacción con los otros componentes se representa en la Figura 2.21.

4. Sistema de Bombeo:

Los circuitos cerrados de la vivienda son forzados, por lo que existen diversas bombas para cada uno. Éstas se encargan de mantener el flujo de agua caliente y de fluido caloportador.

Las principales bombas utilizadas son:

- BR1: Bomba que mantiene la circulación en el Circuito Primario.
- BR2: Bomba que alimenta con agua de calefacción a la Bomba de Calor, se utiliza cuando el sistema solar no provee la suficiente energía al Circuito de Calefacción.
- BR3: Bomba que mantiene la circulación en el Circuito de Calefacción Piscina/Jacuzzi.
- BRC: Bombas encargadas de alimentar el sistema de losa radiante que posee el Circuito de Calefacción en los distintos pisos de la vivienda.

La relación de estas bombas con el resto de los componentes se puede ver representada en la Figura 2.19 para BR1, Figura 2.21 para BR2/BRC y Figura 2.22 para BR3.

5. Válvulas:

El SST cuenta con un juego de válvulas de tres vías controladas por el sistema domótico de la vivienda. Estas válvulas se encargan de dirigir el fluido caloportador o agua según el funcionamiento del SST en un momento dado. Las válvulas de tres vías presentes en el sistema son:

- V1: Discrimina si el fluido caloportador va hacia el estanque de ACS o hacia V2 (OFF: para ACS y ON: V2). Esta válvula es controlada automáticamente según lógica de control.
- V2: Discrimina si el fluido caloportador va hacia los estanques de calefacción o hacia el intercambiador de calor (OFF: para estanques y ON: para intercambiador). Esta válvula está controlada por el sistema domótico en base a una programación para calefacción de Piscina/Jacuzzi. Adicionalmente, se permite al usuario dirigir el aporte solar de forma manual.

- V3: Discrimina si el agua de piscina y/o jacuzzi pasa directamente a la piscina y/o jacuzzi o pasa a través de la bomba auxiliar de calor (OFF: para piscina y/o jacuzzi y ON: para bomba de calor). Esta válvula está controlada por el sistema domótico permitiendo un ajuste manual o uno automático en base a programación diaria.

La relación de estas válvulas con el resto de los componentes se representa en la Figura 2.19 para V1/V2 y Figura 2.22 para V3.

6. Intercambiador de calor:

Entre el Circuito Primario y el Circuito de Piscina/Jacuzzi existe un intercambiador de calor Zilmet Z2 de 10 [bar]. Se utiliza para transmitir el excedente del aporte energético del circuito cerrado de los colectores al circuito de la piscina y jacuzzi. La relación del intercambiador de calor de placas con el resto de los componentes se representa en las Figuras 2.19 y 2.22

En la Figura 2.23 se presenta un esquema del SST de la vivienda donde se puede observar cómo interactúa el Circuito Primario con los circuitos de ACS, Calefacción y Piscina/Jacuzzi. Este esquema es utilizado en la interfaz de usuario que posee la vivienda para mostrar y controlar el funcionamiento de los sistemas de ésta. Un diagrama más acabado del SST y de los circuitos que entrelaza se encuentra en el Anexo B.

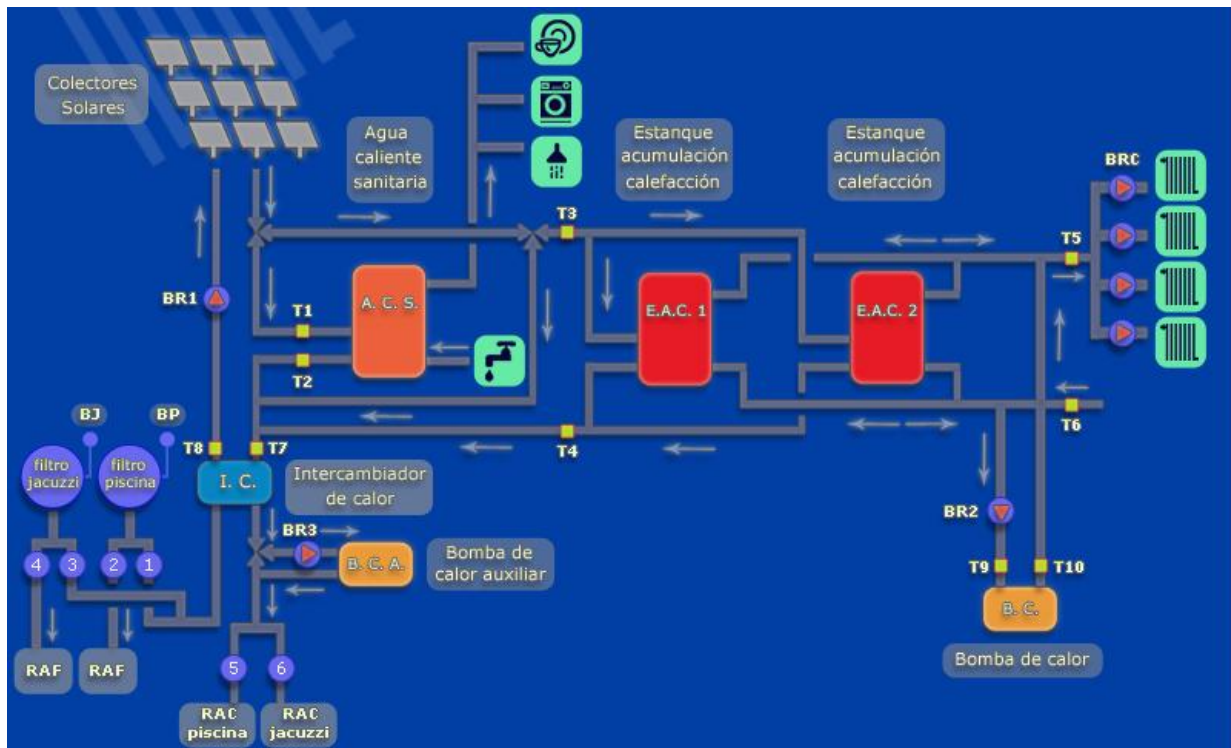


Figura 2.23: Esquema SST Domo<sup>2</sup>

Donde: E.A.C: Estanque Agua Calefacción, T<sub>x</sub>: Sensores de temperatura, BR<sub>x</sub>: Bomba recirculación circuito solar, BRC: Bomba Recirculación circuito Calefacción, BJ: Bomba Jacuzzi, BP: Bomba Piscina, RAC: Retorno Agua Caliente, RAF: Retorno Agua Fría, LC: Intercambiador de Calor, B.C: Bomba de Calor, B.C.A: Bomba de calor Auxiliar

#### 2.2.4.2 Sistema de Iluminación

Debido a las dimensiones y características generales de la vivienda, su sistema de iluminación es bastante grande y consta de 23,28[kW] instalados, lo que equivale aproximadamente a 233 ampolletas de 100[W] cada una. Por esta razón se hace imperioso utilizar sistemas de bajo consumo energético y de alta eficiencia que permitan mantener el enfoque original de la vivienda. En este contexto, Domo<sup>2</sup> posee un sistema de iluminación mixto compuesto por luces de bajo consumo energético e iluminación de alta eficiencia tipo LED. La iluminación LED se utiliza como sistema de apoyo ya que se acciona por sensores de movimiento con el objetivo de iluminar sólo en caso de circulación dentro de una habitación. Si bien su uso es auxiliar a la iluminación de bajo consumo, permite un ahorro de energía considerable junto con una importante reducción de las ganancias térmicas en comparación con un sistema de iluminación incandescente.

#### 2.2.4.3 Sistema Domótico

Los dos sistemas mencionados anteriormente están integrados en un sistema de automatización con interfaz computacional. Este tipo de sistema es muy utilizado en industrias para controlar los distintos procesos. Su uso en viviendas se conoce como domótica y corresponde a uno de los avances más innovadores y costosos de la vivienda.

Si bien el objetivo del trabajo de título no es referirse al sistema domótico de Domo<sup>2</sup>, se procederá a explicar a gran escala la lógica de control que se aplica sobre el SST. En este sentido, la solución generada otorga prioridad al uso de la energía solar disponible que generan los colectores. Lo que se espera es que los sistemas de respaldo sólo entren en funcionamiento cuando la energía solar no resulte suficiente.

Para explicar parte de la lógica de control del SST de la vivienda es necesario comenzar con un reconocimiento de las principales variables que relacionan el SST con el Sistema Domótico de la vivienda. Las cuatro primeras variables corresponden a sensores de temperatura que se pueden identificar en la Figura 2.23 y la quinta variable corresponde a un caudalímetro ubicado junto a la bomba de recirculación BR1. A continuación se enumeran las variables de control del SST.



- T1: T° del fluido caloportador en los colectores (techumbre)
- T2: T° del fluido caloportador del serpentín del estanque de acumulación de ACS (parte inferior)
- T3: T° del agua del estanque de acumulación de calefacción (parte inferior, primer estanque)
- T4: T° del agua del estanque de acumulación de calefacción (parte superior, primer estanque)
- Q1: Caudal del Circuito Primario

Con esta información es posible presentar algunos aspectos de la lógica de control establecida para el funcionamiento de los circuitos enlazados al SST.

### Circuito Primario

El sistema solar térmico aporta a través de la energía captada del sol cuando existe una diferencia de temperatura mayor a 5[°C] entre  $T1$  y  $T2$  ( $T1 - T2 > 5[°C]$ ) lo que permite activar la bomba de circulación (BR1=ON). De esta manera, comienza la recirculación del fluido caloportador desde los colectores solares hasta el serpentín del estanque de ACS.

Se puede añadir además que, si la diferencia de temperatura entre  $T1$  y  $T2$  es menor que 5[°C] ( $T1 - T2 < 5[°C]$ ) y, adicionalmente, la diferencia entre  $T1$  y  $T3$  también lo hace ( $T1 - T3 < 5[°C]$ ), entonces la bomba de recirculación se apaga (BR1=OFF), ya que el aporte solar no es suficiente.

Por otra parte, cuando  $T2$  llega a un máximo (40[°C]) quiere decir que el requerimiento para el estanque de ACS está satisfecho, por lo tanto, la central solar chequea la diferencia entre  $T1$  y  $T3$ . Si esta diferencia es mayor a 5[°C] la central energiza V1 (V1=ON) para permitir el flujo hacia V2, válvula que es controlada por domótica. Además, cuando  $T3$  llega a un máximo (35[°C]) quiere decir que el requerimiento para el estanque de calefacción está satisfecho por lo que el sistema se detiene.

Por último, se tiene que si se cumple que  $T2$  baje 5[°C] de su máximo o  $T1 - T2 > 5[°C]$ , la central desenergiza V1 (V1=OFF), aportando energía al estanque de ACS, que es su primera prioridad.

### Circuito de Calefacción

De lo anterior se desprende que el Circuito Primario es el encargado de entregar la energía a los estanques de calefacción. Para controlar la temperatura del Circuito de Calefacción existe un termostato sumergido en uno de los estanques y que se encuentra conectado con la bomba de calor. Este termostato mide la temperatura de acumulación del agua ( $T4$ ) y según ésta ordena el encendido o apagado de la bomba de calor. La temperatura de este termostato está fijada en 35[°C]. Luego, cuando el termostato mide menos de esa temperatura en los estanques de calefacción, se da

la orden de encender la bomba de calor con el objetivo de proporcionar la energía requerida para subir la temperatura a 35[°C]. Cuando la temperatura llega nuevamente a los 35[°C] el termostato da la orden de apagar la bomba de calor.

### Circuito de ACS

El circuito de agua caliente sanitaria no posee control ya que es de libre demanda del usuario. Sin embargo, es importante destacar que el estanque acumulador perteneciente a este circuito cuenta con una resistencia eléctrica como apoyo auxiliar de calor, por lo que debe existir un control sobre el encendido y apagado de dicha resistencia. En este contexto, el control está destinado a la domótica por medio de una programación horaria en la cual el dispositivo se encuentra disponible entre las 4:00 y las 9:00 horas, en la mañana, y entre las 20:00 y 23:00 horas, en la tarde. Si bien entre dichas horas el sistema está disponible, este sólo entra en funcionamiento si la temperatura del estanque de ACS es menor a 50[°C]. Esta programación permite mantener la temperatura del ACS en los momentos de mayor consumo.

### Circuito Piscina/Jacuzzi

El control lógico de este circuito aún no ha sido completamente establecido por lo que, a continuación, se presenta una planificación básica de cómo desarrollará.

El aporte solar al sistema de Piscina y Jacuzzi se realiza por medio del intercambiador de calor que comunica el circuito primario con el circuito Piscina/Jacuzzi. Por este intercambiador siempre está circulando el fluido caloportador, ya sea proveniente de los estanques de calefacción o de la válvula V2. En los meses de verano, cuando el SST supe con mayor facilidad las demandas energéticas de la vivienda, se desea un mayor aporte al Circuito de Piscina/Jacuzzi, para lo cual se debe energizar V2 (V2=ON) y así dirigir el aporte solar directo al intercambiador.

De esta forma, se establecerá una programación horaria en el sistema domótico para controlar V2, contando además con un control manual de ésta. Con lo anterior, se realizará el aporte energético a la piscina y/o jacuzzi en base al accionamiento de las bombas correspondientes. Adicionalmente, si se desea un aporte extra se contará con el apoyo de una bomba de calor que será accionada junto con la válvula V3 y con la bomba de circulación BR3, equipos pertenecientes al apoyo auxiliar de calor del Circuito Piscina/Jacuzzi.

## Capítulo 3

### Metodología

En este capítulo se menciona la metodología utilizada durante el desarrollo del Trabajo de Título. Primero se procede a entregar una visión general del procedimiento necesario para cumplir con los objetivos impuestos, enumerando cada paso seguido durante el desarrollo del trabajo. Luego se continúa con una descripción detallada de los aspectos relevantes del procedimiento, haciendo hincapié en la resolución del modelo computacional creado para simular el comportamiento del SST instalado en la vivienda.

En aspectos generales la metodología consiste en:

1. Levantamiento de equipos y sistemas, incluyendo lógica de control, programación y operación. El objetivo es describir detalladamente todos los sistemas incluyendo funcionamiento e interacción entre éstos.
2. Creación de un modelo computacional del SST en el software TRNSYS. Dicho modelo se basa en el levantamiento de equipos y en el estudio de la interacción entre éstos.
3. Monitoreo y registro de las variables de control del SST. El objetivo es conocer los datos que entregan los sensores instalados en la vivienda. Paralelo a lo anterior se utiliza un piranómetro para medir la radiación global incidente sobre los colectores y un sensor de temperatura para medir la temperatura ambiente.
4. Validación del modelo con los datos obtenidos del registro de variables. El objetivo es verificar que el modelo representa el funcionamiento del SST de la vivienda, debiéndose realizar los ajustes necesarios para que esto se cumpla.
5. Cálculo del aporte solar térmico a los Circuitos de ACS, Calefacción y Calefacción de Piscina/Jacuzzi. Además, se calcula la potencial actual disponible, la potencia actual suministrada, la energía total suministrada, el rendimiento del sistema y las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas. Esto se realiza con el objetivo de describir en términos de resultados el SST.
6. Monitoreo y registro de variables del SST bajo un nuevo escenario atmosférico. El objetivo de esto es verificar el funcionamiento del sistema en un escenario meteorológico distinto, comprobando la fidelidad del modelo creado.

7. Análisis de resultados, generación de propuestas alternativas al diseño y evaluación de alternativas en base a simulaciones del modelo.

A continuación se presentan los aspectos más relevantes del procedimiento descrito anteriormente.

### **3.1 Levantamiento de Equipos**

El levantamiento de equipos consiste en reconocer detalladamente todos los componentes de la vivienda que participan en el funcionamiento de su SST, permitiendo así establecer las condiciones de operación de los equipos y las distintas interacciones entre éstos. Para llevar a cabo esta tarea es relevante conocer los siguientes aspectos de los equipos participantes:

- Especificaciones técnicas
- Especificaciones de instalación
- Condiciones de operación
- Interacción entre equipos

Adicionalmente, es necesario realizar un reconocimiento de la lógica de control de cada uno de los componentes, permitiendo establecer la integración del SST con el sistema domótico de la vivienda. La información más relevante para realizar esta tarea es la siguiente:

- Especificaciones técnicas de equipos de control participantes
- Identificación de sensores y puntos de medición de variables
- Identificación de los componentes actuadores sobre el SST
- Identificación de componentes controlados por domótica

Toda la información anterior está focalizada a caracterizar detalladamente el circuito primario del SST, además de proveer cierto nivel de detalle en la descripción de los demás circuitos que componen el sistema solar de la vivienda. En este contexto, en el Anexo E se presenta el levantamiento de equipos realizado para modelar el circuito primario del sistema.

### **3.2 Desarrollo del Modelo**

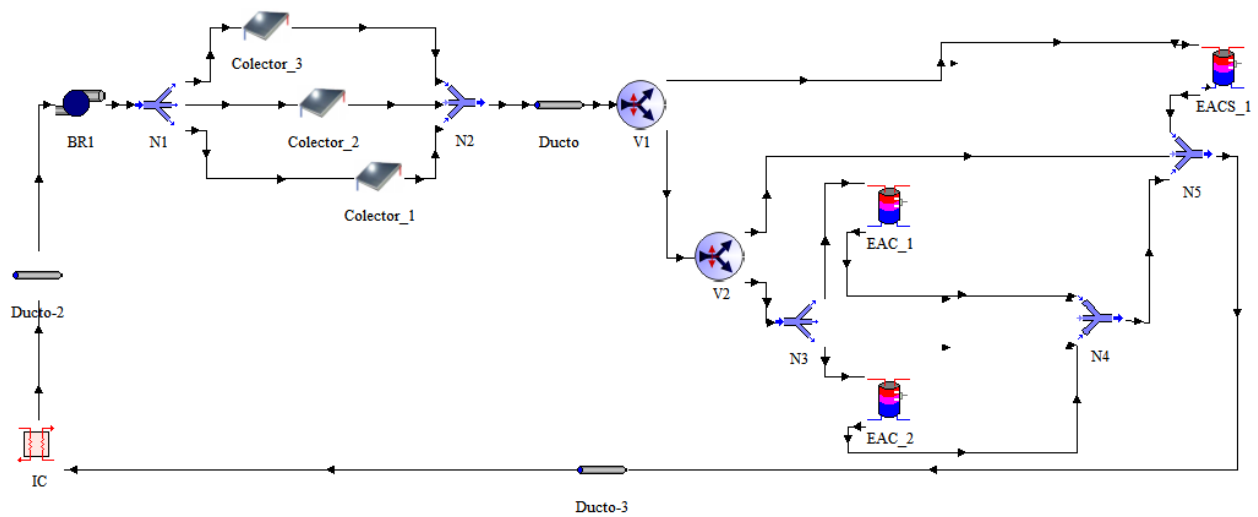
Una vez realizado el levantamiento de equipos se está en condiciones de recrear el circuito primario del SST en un modelo para ser simulado en TRNSYS. El modelo busca representar las características de los equipos instalados en el circuito primario para obtener una simulación temporal de su funcionamiento. Junto a esto, se simulan condiciones de operación para analizar el

comportamiento del sistema y así identificar potenciales cambios que pueden mejorar su desempeño.

Los principales componentes del circuito primario recreados en el modelo son:

- Colectores Solares
- Estanques de Acumulación
- Bomba de Circulación BR1
- Válvulas
- Intercambiador de Calor
- Divisores de flujo
- Mezcladores de flujo

En la Figura 3.1 se puede apreciar una representación gráfica del modelo desarrollado para el circuito primario del SST instalado en la vivienda, donde se identifican los componentes mencionados anteriormente.



**Figura 3.1: Modelo computacional SST**

Los componentes interactúan entre sí bajo relaciones de entrada y salida (inputs y outputs) que se definen en el programa de simulación en base a las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento de cada equipo. En este contexto, la representación de los componentes más sencillos se puede realizar con la librería de componentes que posee el software, sin embargo, para los componentes más complejos se hace necesario recurrir a la programación en FORTRAN, gracias a la cual se pueden programar las principales ecuaciones que describen el funcionamiento de los equipos y así establecer las relaciones de entrada y salida necesarias.

A continuación se presenta una descripción de los equipos modelados, haciendo énfasis en los componentes cuyos modelos debieron ser programados manualmente.

### 3.2.1 Colectores Solares

Para el sistema de colectores a simular se utilizó un modelo perteneciente a la librería de componentes del programa. Sin embargo, dada la información disponible sobre las características de los colectores (Ver Anexo C) y los parámetros requeridos por el modelo existente, se debió modificar el código fuente del modelo para poder utilizarlo. De esta forma, se tienen los siguientes casos:

1. Ecuación de rendimiento sin término cuadrático: La ecuación de rendimiento modelada en TRNSYS posee un término cuadrático que debe ser eliminado ya que no se posee información sobre el factor de pérdidas térmicas de segundo orden para los colectores instalados en la vivienda.
2. Temperatura media en ecuación de rendimiento: La ecuación de rendimiento del modelo existente considera el factor óptico y el factor de pérdidas térmicas en base a la diferencia de temperatura entre la temperatura media del colector y la temperatura ambiente. Es decir, la ecuación considerada es la siguiente:

$$\eta = F_{AV}(\alpha\tau) - F_{AV}U_L \frac{(T_m - T_a)}{G}$$

donde:  $F_{AV}$  es el factor de remoción de calor usando la temperatura media

$T_m$  es la temperatura media entre la entrada y la salida del colector [°C]

Sin embargo, la información que se posee del colector indica los factores mencionados en términos de la Ecuación 2.36, por lo que es necesario utilizar las siguientes ecuaciones de conversión: [2]

$$F_R(\alpha\tau) = F_{AV}(\alpha\tau) \left[ 1 + \frac{A_c F_{AV} U_L}{2\dot{m}C_p} \right]^{-1} \quad 3.1$$

$$F_R U_L = F_{AV} U_L \left[ 1 + \frac{A_c F_{AV} U_L}{2\dot{m}C_p} \right]^{-1} \quad 3.2$$

donde:  $A_c$  es el área de la superficie de colección [ $m^2$ ]

$\dot{m}$  es el flujo másico del colector en operación [ $\frac{kg}{h}$ ]

$C_p$  es el calor específico del fluido [ $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ ]

3. Parámetros correspondientes a características de absorción y refracción: El modelo existente considera como parámetros los valores de refracción de la cubierta y absorción de la placa absorbidora. Sin embargo, no se posee dicha información para los colectores utilizados, por lo tanto, se deben eliminar dichos parámetros.
4. Flujo másico de operación diferente al flujo de ensayo: Los factores  $F_R(\alpha\tau)$  y  $F_R U_L$  se obtienen para ciertas condiciones de ensayo que generalmente no son reproducidas como condiciones de operación. En este caso el flujo másico de ensayo difiere del flujo másico con el cual se utilizan los colectores, por lo tanto, se deben aplicar ecuaciones de corrección para modificar dichos factores:[2]

$$r = \frac{F_R U_L|_{use}}{F_R U_L|_{test}} = \frac{F_R(\alpha\tau)|_{use}}{F_R(\alpha\tau)|_{test}} \quad 3.3$$

$$r = \frac{\frac{\dot{m}C_p}{A_c F' U_L} \left( 1 - \exp\left(-\frac{A_c F' U_L}{\dot{m}C_p}\right) \right) \Big|_{use}}{\frac{\dot{m}C_p}{A_c F' U_L} \left( 1 - \exp\left(-\frac{A_c F' U_L}{\dot{m}_{test} C_p}\right) \right) \Big|_{test}} \quad 3.4$$

$$F' U_L = -\frac{\dot{m}C_p}{A_c} \ln \left( 1 - \frac{A_c F_R U_L}{\dot{m}C_p} \right) \Big|_{use} \quad 3.5$$

donde:  $r$  es la razón de corrección de los factores ópticos y de pérdidas térmicas  
 $x|_{use}$  corresponde a las propiedades en caso de operación  
 $x|_{test}$  corresponde a las propiedades en caso de ensayo

Es importante destacar que, en colectores con líquido como fluido caloportador, los valores de  $F' U_L$  en condiciones de ensayo y uso pueden considerarse iguales, por lo tanto, la Ecuación 3.4 queda:

$$r = \frac{\dot{m}C_p|_{use} \left( 1 - \exp\left(-\frac{A_c F' U_L}{\dot{m}C_p|_{use}}\right) \right)}{\dot{m}C_p|_{test} \left( 1 - \exp\left(-\frac{A_c F' U_L}{\dot{m}C_p|_{test}}\right) \right)} \quad 3.6$$

donde:  $\dot{m}C_p|_{test}$  corresponde al producto entre flujo másico y capacidad caloría en condiciones de ensayo  $\left[ \frac{kJ}{h \cdot K} \right]$   
 $\dot{m}C_p|_{use}$  corresponde al producto entre flujo másico y capacidad caloría en condiciones de operación  $\left[ \frac{kJ}{h \cdot K} \right]$

Como se describió en el Capítulo 2, los modelos en TRNSYS requieren de parámetros e información de entrada para ser simulados. Los parámetros corresponden principalmente a las características de los colectores y los datos de entrada corresponden a la información de salida de la bomba de recirculación BR1, como se puede apreciar en la Figura 3.1. En este contexto los parámetros y entradas requeridas son:

- Parámetros
  - Área de colección
  - Capacidad calórica del fluido
  - Flujo másico de ensayo
  - Factor de pérdidas ópticas
  - Factor de pérdidas térmicas
- Entrada
  - Temperatura del fluido
  - Flujo másico de operación
  - Temperatura ambiente
  - Radiación incidente sobre el plano de los colectores

Con esta información las ecuaciones desarrolladas para el modelo modificado en conjunto con las ecuaciones que no se modificaron permiten obtener los siguientes datos de salida:

- Temperatura de Salida de los colectores
- Flujo másico que pasa por los colectores
- Energía entregada al fluido caloportador

La diferencia entre la información disponible y la requerida por el modelo puede significar que la representación de este componente sea alejada de la realidad, lo que se comprueba con el proceso de validación del modelo.

### 3.2.2 Estanques de Acumulación

La modelación de estanques acumuladores representa uno de los principales problemas dentro de la simulación de sistemas solares térmicos, existiendo diversos estudios donde se abarca dicha problemática [24][25][26].

Si bien el programa TRNSYS posee distintos modelos de estanques de acumulación, éstos no representan fielmente los utilizados en el SST de la vivienda, haciéndose necesario recurrir a la programación de un nuevo modelo para la simulación de este componente. En este sentido, es



importante identificar las principales características de los estanques utilizados para así recrear, de la mejor forma posible, su funcionamiento.

Para definir correctamente el modelo se deben considerar las especificaciones de los estanques verticales Chromagen presentados en el Anexo D. A continuación se describen los principales parámetros o características que se deben tener en cuenta para recrear los estanques en un modelo computacional:

- Dimensiones: Se deben considerar tanto la capacidad del estanque como sus dimensiones espaciales. Además, es necesario conocer a qué altura se encuentran los distintos elementos que éste posee, como las entradas y salidas del agua de consumo y del intercambiador de calor interno.
- Fluidos: Se deben conocer las propiedades de los fluidos que se utilizan tanto en el serpentín del intercambiador como en el mismo estanque.
- Características del intercambiador de calor: Se deben conocer las principales características del intercambiador de calor, como material del serpentín y superficie de intercambio.
- Características del apoyo energético: Se debe conocer el tipo de apoyo energético que posee el estanque en su interior, siendo aspectos relevantes su posición y potencia, entre otros.
- Características del estanque: Se debe considerar la aislación que posee el estanque y los materiales de éste.

Por otra parte, la información de entrada que reciben los estanques desde los colectores, por el lado del intercambiador, y desde la carga, por el lado del consumo, corresponden a:

- Flujo másico del intercambiador
- Flujo másico del estanque
- Temperatura de entrada al intercambiador
- Temperatura de entrada al estanque
- Temperatura ambiente
- Funcionamiento del sistema auxiliar de calor

Con los parámetros y datos de entrada se puede recrear el estanque de acumulación en un modelo computacional gobernado por ecuaciones de transferencias de calor derivadas de dichas características. Con estas ecuaciones se puede obtener una representación del funcionamiento general del estanque dentro del SST, para así discutir su importancia dentro del sistema. La principal información de salida que se obtiene del modelo del estanque corresponden a:

- Temperatura de salida del intercambiador

- Temperatura de salida del estanque
- Pérdidas térmicas al ambiente
- Energía entregada por el sistema auxiliar
- Energía entregada por el intercambiador
- Estratificación de temperatura en el estanque

A continuación se procede a definir la metodología utilizada para la creación del modelo computacional del estanque.

#### 3.2.2.1 Supuestos

Para recrear el funcionamiento de los estanques se establecen supuestos que permitan reducir la complejidad del modelo sin perder la fidelidad requerida para éste, debiéndose fundamentar el uso de cada supuesto según el funcionamiento real del estanque. Los principales supuestos utilizados en la modelación de los estanques verticales son:

- Estanque: Debido a la información necesaria que se requiere para modelar la envolvente del estanque se establece como supuesto que el espesor de la cubierta de acero es de  $10[mm]$ . Las dimensiones del aislante se encuentran mencionadas en el Anexo D.
- Resistencia eléctrica: La resistencia eléctrica se considera como un elemento puntual que pertenece a una capa de estratificación dada por la geometría del estanque. Su modelación se basa en la potencia entregada por el elemento y su posición dentro del estanque.
- Intercambiador de calor: El intercambiador de calor interno se considera como un elemento de intercambio compuesto por un serpentín de cobre con un espesor de  $2[mm]$  y de tubos lisos. Su modelación se basa en sus características físicas y posición dentro del estanque.
- Estratificación: El modelo a utilizar corresponde a un estanque con estratificación de temperatura. Este supuesto se basa en que el estanque de la vivienda utiliza la estratificación en su diseño, es decir, todos los elementos del estanque se diseñan para favorecer la estratificación de temperatura en su interior.
- Flujo agua consumo: Se considera que el flujo de carga y descarga del tanque es bajo, por lo tanto, no ocurre mezcla de fluido entre las distintas capas de la estratificación. Es decir, la estratificación no se ve afectada por el flujo de agua. Por este motivo, el efecto de mezcla producido por la entrada de agua se simula sólo para el nodo en el cual se encuentra dicha entrada.
- Momento del fluido: El fluido caliente que asciende desde el intercambiador de calor por ejemplo, tiene asociado un momento. El modelo no considera el ingreso de este momento a una capa de mayor temperatura, debiéndose igualar la temperatura de ambas capas para

permitir la mezcla del fluido. Este fenómeno se justifica en base a la simulación en FLUENT realizada por el trabajo de B. J. Newton [27], en el cual demuestra que la mezcla de fluido entre dos capas se produce cuando éstas igualan su temperatura.

- Mezcla de capas: La mezcla de las capas de estratificación ocurre cuando se excede el número crítico de Rayleigh, descrito en la ecuación 2.24 del capítulo anterior [6]. La ecuación utilizada para esta condición corresponde a:

$$Ra_c = \frac{g\beta(T_1 - T_2)\Delta x^3}{\alpha_t \nu} = 1708 \quad 3.7$$

donde:  $Ra_c$  es el valor crítico de Rayleigh

$g$  es la aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ]

$\beta$  es el coeficiente de expansión térmica [ $1/^\circ C$ ]

$T_1$  es la temperatura del nodo superior [ $^\circ C$ ]

$T_2$  es la temperatura del nodo superior [ $^\circ C$ ]

$\Delta x$  es la distancia entre el centro de dos nodos contiguos [ $m$ ]

$\alpha_t$  es la difusividad térmica [ $m^2/s$ ]

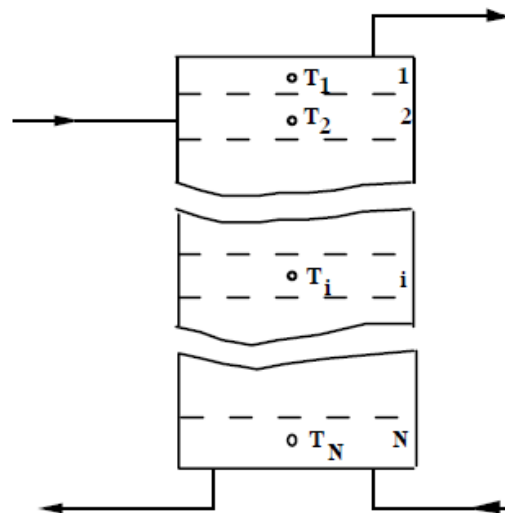
$\nu$  es la viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ]

- Convección pared exterior estanque: El modelo no considera efectos de convección en la pared externa del estanque. Este supuesto se basa en que los estanques se encuentran en una sala cerrada y aislada del ambiente, por lo tanto, los efectos convectivos sobre la pared exterior son mínimos.
- Modelo unidimensional: El modelo utilizado es un modelo unidimensional ya que considera variación de temperatura solamente a lo largo del eje longitudinal del estanque y no en su eje transversal. Este supuesto se basa en los resultados experimentales que se han realizado en estudios dirigidos al comportamiento de estanques de acumulación [25][26]. Dichos resultados indican que en estanques con aislación perimetral la variación de temperatura en el eje transversal es despreciable.
- Balance de energía: El modelo se resolverá en base a un balance de energía entre las capas de estratificación del estanque, lo que permite calcular la energía aportada por el intercambiador y resistencia eléctrica, la temperatura de cada nodo y, por lo tanto, la temperatura de salida del agua de consumo.

### 3.2.2.2 Modelo

Considerando los supuestos anteriores, el modelo general a resolver es un modelo unidimensional en estado transiente. Para resolver este problema de simulación se divide el

estanque en nodos o volúmenes de control, donde cada nodo representa una capa de estratificación del estanque [2][27]. Esto quiere decir que el estanque se divide en un conjunto de  $N$  nodos que poseen relaciones de intercambio de calor entre ellos. Con esta aproximación se puede realizar una simulación del comportamiento del estanque considerando el comportamiento de cada nodo en relación a la distribución de los componentes del estanque en éstos. En la Figura 3.2 se puede observar la división en nodos de un estanque.



**Figura 3.2: Nodos o volúmenes de control**

La estratificación en nodos permite realizar un balance energético para el  $i$ -ésimo teniendo en cuenta los siguientes factores:

1. Conducción longitudinal: Dentro del estanque existen dos efectos que apoyan la conducción longitudinal y, por lo tanto, la des-estratificación del fluido. Estos efectos son:
  - a) Conducción a través del fluido: La conducción en el fluido tiende a des-estratificar el estanque llevándolo al equilibrio térmico por medio del intercambio de calor entre la interfaz de los nodos. La mezcla entre los fluidos de dos nodos no se produce hasta que ambos tengan la misma temperatura.
  - b) Conducción por paredes del estanque: La pared interna del estanque suele ser de acero, material de alta conductividad térmica que permite flujo de calor axial hacia los nodos inferiores. Por esta razón, la conducción axial por la pared del nodo  $i$  elevará la temperatura de la pared del nodo  $i+1$ , lo que a su vez elevará la temperatura del fluido en dicho nodo ya que la temperatura superficial de la pared se asume igual a la temperatura del fluido en dicho nodo. Esto resulta en el mismo efecto de des-estratificación producto de la conducción del fluido.

Luego, considerando ambos efectos de conducción y el desarrollo descrito en el Anexo F, se obtiene el siguiente término que representa estos fenómenos en el balance energético:

$$Q_{total} = \frac{(k + \Delta k)A_c}{\Delta x} \Delta T \quad 3.8$$

donde:  $Q_{total}$  es el flujo de calor producto de la conducción longitudinal [W]

$k$  es la conductividad del fluido [W/mK]

$\Delta k$  es el aporte a la conductividad debido a las paredes del estanque [W/mK]

$\Delta x$  es la distancia entre los centros de nodos contiguos [m]

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre nodos contiguos [°C]

2. Conducción transversal: La conducción transversal o radial está representada por la transferencia de calor por la pared del estanque al exterior. Este efecto depende de la temperatura del fluido, la temperatura del ambiente que rodea el estanque, conductividad de la pared y conductividad del aislante. Este fenómeno se representa en el balance energético usando la Ecuación 2.13.
3. Efecto de empuje debido a diferencia de temperatura (convección): Este efecto hace referencia a que si un nodo ( $i + 1$ ) está a una temperatura igual o mayor que el nodo inmediatamente superior( $i$ ), se producirá mezcla del fluido debido al ascenso del más cálido por diferencia de densidad. En el modelo este efecto se simula analizando la diferencia de temperatura entre nodos, intercambiando la temperatura de los nodos cuando la diferencia de ésta es menor a  $0,001[°C]$  ( $T_i - T_{i+1} \leq 0,001[°C]$ ), lo que prácticamente corresponde a la inversión térmica. Este efecto se debe a la presencia de elementos que aportan calor en los nodos inferiores, como el intercambiador de calor y la resistencia eléctrica.
4. Transferencia de masa: El flujo másico corresponde a un flujo de masa y energía gobernado en cada nodo por la siguiente ecuación:

$$Q = \dot{m}C_p \Delta T \quad 3.9$$

donde:  $Q$  es la potencia entregada/perdida en el nodo [W]

$\dot{m}$  es el flujo másico del nodo [kg/s]

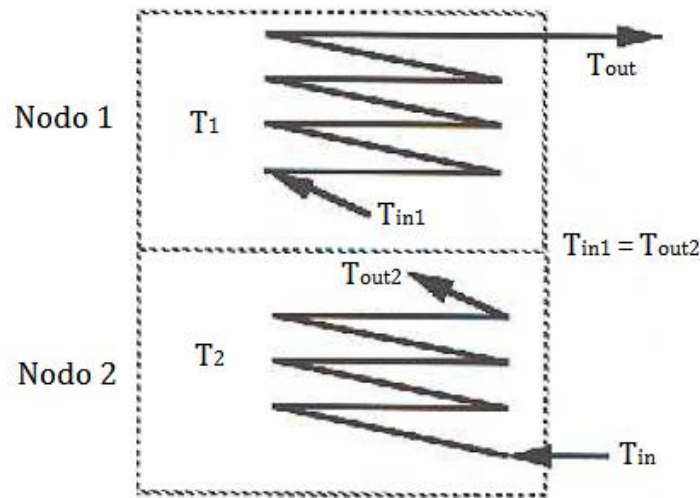
$C_p$  es el capacidad calórica específica [J/kgK]

$\Delta T$  es el cambio de temperatura entre nodos contiguos [°C]

Esta ecuación permite representar en el balance energético tanto el ingreso y salida de flujo como el traspaso de éste entre nodos.

5. Intercambiador de calor: Para modelar el comportamiento del intercambiador de calor interno es necesario tener las siguientes consideraciones:

- a) La posición del intercambiador de calor es relevante para conocer los nodos que contienen este elemento. En este contexto, si un intercambiador abarca  $n$  nodos, se trata como  $n$  intercambiadores de calor diferentes con salidas y entradas compartidas. En la Figura 3.3 se muestra con mayor detalle un ejemplo de un intercambiador que abarca dos nodos.



**Figura 3.3: Intercambiador de calor compartido por dos nodos**

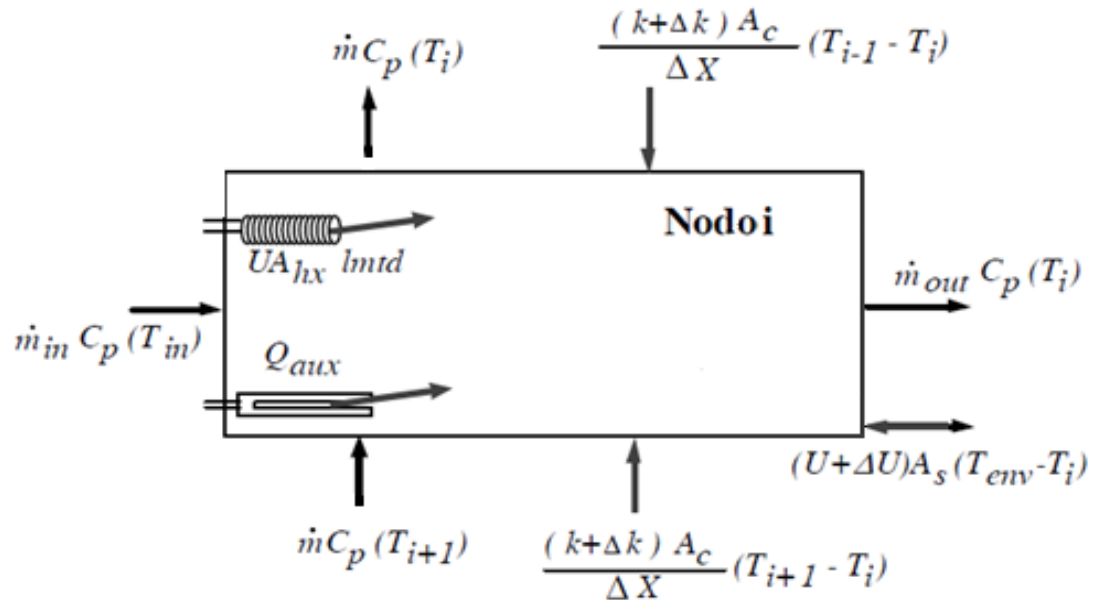
En la Figura 3.3 se puede apreciar que el intercambiador de calor se trata como un intercambiador por nodo, donde la temperatura de salida del intercambiador en el nodo 2 ( $T_{out2}$ ) corresponde a la temperatura de entrada en el intercambiador de calor en el nodo 1 ( $T_{in1}$ ). Así, el aporte energético del intercambiador se analiza por nodo, utilizando las temperaturas descritas anteriormente.

- b) La geometría y materiales del intercambiador son relevantes para caracterizar su comportamiento térmico.

En base a dichas consideraciones, se utiliza una representación circuital del intercambiador para calcular el coeficiente global de intercambio térmico ( $UA_{hx}$ ), desarrollo que se muestra en el Anexo G. La energía entregada por el intercambiador de calor interno se modela en el balance energético utilizando la Ecuación 2.13

6. Ubicación de resistencia eléctrica: Al igual que en el caso anterior la ubicación de la resistencia es relevante para conocer en cual nodo se produce el ingreso de calor.

Considerando lo anterior en la Figura 3.4 se presenta el balance energético sobre el  $i$ -ésimo nodo. Para efectos ilustrativos se asume que dicho nodo posee todos los componentes del estanque:


**Figura 3.4: Balance energético i-ésimo nodo**

- donde:
- $i$  es el índice del nodo que se está analizando, donde  $i = 1$  es el nodo superior
  - $\dot{m}$  es el flujo másico del fluido que circula al interior del estanque [ $kg/h$ ]
  - $\dot{m}_{in}$  es el flujo másico del fluido que ingresa al estanque desde la red [ $kg/h$ ]
  - $\dot{m}_{out}$  es el flujo másico del fluido que sale del estanque al consumo [ $kg/h$ ]
  - $k$  es la conductividad térmica del fluido en el interior del estanque [ $W/m \cdot K$ ]
  - $\Delta k$  es la conductividad por conducción longitudinal en paredes [ $W/m \cdot K$ ]
  - $U$  es el coeficiente global de pérdidas del estanque [ $W/m^2 \cdot K$ ]
  - $\Delta U$  es el coeficiente global de pérdidas adicional del nodo  $i$  [ $W/m^2 \cdot K$ ]
  - $UA_{hx}$  es el coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador [ $W/K$ ]
  - $lmtd$  es el promedio de la diferencia de temperatura media logarítmica [ $^{\circ}C$ ]
  - $\dot{Q}_{aux}$  es el aporte energético de la resistencia eléctrica [ $W$ ]
  - $T_i$  es la temperatura del nodo  $i$  [ $^{\circ}C$ ]
  - $T_{env}$  es la temperatura del ambiente donde se encuentran los estanques [ $^{\circ}C$ ]
  - $T_{in}$  es la temperatura del fluido que entra al estanque desde la red [ $^{\circ}C$ ]
  - $A_c$  es el área de la sección transversal del estanque [ $m^2$ ]
  - $A_s$  es el área del manto del nodo [ $m^2$ ]

Combinando los flujos de energía descritos en la Figura 3.1 se puede obtener la siguiente ecuación de balance energético:

$$\begin{aligned}
 (M_i C_p) \frac{dT_i}{dt} = & \frac{(k + \Delta k) A_c}{\Delta x_{i+1 \rightarrow i}} (T_{i+1} - T_i) + \frac{(k + \Delta k) A_c}{\Delta x_{i-1 \rightarrow i}} (T_{i-1} - T_i) + (U + \Delta U_i) A_s (T_{env} - T_i) \\
 & + \dot{m}_{down} C_p (T_{i-1}) - \dot{m}_{up} C_p (T_i) + \dot{m}_{up} C_p (T_{i+1}) + \dot{Q}_{aux} + UA_{hx} (lmt d) \\
 & + \dot{m}_{in} C_p (T_{in}) - \dot{m}_{out} C_p (T_i)
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

donde:  $M_i$  es la masa del nodo  $i$  [kg]

$\Delta x_{i+1 \rightarrow i}$  es la distancia entre centros de los nodos  $i$  y el nodo inferior  $i+1$  [m]

$\Delta x_{i-1 \rightarrow i}$  es la distancia entre centros de los nodos  $i$  y el nodo superior  $i-1$  [m]

Programando a la Ecuación 3.10 para cada nodo en cuestión se puede generar un modelo de estanque estratificado. Es importante tener en cuenta que no todos los nodos presentan los términos correspondientes a entradas y salidas de fluido, intercambiador de calor y/o resistencia eléctrica. En este sentido, se tiene que considerar la hoja de dimensiones del estanque para determinar en cuales nodos se encuentran los componentes. En el Anexo H se incluye el código creado para el modelo del estanque.

### 3.2.3 Intercambiador de Calor

El intercambiador de calor utilizado en el SST de la vivienda corresponde a un intercambiador de placas que se encarga de realizar el traspaso de energía del circuito primario al circuito de piscina/jacuzzi. En este contexto, el modelo de intercambiador utilizado para la simulación corresponde un intercambiador de flujo en contracorriente, por lo que se utilizan las ecuaciones descritas para este tipo de configuración. En este caso se utilizó un modelo de la librería de componentes de TRNSYS, el cual utiliza principalmente la Ecuación 2.53. y que se resume a continuación:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(-\frac{UA_{hx}}{C_{min}} \left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right)}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} \exp\left(-\frac{UA_{hx}}{C_{min}} \left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right)}$$

donde:  $\varepsilon$  es la efectividad del intercambiador de calor

$UA_{hx}$  es el coeficiente global de intercambio térmico [W/K]

$C_{min}$  es el producto  $(\dot{m}C_p)_{min}$  [kJ/(h · K)]

$C_{max}$  es el producto  $(\dot{m}C_p)_{max}$  [kJ/(h · K)]



### 3.2.4 Bomba de Recirculación

La bomba de circulación corresponde a un componente de la librería de modelos de TRNSYS, cuya función es mantener un flujo másico estable según la operación del SST de la vivienda. Es importante destacar que esta bomba incluye un parámetro de control que permite establecer condiciones de encendido y apagado según una señal. Lo anterior permite recrear el control que el sistema de domótica realiza sobre la bomba de circulación.

### 3.2.5 Válvulas, Divisores de Flujo y Mezcladores de Flujo

Estos componentes también son obtenidos de la librería de componentes del programa. En relación a los divisores y mezcladores de flujo se puede mencionar que su importancia radica en permitir simular los nodos de las uniones en paralelo que posee el SST. En relación a las válvulas es interesante destacar que éstas poseen, al igual que la bomba de circulación, un parámetro de control que permite recrear el funcionamiento del sistema domótico de la vivienda.

## 3.3 Monitoreo y Registro

El monitoreo y registro de todas las variables del SST se realiza utilizando una metodología para las variables intrínsecas del sistema y otra para las variables extrínsecas. Teniendo esto en cuenta, la metodología para el registro de las variables intrínsecas del sistema consiste en hacer uso del sistema domótico de la vivienda. Este sistema permite registrar el funcionamiento de los equipos a lo largo del tiempo, obteniéndose la información de las siguientes variables.

- Circuito Primario
  - Temperatura de entrada y salida del intercambiador de calor estanque ACS
  - Temperatura de entrada y salida del intercambiador de calor estanque calefacción
  - Temperatura de entrada y salida del intercambiador de calor Piscina/Jacuzzi
  - Válvula de tres vías V1 (tiempo en ON/OFF)
  - Válvula de tres vías V2 (tiempo en ON/OFF)
  - Bomba de Recirculación BR1 (tiempo en ON/OFF)
  - Volumen acumulado del fluido que transcurre por el circuito
- Circuito ACS
  - Resistencia eléctrica de estanque (tiempo en ON/OFF)
  - Volumen acumulado del fluido consumido
- Circuito Calefacción
  - Temperatura de entrada y salida de la bomba de calor BC

- Temperatura del surtidor de agua de calefacción
- Temperatura del retorno del agua de calefacción
- Bomba de Recirculación BR2 (tiempo en ON/OFF)
- Bomba de Calor (tiempo en ON/OFF)
- Volumen acumulado del fluido que transcurre por la bomba de calor
- Circuito Piscina/Jacuzzi:
  - Temperatura piscina
  - Temperatura jacuzzi

Por otro lado, la metodología para realizar el registro de las variables externas al sistema consiste en la instalación de dos equipos de medición de datos (datalogger), a los cuales se pueden conectar sensores de temperatura y radiación (piranómetro). Uno de los equipos se utiliza para medir la temperatura del recinto que alberga los estanques acumuladores o sala de máquinas y el otro equipo se utiliza para medir la temperatura ambiente y la radiación incidente sobre el plano de los colectores. Para la realización de esto, se debe ubicar el piranómetro sobre la superficie de los colectores o en una superficie que posea el mismo ángulo y que tenga la misma cantidad de horas luz que éstos. Es importante destacar que estos equipos además miden la humedad relativa del ambiente, información que no es utilizada como dato de entrada del modelo computacional.

De esta manera, el registro de datos se realiza por períodos de una semana y en dos ocasiones distintas separadas por la mayor cantidad de meses posibles. El objetivo de medir durante una semana es poseer mediciones por un período de tiempo representativo del régimen de uso de la vivienda, lo que permite extrapolar resultados para distintas semanas de un año. Asimismo, el objetivo de medir en dos ocasiones distintas es conocer el comportamiento de la vivienda en escenarios climatológicos diferentes, gracias a lo cual se posee mayor cantidad de información para validar correctamente el modelo.

### 3.4 Validación del Modelo

El modelo computacional creado en base al levantamiento de equipos debe ser validado para luego ser utilizado como representación del comportamiento de los sistemas instalados en la vivienda. La metodología utilizada para validar el modelo es la siguiente:

1. Ajustar las variables de salida del modelo para que coincidan con las variables de control y registro utilizadas en la vivienda. Gracias a esto se puede representar el modelo con mayor fidelidad y se facilita la comparación de resultados.

2. Utilizar el registro de variables correspondientes al clima como datos de entrada del modelo. Este registro corresponde a las semanas de medición que se han realizado sobre los sistemas de la vivienda.
3. Comparar las variables de salida del modelo con los resultados obtenidos del registro de variables de la vivienda. Para esto se compara el comportamiento de los equipos de la vivienda con los resultados del comportamiento de éstos en la simulación, teniendo en cuenta la ubicación de los sensores instalados en la vivienda.
4. Verificar que los resultados obtenidos de la simulación sean similares a los resultados obtenidos en los registros, aceptándose diferencias de hasta 20%. Si las diferencias son mayores, entonces se deben identificar los puntos críticos de la simulación y realizar los ajustes correspondientes al modelo por medio de un análisis específico a cada componente ensayado.
5. Comprobar la validez del modelo comparando los resultados de la simulación con los registros obtenidos durante un período de medición distinto. Para esto se utiliza el mismo procedimiento descrito en los puntos 2 y 4, sin considerar el punto 3.

### 3.5 Cálculos

Los datos obtenidos del registro se utilizan para caracterizar el SST de la vivienda en función de resultados. Para llevar a cabo esta caracterización se realizan los siguientes cálculos:

1. Energía y potencia disponible: Se utilizan los registros de clima obtenidos durante el período de medición para calcular la energía y potencia disponible en función de la radiación incidente sobre los colectores.
2. Energía y potencia suministrada por equipos: Se utilizan los datos obtenidos del registro de medición de la vivienda para calcular, en base a las ecuaciones presentadas en el Capítulo 2, la energía y potencia entregadas por los distintos equipos del SST.
3. Rendimiento del SST: Se utilizan las ecuaciones de rendimiento mencionadas en el Capítulo 2 para caracterizar el funcionamiento de los colectores y de los distintos equipos del SST, obteniéndose así un rendimiento global del sistema.
4. Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas: Se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas en base al uso de la misma energía en una vivienda equipada con sistema de calefacción por gas natural.
5. Resultados de simulación: Se realizan los cálculos anteriores para las simulaciones efectuadas en TRNSYS, tanto en el período semanal como en el anual. Para el caso anual se utiliza el registro climatológico que posee el software para la ciudad de Santiago de Chile.

## Capítulo 4

### Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos al desarrollar la metodología planteada en el capítulo anterior. En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos del registro de variables. Luego, serán expuestos los resultados de la validación del modelo y, por último, los resultados obtenidos de la simulación computacional.

#### 4.1 Registro de Variables

En esta sección se presentan los datos obtenidos del registro de variables extrínsecas -o variables de clima-, e intrínsecas -o variables del sistema solar-, donde se entregan resultados que caracterizan dichas variables según la metodología planteada en el capítulo anterior.

##### 4.1.1 Variables de Clima

El registro de radiación y temperatura ambiente se realiza en tres períodos: el primero entre el 28 de Abril y el 4 de Mayo, el segundo entre el 26 de Mayo y el 1 de Junio y el último entre el 29 de Julio y el 4 de Agosto. En las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran gráficos con los datos de temperatura ambiente y radiación obtenidos en dichos períodos.

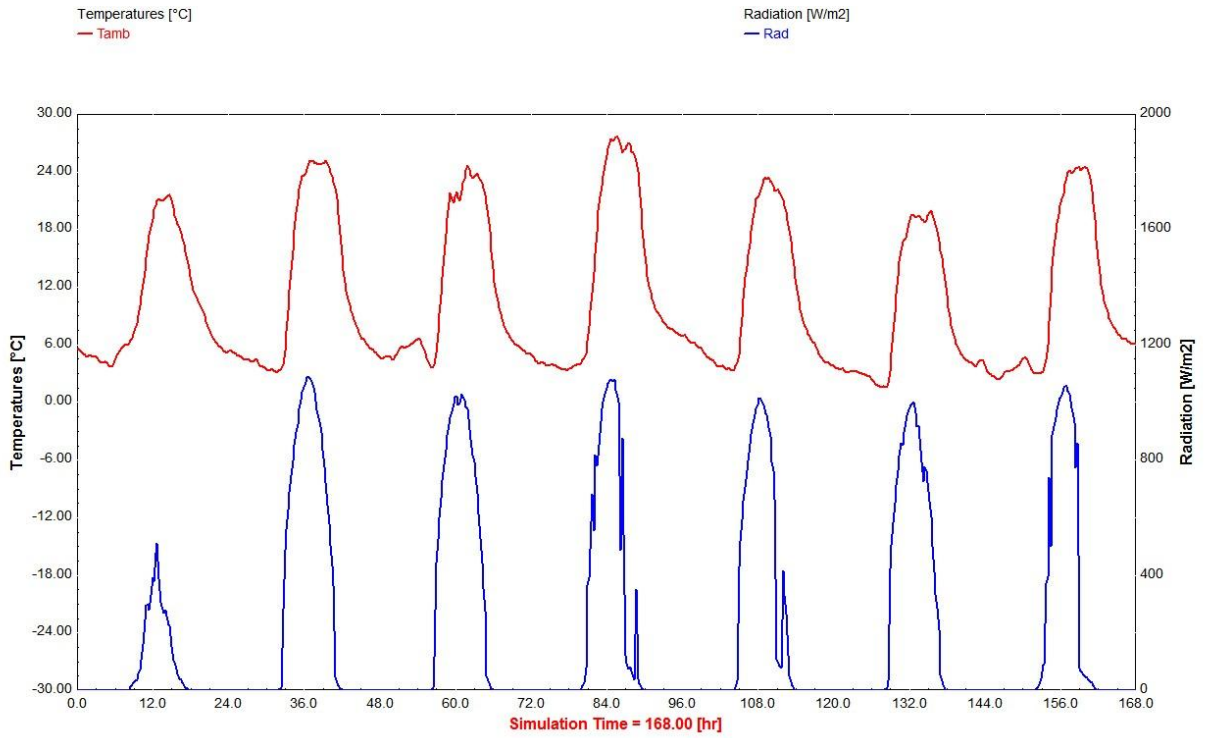


Figura 4.1: Medición de radiación y temperatura en el primer período

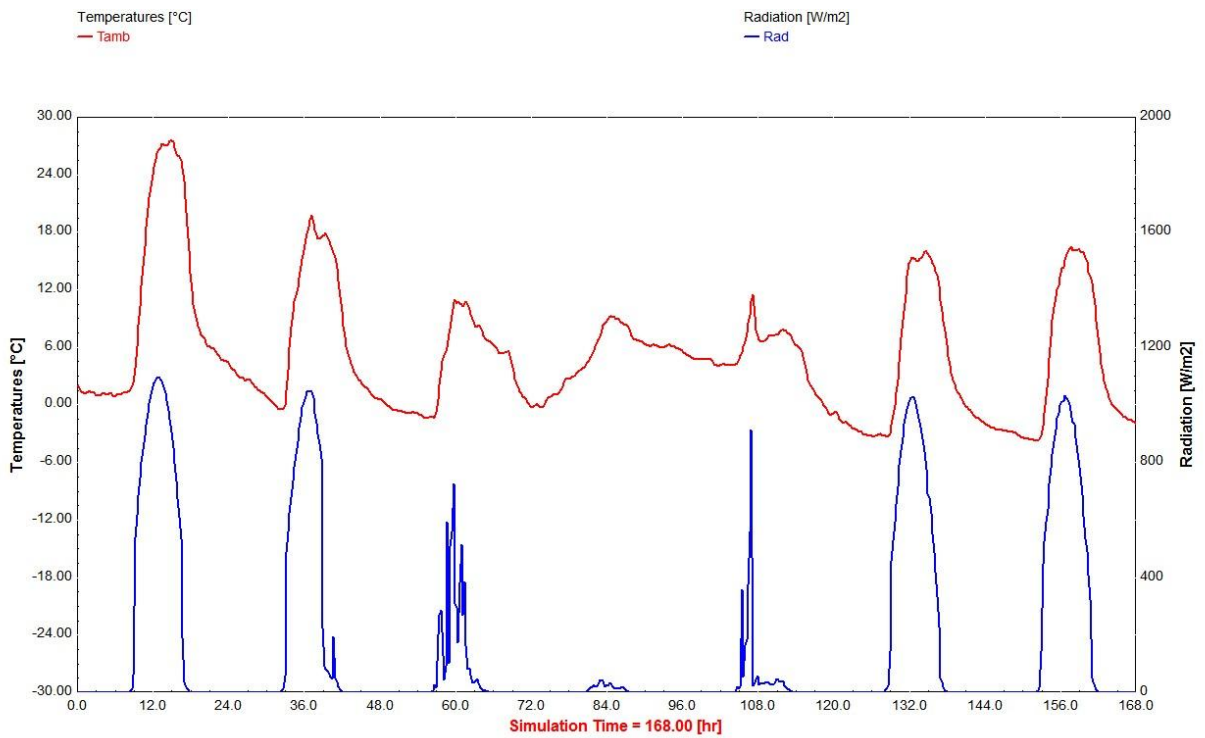
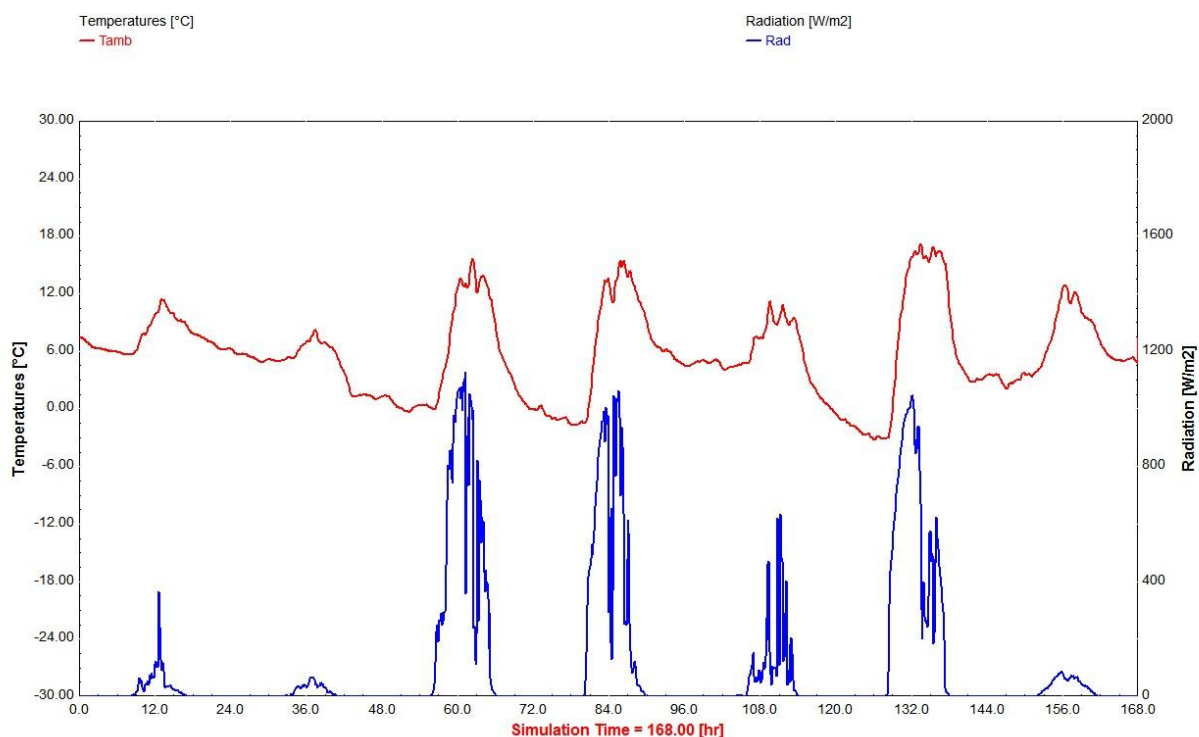


Figura 4.2: Medición de radiación y temperatura en el segundo período



**Figura 4.3: Medición de radiación y temperatura en el tercer período**

Adicionalmente, en el Anexo I, que se adjunta al final del informe en soporte digital, se exponen las tablas correspondientes a las mediciones de las variables de clima de cada uno de los tres períodos de medición.

En la Tabla 4.1 se presenta un resumen de los datos relevantes concernientes a las mediciones presentadas anteriormente.

**Tabla 4.1: Resultados característicos variables de clima**

|                               | Primer Período<br>28/04/11 - 04/05/11 | Segundo Período<br>26/05/11 - 01/06/11 | Tercer Período 29/07/11<br>- 04/08/11 |
|-------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| <b>Temperatura Ambiente</b>   |                                       |  |                                       |
| Mínima [°C]                   | 2,02                                  | -3,78                                  | -2,44                                 |
| Máxima [°C]                   | 25,04                                 | 23,71                                  | 15,37                                 |
| Promedio [°C]                 | 10,36                                 | 4,86                                   | 5,51                                  |
| <b>Radiación Solar</b>        |                                       |  |                                       |
| Energía Semanal [kWh]         | 925,21                                | 687,72                                 | 467,39                                |
| Energía Promedio Diaria [kWh] | 132,17                                | 98,25                                  | 66,77                                 |

### 4.1.2 Variables del SST

El registro de datos de la vivienda se realiza en dos períodos, el primero entre el 26 de Mayo y el 1 de Junio y el segundo entre el 29 de Julio y el 4 de Agosto. En este contexto, es relevante mencionar que solo el segundo período posee registro de todas las variables del sistema, utilizándose sus mediciones para las discusiones principales. En el caso del primer período de registro, se utilizan sus datos como comprobante de la validación.

Durante las semanas de medición el sistema domótico registró las variables mencionadas en la metodología de datos intrínsecos. Para exponer esta información y los principales cálculos se dividen los resultados según los circuitos que posee el SST de la vivienda. Las tablas con dichos registros se encuentran en el Anexo J, adjuntado al final del informe en soporte digital.

#### 4.1.2.1 Circuito Primario

Los registros relacionados con el circuito primario corresponden a temperaturas de entrada y salida de los intercambiadores de calor de los estanques, caudal acumulado y estado ON/OFF de bomba de circulación, válvula V1 y válvula V2. En la Figura 4.4 se presenta un gráfico con el registro de temperaturas del circuito.

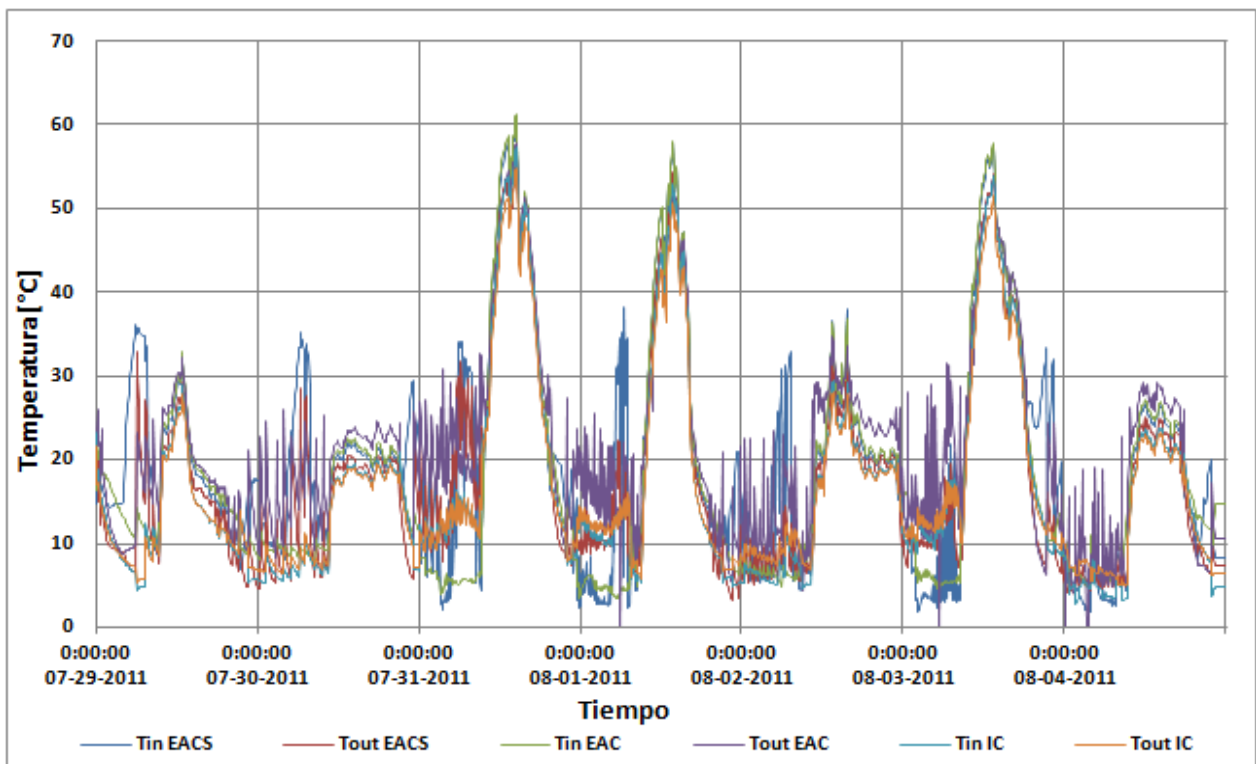


Figura 4.4: Variables de temperatura del Circuito Primario

donde:  $T_{in}$  EACS y  $T_{out}$  EACS corresponden a las temperaturas de entrada y salida del intercambiador del estanque ACS, respectivamente[°C]

$T_{in}$  EAC y  $T_{out}$  EAC corresponden a las temperaturas de entrada y salida, del intercambiador del estanque de calefacción respectivamente[°C]

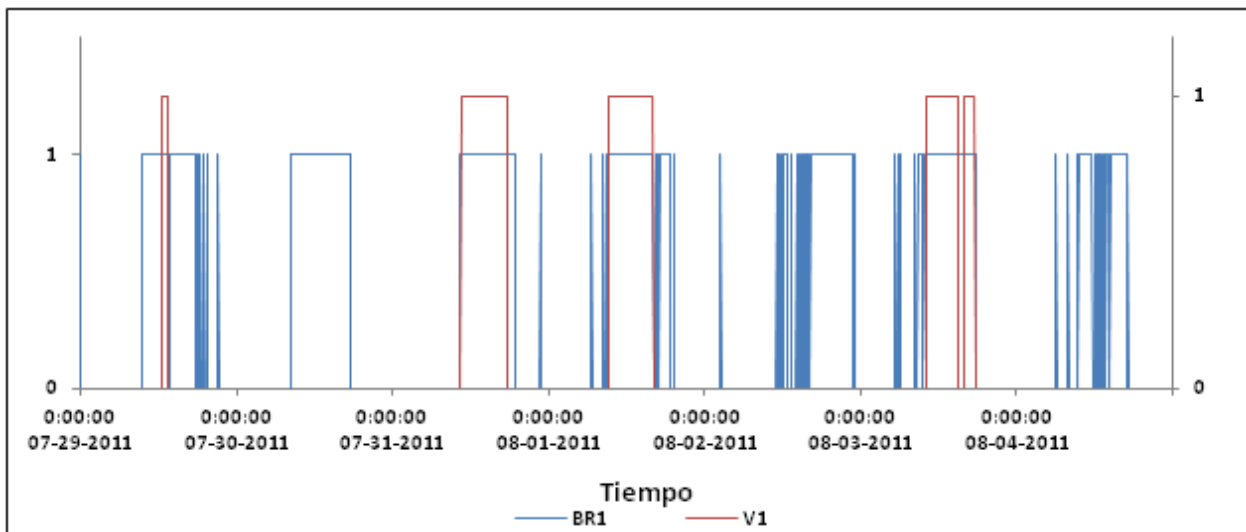
$T_{in}$  IC y  $T_{out}$  IC corresponden a las temperaturas de entrada y salida del intercambiador de Piscina/Jacuzzi, respectivamente [°C]

En la Tabla 4.2 se presentan resultados característicos de las variables graficadas en la Figura 4.4.

**Tabla 4.2: Detalle temperaturas Circuito Primario**

|                  | Temp. Intercambiador EACS [°C] | Temp. Intercambiador EAC [°C] | Temp Intercambiador Piscina/Jacuzzi [°C] |
|------------------|--------------------------------|-------------------------------|--|
| Entrada mínima   | 1,8                            | 3,36                          | 2,73                                     |
| Entrada máxima   | 60,54                          | 61,38                         | 57,39                                    |
| Entrada promedio | 20,31                          | 18,16                         | 16,65                                    |
| Salida mínima    | 3,22                           | 0                             | 4,95                                     |
| Salida máxima    | 55,16                          | 57,88                         | 54,76                                    |
| Salida promedio  | 17,76                          | 21,23                         | 16,66                                    |

En la Figura 4.5 se ilustran los estados de encendido/apagado de la bomba de recirculación perteneciente al circuito primario (BR1) y de la válvula que determina si el flujo va hacia los estanques de agua caliente sanitaria o hacia V2 (V1).

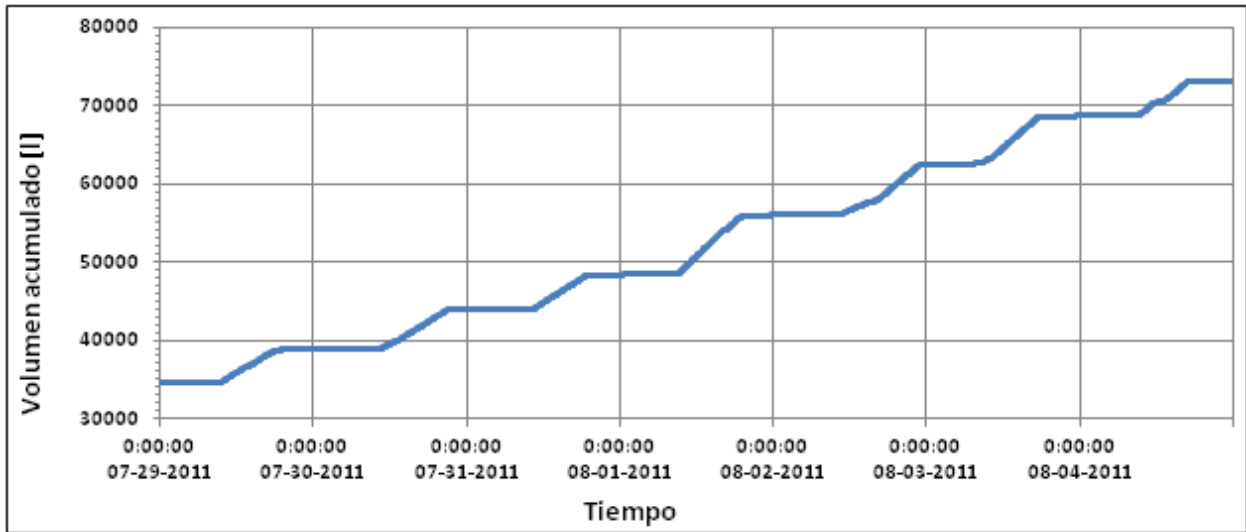


**Figura 4.5: Estado encendido/apagado de BR1 y V1**



Adicionalmente, con respecto al estado de funcionamiento de V2, válvula que dirige el aporte solar al intercambiador de piscina/jacuzzi o a los estanques de calefacción, fue siempre apagado, es decir, el flujo que no se dirige a los estanques de ACS pasa siempre por los estanques de calefacción antes de dirigirse al intercambiador de piscina/jacuzzi.

En la Figura 4.6 se muestra el registro de volumen de fluido en litros que circula por el circuito primario. Este registro corresponde al volumen acumulado obtenido del caudalímetro instalado en dicho circuito

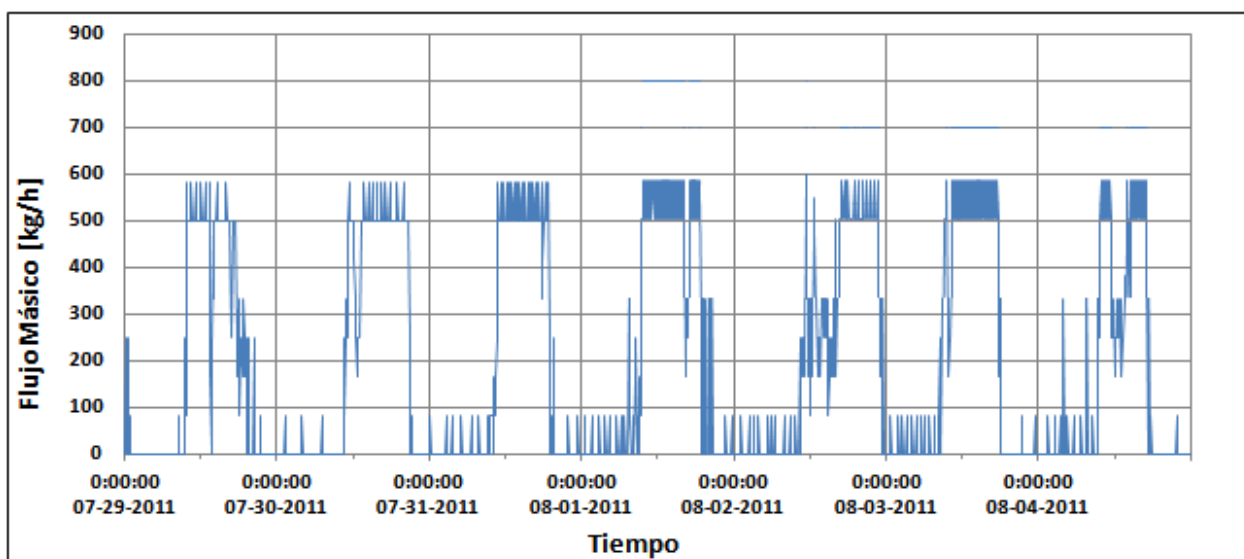


**Figura 4.6: Volumen de circulación acumulado del Circuito Primario**

Utilizando la información de encendido/apagado de BR1 y V1 se obtiene el volumen acumulado de fluido que circula por cada componente y el flujo másico desarrollado en el circuito. En la Tabla 4.3 y en la Figura 4.7 se resumen dichos resultados.

**Tabla 4.3: Detalle volumen acumulado Circuito Primario**

|  |       |
|--|-------|
| Intercambiador EACS [ $m^3$ ]            | 24,35 |
| Intercambiador EAC [ $m^3$ ]             | 14,24 |
| Intercambiador Piscina/Jacuzzi [ $m^3$ ] | 38,59 |



**Figura 4.7: Perfil flujo másico del Circuito Primario**

Con esta información, y mediante la utilización de las ecuaciones planteadas en los capítulos anteriores, se puede caracterizar el funcionamiento del circuito primario en función del aporte energético realizado a los distintos circuitos de la vivienda. En la Tabla 4.4 se presentan dichos resultados.

**Tabla 4.4: Resultados característicos del Circuito Primario**

| Componente                     | Energía Disponible Semanal [kWh] | Energía Aportada Semanal [kWh] | Energía Promedio Diaria [kWh] | Rendimiento |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Colectores Solares             | 467,39                           | 168,23                         | 24,03                         | 35,99%      |
| Estanque ACS                   | 83,77                            | 39,34                          | 5,62                          | 46,96%      |
| Estanque Calefacción           | 84,46                            | 40,28                          | 5,75                          | 47,69%      |
| Intercambiador Piscina/Jacuzzi | 88,61                            | 43,46                          | 6,21                          | 49,05%      |

Considerando los resultados anteriores y la energía total disponible se tiene que el SST instalado en la vivienda posee un rendimiento global de 26,33%.

#### 4.1.2.2 Circuito ACS

Los registros correspondientes al circuito de agua caliente sanitaria tienen relación con el uso de energía auxiliar para aumentar la temperatura del agua de consumo y con el volumen consumido. En las Figuras 4.8 y 4.9 se presentan el estado encendido/apagado de la resistencia eléctrica y el volumen de consumo acumulado, respectivamente.

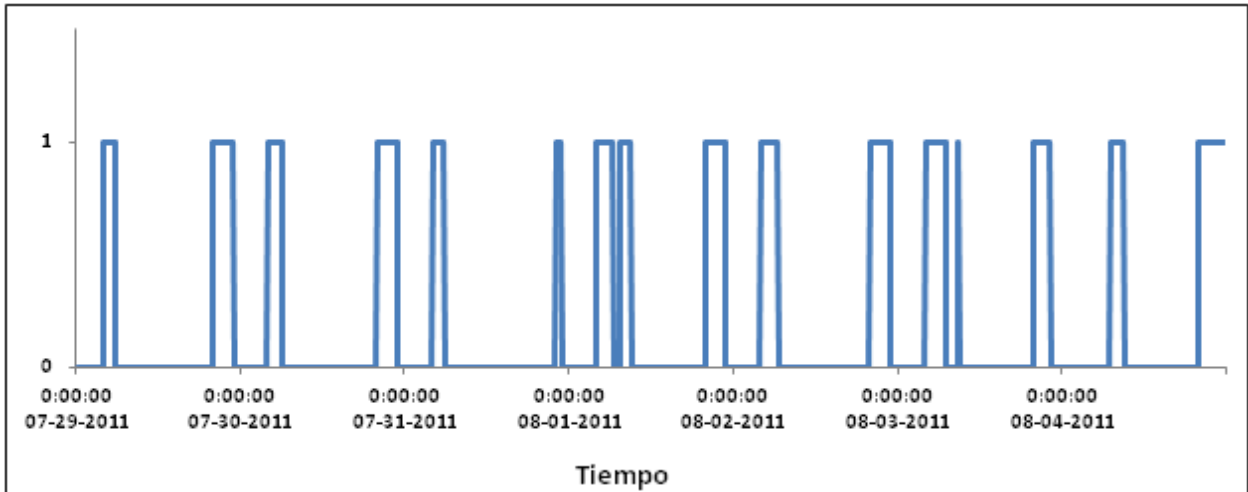


Figura 4.8: Estado encendido/apagado de Resistencia Eléctrica

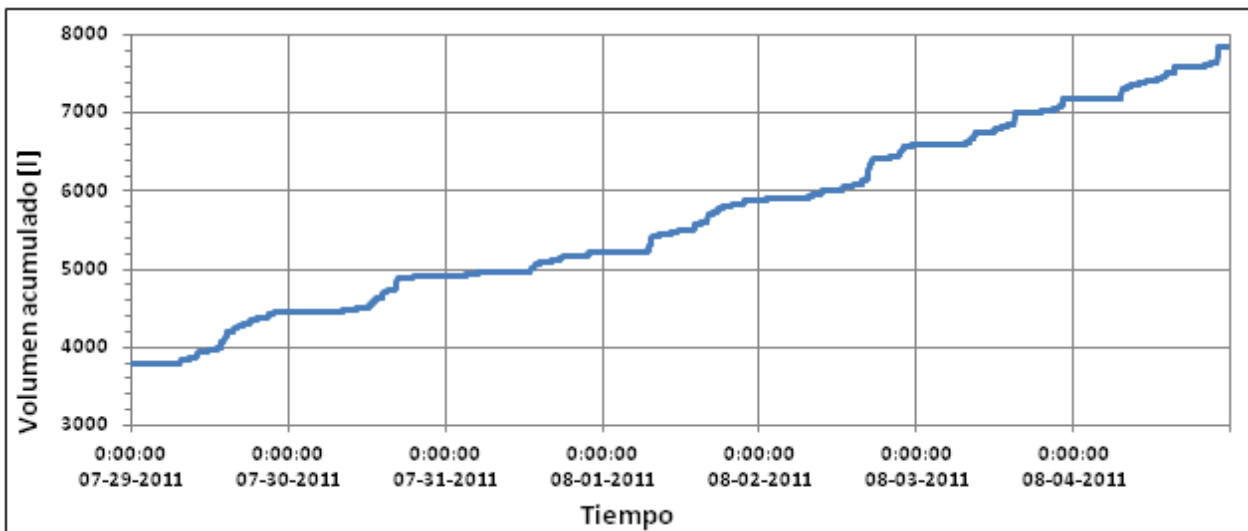
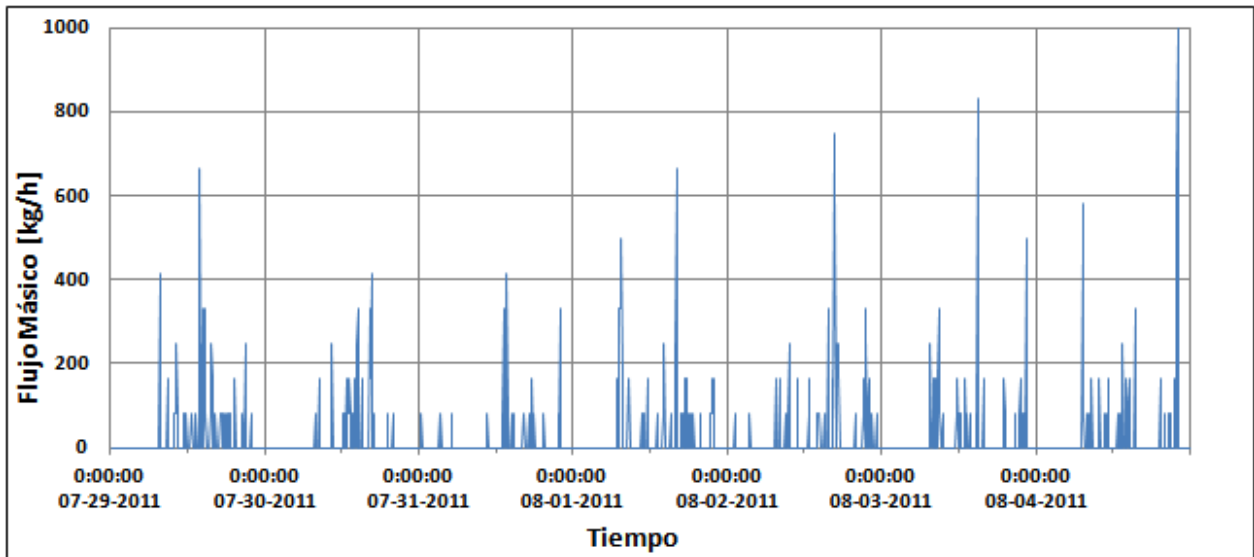


Figura 4.9: Volumen de consumo acumulado del Circuito ACS

En este contexto, y utilizando las ecuaciones relacionadas a cálculos energéticos, se presentan en la Tabla 4.3 los resultados que caracterizan el funcionamiento del Circuito de ACS. Además, en la Figura 4.10 se presenta un gráfico que identifica el perfil de consumo durante la semana de medición.

Tabla 4.5: Resultados característicos del Circuito ACS

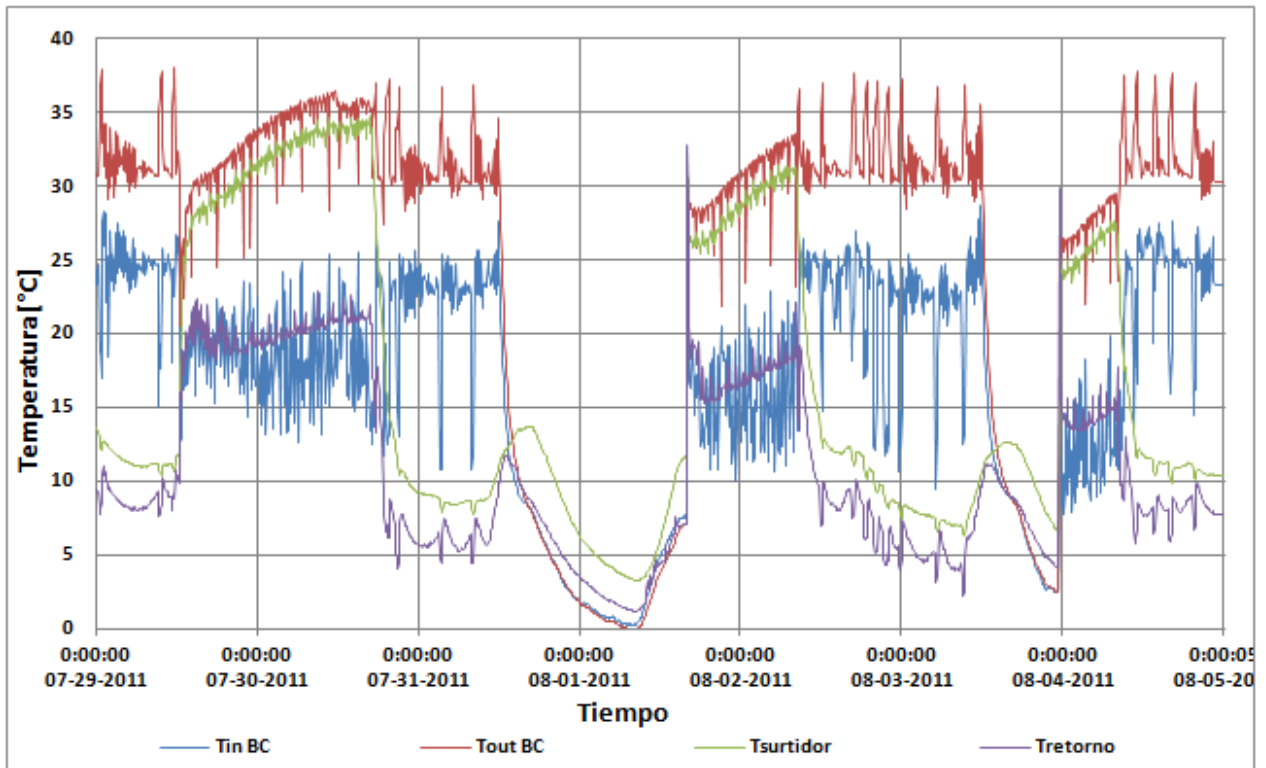
| Resistencia Eléctrica                     |       |
|---|-------|
| Energía Suministrada Semanal [kWh]        | 92,7  |
| Energía Promedio Diaria [kWh]             | 13,24 |
| Consumo ACS                               |       |
| Volumen Semanal [m <sup>3</sup> ]         | 4,06  |
| Volumen promedio diario [m <sup>3</sup> ] | 0,58  |



**Figura 4.10: Perfil flujo másico del Circuito ACS**

#### 4.1.2.3 Circuito Calefacción

Los registros correspondientes al circuito de calefacción corresponden a las temperaturas de operación de bomba de calor, temperaturas de entrada/salida de los serpentines de la losa radiante, estado de encendido/apagado de la bomba de calor y de su respectiva bomba de recirculación y, por último, al volumen acumulado de fluido que transcurre por la bomba de calor. En la Figura 4.11 se presenta un gráfico que muestra el comportamiento de las temperaturas a lo largo de la semana de registro y en la Tabla 4.6 se resumen resultados relevantes de dichas temperaturas.



**Figura 4.11: Variables de temperatura del Circuito de Calefacción**

donde: Tin BC es la temperatura de entrada a la bomba de calor[°C]  
 Tout BC es la temperatura a la salida de la bomba de calor[°C]  
 Tsurtidor es la temperatura de entrada al circuito de losa radiante [°C]  
 Tretorno es la temperatura de salida de la losa radiante [°C]

**Tabla 4.6: Detalle temperaturas en la Bomba de Calor**

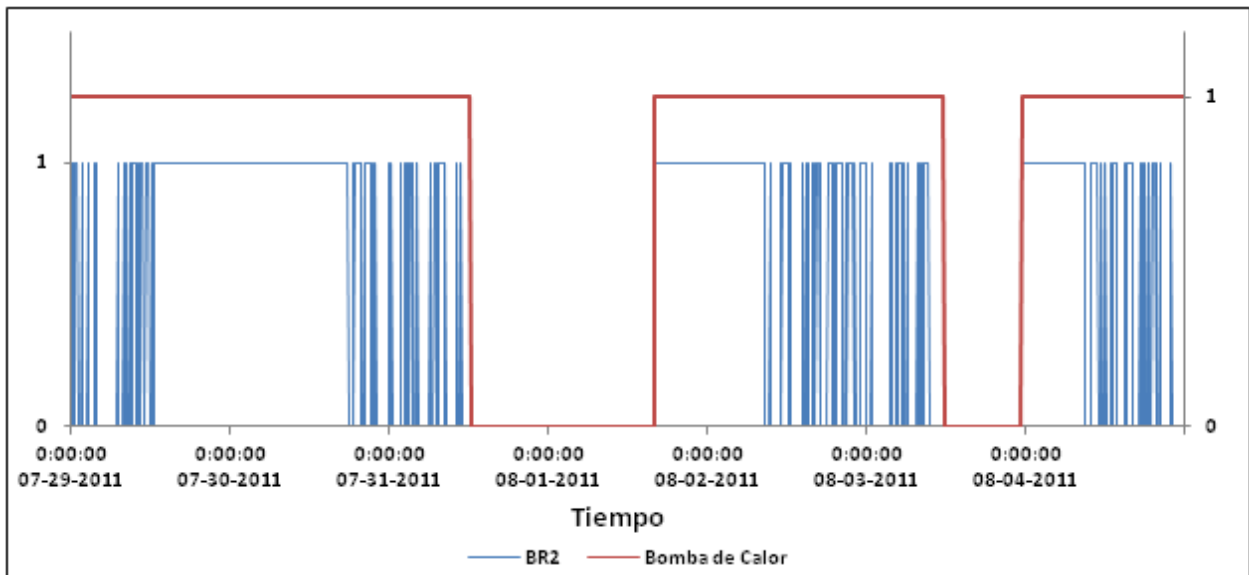
| Temperaturas Bomba de Calor [°C] |       |
|----------------------------------|-------|
| Entrada mínima                   | 0,18  |
| Entrada máxima                   | 28,71 |
| Entrada promedio                 | 16,75 |
| Salida mínima                    | 0     |
| Salida máxima                    | 38,05 |
| Salida promedio                  | 25,58 |

En la Tabla 4.7 se muestran los resultados representativos de las temperaturas de entrada y salida del sistema de losa radiante.

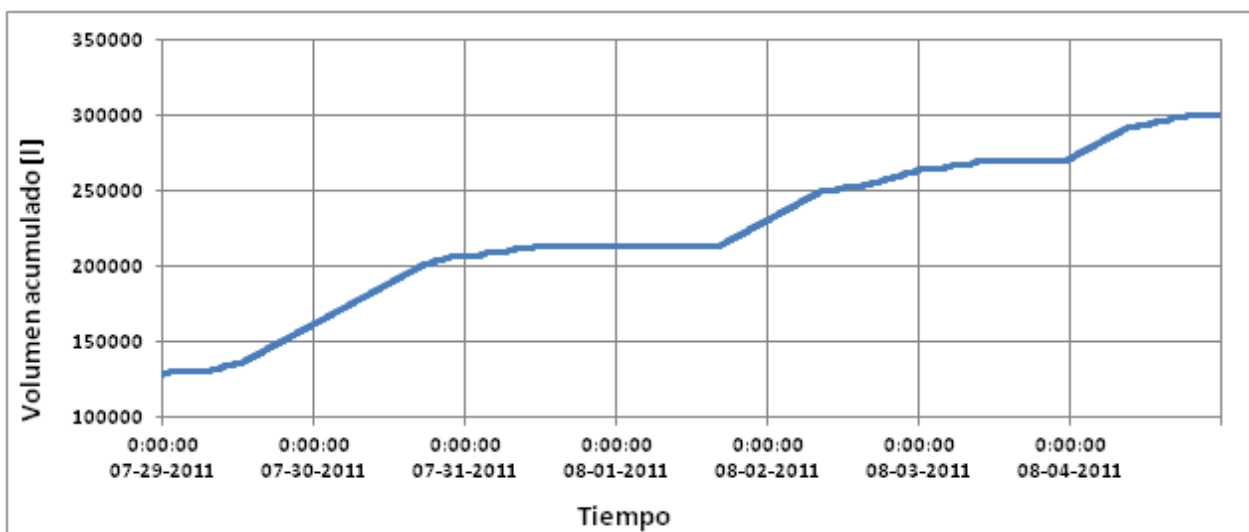
**Tabla 4.7: Detalle temperaturas de entrada/salida a Losa Radiante**

|          | Temperaturas Surtidor [°C] | Temperaturas Retorno [°C] |
|----------|----------------------------|---------------------------|
| Mínima   | 3,26                       | 1,14                      |
| Máxima   | 34,79                      | 32,78                     |
| Promedio | 16,53                      | 10,71                     |

En la Figura 4.12 se muestra el registro de encendido y apagado de la bomba de calor utilizada como sistema de calefacción auxiliar y de la bomba de recirculación que dirige el flujo a la bomba de calor. Adicionalmente, en la Figura 4.13 se observa el flujo que transcurre por dicha bomba.



**Figura 4.12: Estado encendido/apagado de BR2 y Bomba de Calor**



**Figura 4.13: Volumen de circulación acumulado del Circuito Calefacción**

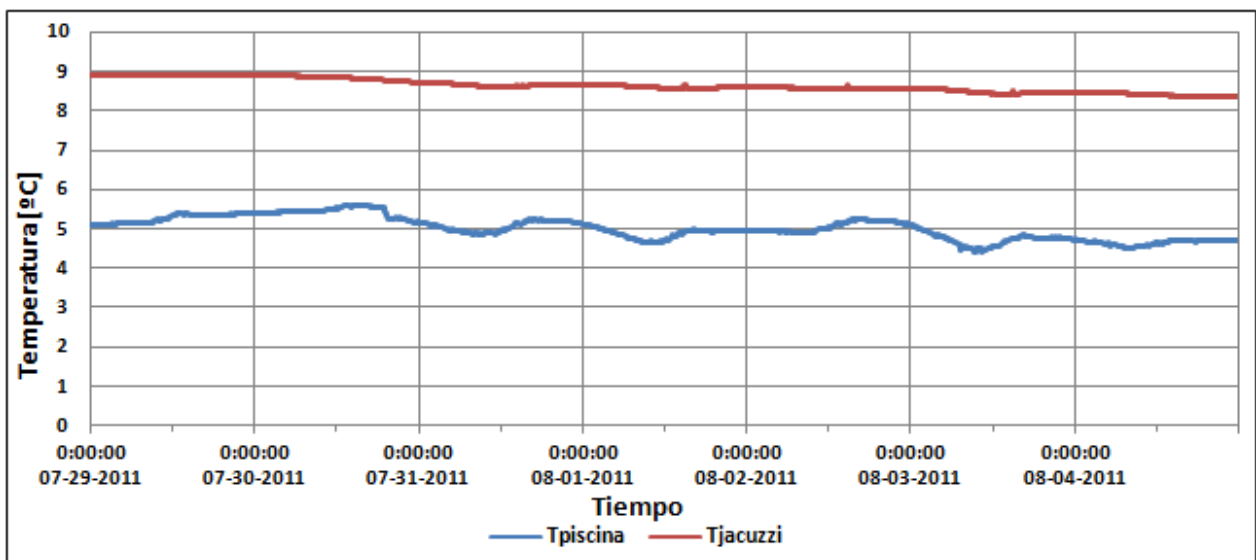
Con la información anteriormente descrita y utilizando las ecuaciones derivadas del primer principio de la termodinámica, se presentan en la Tabla 4.8 los resultados característicos del circuito de calefacción, que en este caso se resumen en las características de la Bomba de Calor.

**Tabla 4.8: Resultados característicos de la Bomba de Calor**

|   |        |
|---|--------|
| Energía Consumida semanal [kWh]         | 514,56 |
| Energía consumida promedio diaria [kWh] | 73,51  |
| Energía Aportada Semanal [kWh]          | 2815,5 |
| Energía aportada promedio diaria [kWh]  | 402,21 |

4.1.2.4 Circuito Piscina/Jacuzzi

En relación al circuito de piscina y jacuzzi la información que se entrega corresponde a las temperaturas del fluido que poseen ambos elementos. En la Figura 4.14 y en la Tabla 4.9 se presentan dichos resultados.



**Figura 4.14: Temperatura de Piscina y Jacuzzi**

**Tabla 4.9: Resultados característicos Circuito Piscina/Jacuzzi**

|          | Temperaturas Piscina [°C] | Temperaturas Jacuzzi [°C] |
|----------|---------------------------|---------------------------|
| Mínima   | 4,41                      | 8,34                      |
| Máxima   | 5,61                      | 8,91                      |
| Promedio | 5,02                      | 8,63                      |

4.1.2.5 Resumen de Resultados

En la presente sección se resumirán los principales resultados obtenidos con el objetivo de permitir una visualización más sencilla de éstos. En la Tabla 4.10 se presenta un resumen con las energías aportadas a cada circuito de la vivienda entre los días 29 de Julio y 4 de Agosto.

**Tabla 4.10: Resumen de resultados**

| Día  | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | Total Semana  |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| <b>Colectores Solares</b>                      |        |        |        |        |        |        |        |               |
| Energía Disponible [kWh/día]                   | 11,60  | 6,44   | 142,35 | 123,2  | 28,49  | 143,93 | 11,37  | <b>467,39</b> |
| Energía Aportada [kWh/día]                     | 9,23   | 2,40   | 43,94  | 42,13  | 21,58  | 33,71  | 15,24  | <b>168,23</b> |
| <b>Estanque Agua Caliente Sanitaria</b>        |        |        |        |        |        |        |        |               |
| Energía Aportada [kWh/día]                     | 3,40   | 1,61   | 10,56  | 2,77   | 9,81   | 4,73   | 6,46   | <b>39,34</b>  |
| Energía Auxiliar [kWh/día]                     | 12     | 12,9   | 6,9    | 17,7   | 13,8   | 14,1   | 15,3   | <b>92,7</b>   |
| <b>Estanque Calefacción</b>                    |        |        |        |        |        |        |        |               |
| Energía Aportada [kWh/día]                     | 0,12   | 0      | 8,2    | 20,32  | 0      | 11,64  | 0      | <b>40,28</b>  |
| Energía Auxiliar [kWh/día]                     | 439,26 | 870,35 | 88     | 270,24 | 573,34 | 113,89 | 460,42 | <b>2815,5</b> |
| <b>Intercambiador de Calor Piscina/Jacuzzi</b> |        |        |        |        |        |        |        |               |
| Energía Aportada [kWh/día]                     | 1,95   | 0,43   | 12,05  | 10,62  | 3,70   | 12,01  | 2,70   | <b>43,46</b>  |

De la Tabla 4.10 se puede obtener que la energía real aportada por el sistema solar a los sistemas de agua caliente, calefacción y piscina/jacuzzi corresponde a 123,08[kWh] durante la semana de medición. Para ver de qué manera este aporte se traduce en emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas, se deben considerar dos situaciones basadas en el origen de la energía eléctrica que utiliza la vivienda:

- Sin considerar uso de electricidad: No se utiliza el aporte de los sistemas auxiliares para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas, por lo tanto, se considera únicamente el aporte solar.
- Considerando uso de electricidad: Si se considera en el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas el aporte energético de los sistemas auxiliares.

Las situaciones anteriores se deben básicamente a que de esta forma se puede caracterizar el sistema solar de manera individual y, también, a que no se conoce el origen de generación de la



energía utilizada en la vivienda. Sin embargo, es necesario destacar que el uso de energía eléctrica como sistema auxiliar ya considera una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> al no tener elementos de combustión como apoyo energético. De esta forma, el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas se realizará en base al uso de Gas Natural como fuente de energía suplementaria. En la Tabla 4.11 se entregan valores de CO<sub>2</sub> emitidos por unidad de energía generada, considerando el uso de tres tipos de combustibles. Dicha información se obtiene considerando el poder calorífica inferior (PCI) de los combustibles. [28]

**Tabla 4.11: Emisiones de CO<sub>2</sub>**

| Combustible        | Gramos de CO <sub>2</sub> emitidos [ $\frac{g}{kWh}$ ] |
|--------------------|--|
| Gas Natural        | 205  |
| Gas Licuado        | 230  |
| Kerosene doméstico | 270  |

En base a la información anterior se elaboran las Tablas 4.12 y 4.13, donde se muestran las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas sin considerar el uso de electricidad, en un primer caso, y considerándolo, en un segundo caso.

**Tabla 4.12: Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas sin considerar sistemas auxiliares**

|                                | Energía Aportada Semanal [kWh] | Emisión de CO <sub>2</sub> evitada [kg] |
|--------------------------------|--------------------------------|---|
| Estanque ACS                   | 39,34                          | 8,06                                    |
| Estanque Calefacción           | 40,28                          | 8,26                                    |
| Intercambiador Piscina/Jacuzzi | 43,46                          | 8,91                                    |
| <b>Total Semanal</b>           | <b>123,08</b>                  | <b>25,23</b>                            |

**Tabla 4.13: Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas considerando sistemas auxiliares**

|                                | Energía Aportada Semanal [kWh] | Emisión de CO <sub>2</sub> evitada [kg] |
|--------------------------------|--------------------------------|---|
| Estanque ACS                   | 39,34                          | 8,06                                    |
| Estanque Calefacción           | 40,28                          | 8,26                                    |
| Intercambiador Piscina/Jacuzzi | 43,46                          | 8,91                                    |
| Resistencia Eléctrica          | 92,7                           | 19                                      |
| Bomba de Calor                 | 2815,5                         | 577,18                                  |
| <b>Total Semanal</b>           | <b>3031,28</b>                 | <b>621,41</b>                           |

Al observar las Tablas 4.12 y 4.13 se puede apreciar la gran diferencia en las emisiones evitadas al considerar el aporte energético de los sistemas auxiliares dentro del cálculo, siendo importante volver a destacar que éste no considera el origen de generación de la energía eléctrica

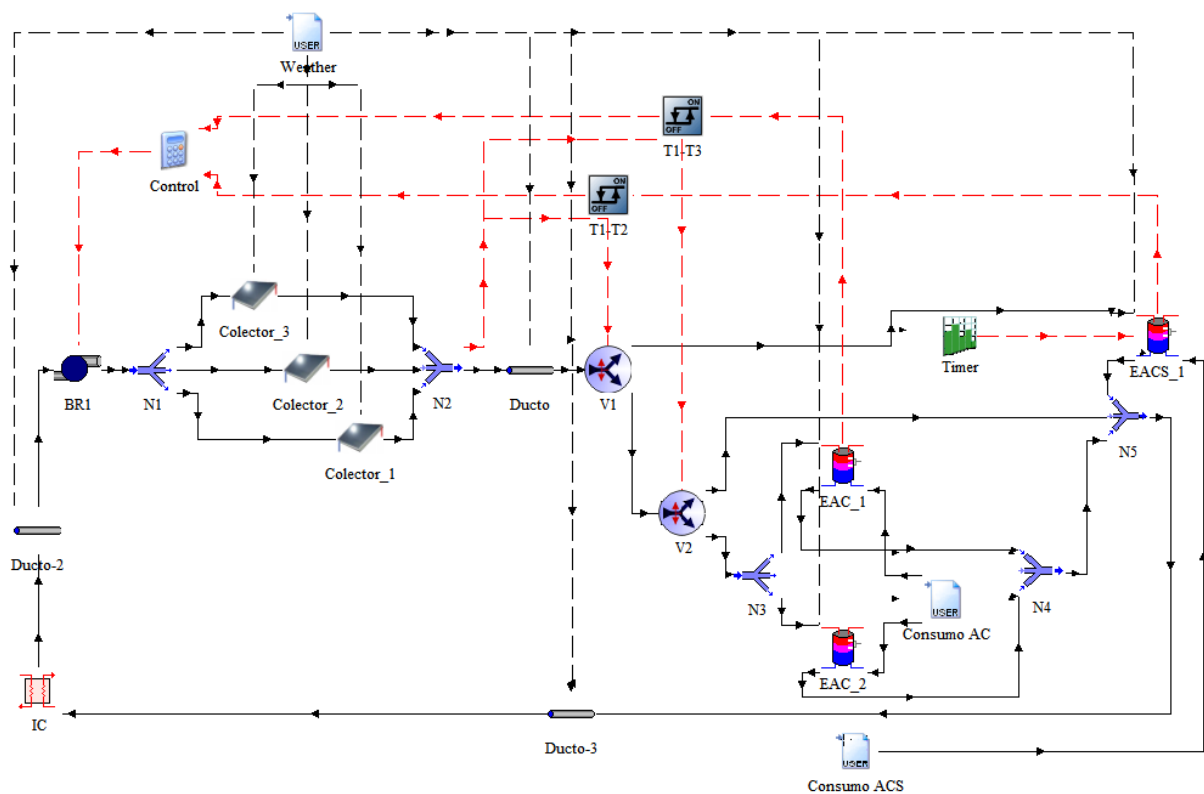
utilizada en la vivienda. Así, los resultados mostrados en la Tabla 4.13 no incluyen las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en el proceso de generación de la energía eléctrica.

## 4.2 Validación del Modelo

En la presente sección se entregan los resultados obtenidos durante la validación del modelo, en los cuales se justifica que el modelo computacional se ajusta al funcionamiento del sistema solar instalado en la vivienda. Para exponer esta justificación, se presenta el modelo confeccionado y luego se analizan los resultados de éste bajo las mismas condiciones climatológicas de los registros realizados a los componentes de la vivienda.

### 4.2.1 Modelo Computacional

En la Figura 4.15 se presenta el modelo confeccionado para simular el SST, observándose la inclusión de todos los componentes que definen el Circuito Primario.



**Figura 4.15: Modelo computacional del SST**

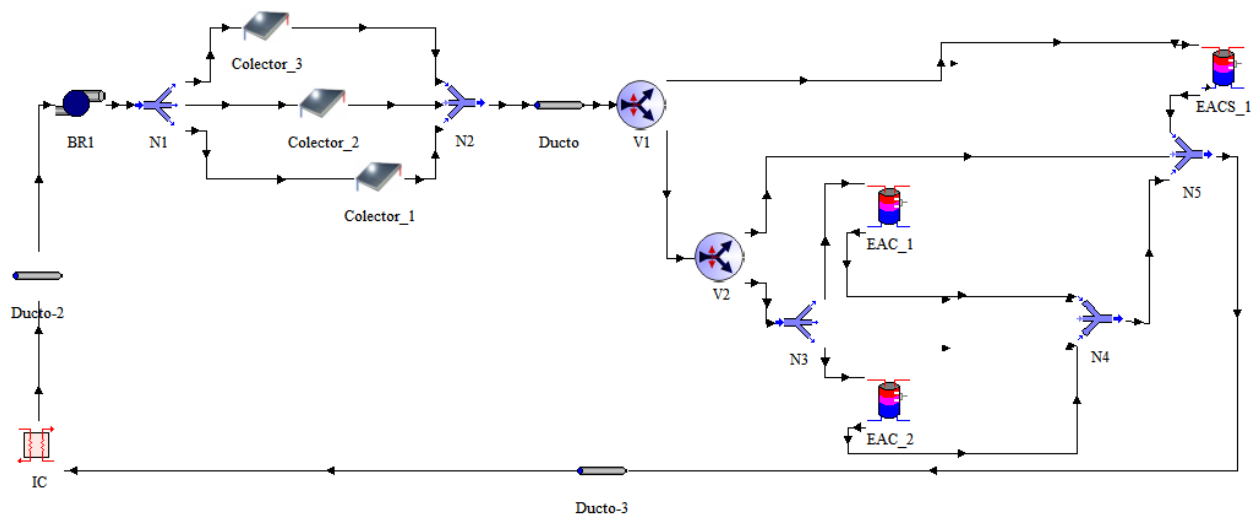
- donde:
- IC es el intercambiador de calor Piscina/Jacuzzi
  - N1, N2, N3, N4 y N5 son los nodos del sistema de tuberías
  - BR1 es la bomba de recirculación del Circuito Primario
  - EACS\_1 es el estanque de agua caliente sanitaria

EAC\_1 y EAC\_2 son los estanques de agua de calefacción

V1 es la válvula que dirige el flujo a EACS o hacia EAC

V2 es la válvula que dirige el flujo a EAC o hacia HX

Es importante destacar que las líneas punteadas de color rojo representan la lógica de control del sistema y las líneas punteadas de color negro representan la información del clima. Con el objetivo de mostrar una representación más clara de los componentes que incluye el modelo en la Figura 4.16 se presenta el conjunto de equipos que forman el SST de la vivienda, sin incluir los lazos de control y de clima.



**Figura 4.16: Detalle modelo del SST**

En la Figura 4.16 se observa claramente la confección del Circuito Primario del sistema, destacando la presencia de los puntos en común con los otros circuitos de la vivienda. En este contexto, es relevante recordar que EACS\_1 es el punto en común con el Circuito ACS, EAC\_1 y EAC\_2 son los puntos en común con el Circuito de Calefacción y HX es el punto en común con el Circuito Piscina/Jacuzzi. De esta forma un análisis energético sobre los elementos de transferencia de calor de dichos puntos llevará a caracterizar el aporte solar a los distintos sistemas de la vivienda.

#### 4.2.2 Comparación de Variables

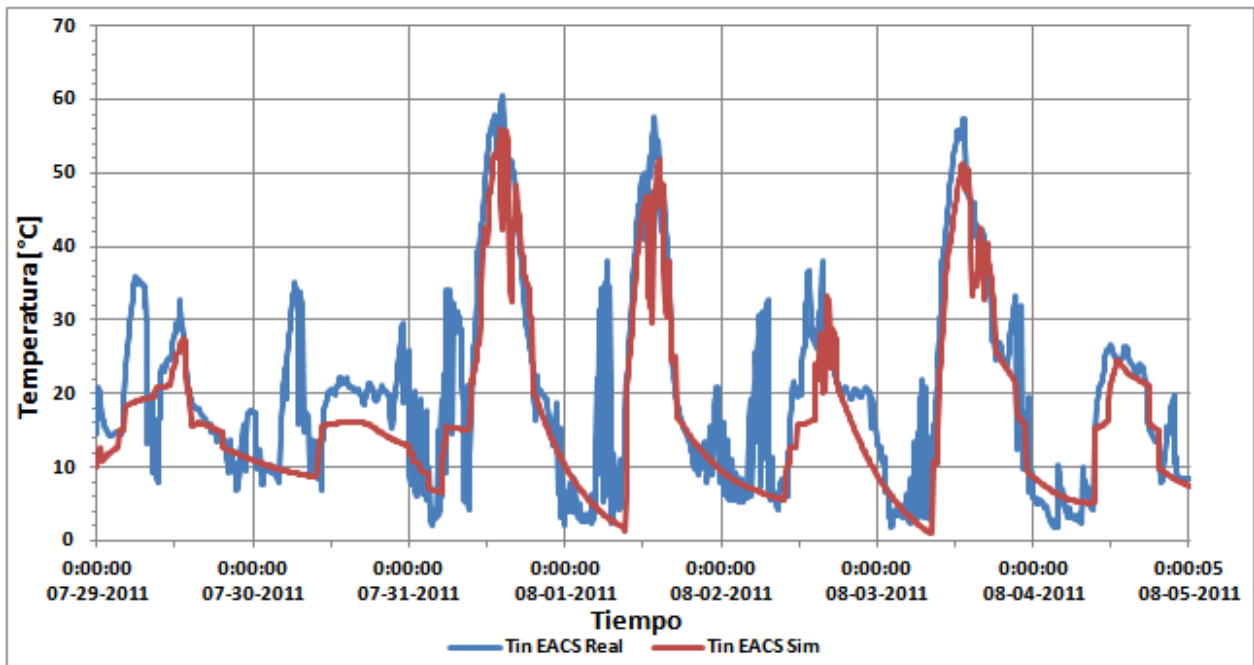
Para validar el modelo se comparan las variables registradas con las variables simuladas. En este contexto las variables registradas que pertenecen al Circuito Primario corresponden a:

- Temperatura entrada y salida intercambiador de estanques de acumulación (agua caliente sanitaria y calefacción)
- Temperatura de entrada y salida del intercambiador de piscina/jacuzzi
- Estado encendido/apagado de BR1, V1 y V2

A continuación se muestran los resultados de la comparación de variables entre los registros de la vivienda y los resultados de la simulación. En el Anexo K, adjuntado al final del informe en formato digital, se presentan las tablas con los resultados de la simulación.

#### 4.2.2.1 Temperatura de entrada intercambiador EACS

En la Figura 4.17 se presenta un gráfico que permite comparar la temperatura de entrada del intercambiador del estanque de ACS registrada en la vivienda con la misma temperatura obtenida producto de la simulación computacional.

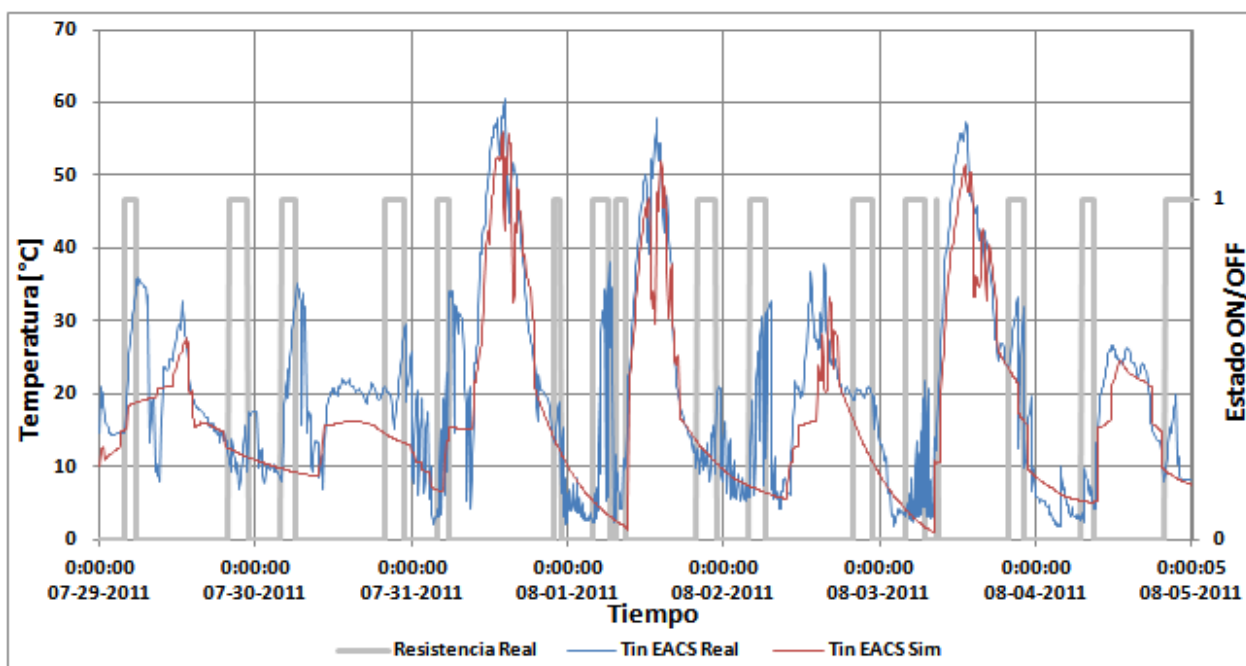


**Figura 4.17: Comparación temperatura de entrada intercambiador de EACS**

donde: Tin EACS Real es la temperatura registrada a la entrada del intercambiador de EACS

Tin EACS Sim es la temperatura simulada a la entrada del intercambiador del EACS

En la Figura 4.17 se pone de manifiesto que la variable simulada sigue el mismo comportamiento de la variable real, existiendo diferencias que se concentran principalmente al comienzo y final de cada día. En la Figura 4.18 se observa cómo se relacionan estas diferencias con la entrada en funcionamiento de la resistencia eléctrica ubicada al interior del estanque. Este efecto se traduce en que al entrar en funcionamiento este equipo se incrementa la temperatura de los alrededores, incidiendo en que el sensor relacionado a la temperatura de entrada del intercambiador de EACS comience a medir una mayor temperatura. Este comportamiento en el sistema real no es recreado por el modelo computacional, razón por la cual se producen dichas diferencias.



**Figura 4.18: Influencia resistencia eléctrica en temperatura de entrada de EACS**

En la Tabla 4.14 se resumen los principales resultados del análisis realizado a la temperatura de entrada del intercambiador de calor presente en el estanque de agua caliente sanitaria, tanto en su variable real como en la simulada. Adicionalmente, se presenta un sencillo análisis del error relativo para verificar el ajuste del modelo con los datos reales.

**Tabla 4.14: Resumen resultados temperatura entrada intercambiador de EACS**

| Día         | Tprom. Real  | Tprom. Sim   | Tmax. Real   | Tmax. Sim    | Tmin. Real  | Tmin. Sim   | error Tprom. | error Tmax. | error Tmin. |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 1           | 19,26        | 16,58        | 36,07        | 27,61        | 6,86        | 10,00       | 0,14         | 0,23        | 0,46        |
| 2           | 19,02        | 12,81        | 35,10        | 16,16        | 6,85        | 8,72        | 0,33         | 0,54        | 0,27        |
| 3           | 26,87        | 23,76        | 60,54        | 56,10        | 2,14        | 6,60        | 0,12         | 0,07        | 2,08        |
| 4           | 21,30        | 17,54        | 57,75        | 51,87        | 2,35        | 1,42        | 0,18         | 0,10        | 0,40        |
| 5           | 18,15        | 13,06        | 37,97        | 33,28        | 4,24        | 5,61        | 0,28         | 0,12        | 0,32        |
| 6           | 24,45        | 20,95        | 57,40        | 51,37        | 1,90        | 0,94        | 0,14         | 0,11        | 0,51        |
| 7           | 13,13        | 12,32        | 26,63        | 24,52        | 1,80        | 5,14        | 0,06         | 0,08        | 1,85        |
| <b>Prom</b> | <b>20,31</b> | <b>16,72</b> | <b>44,49</b> | <b>37,27</b> | <b>3,74</b> | <b>5,49</b> | <b>0,18</b>  | <b>0,18</b> | <b>0,84</b> |

La información presente en la Tabla 4.14 incluye todos los datos registrados y simulados para la variable en cuestión. Si se eliminan los valores relacionados con el efecto de la resistencia eléctrica los es en cada uno de los resultados mencionados se reducen considerablemente. En la Tabla 4.15 se puede apreciar el efecto de eliminar los datos relacionados a la resistencia eléctrica.

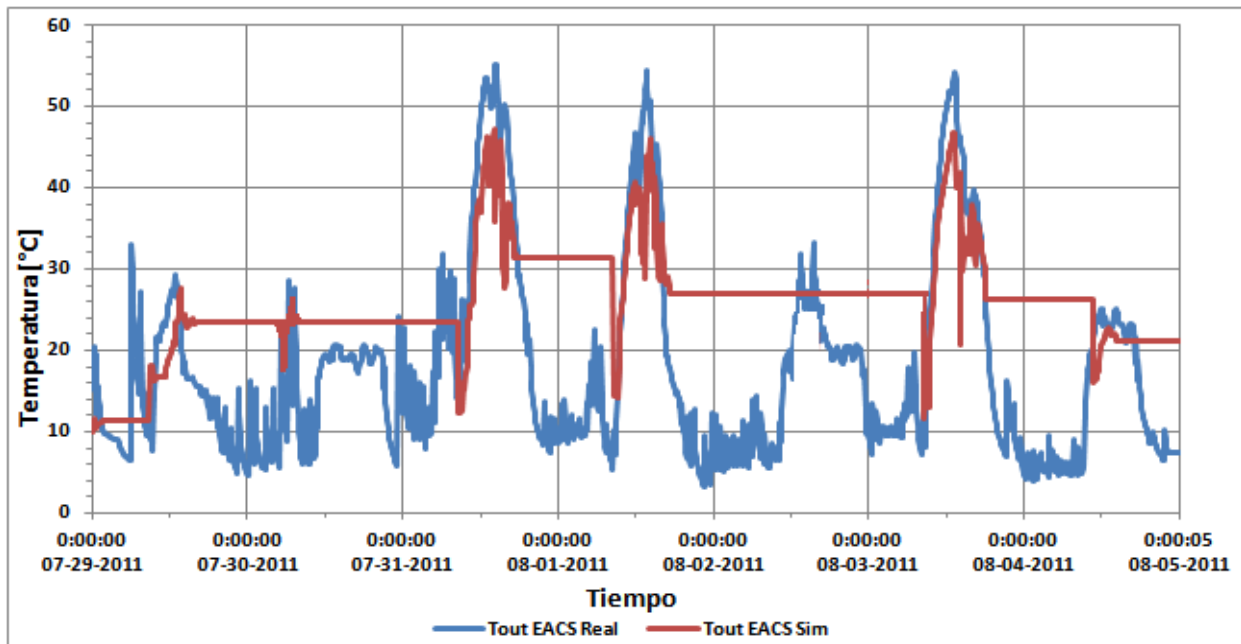
**Tabla 4.15: Efecto de eliminar datos relacionados a resistencia eléctrica**

| Día         | Tprom. Real  | Tprom. Sim   | Tmax. Real   | Tmax. Sim    | Tmin. Real  | Tmin. Sim    | eror Tprom. | error Tmax. | error Tmin. |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 1           | 18,87        | 17,70        | 32,67        | 27,12        | 11,08       | 10,00        | 0,06        | 0,17        | 0,10        |
| 2           | 17,12        | 16,20        | 25,80        | 17,93        | 6,85        | 12,92        | 0,05        | 0,31        | 0,89        |
| 3           | 33,00        | 32,57        | 60,54        | 52,10        | 2,14        | 11,83        | 0,01        | 0,14        | 4,52        |
| 4           | 25,70        | 24,89        | 57,75        | 51,87        | 2,49        | 15,23        | 0,03        | 0,10        | 5,11        |
| 5           | 19,33        | 19,01        | 37,97        | 33,28        | 5,28        | 7,35         | 0,02        | 0,12        | 0,39        |
| 6           | 30,92        | 31,47        | 57,40        | 51,37        | 1,90        | 8,67         | 0,02        | 0,11        | 3,57        |
| 7           | 16,47        | 15,89        | 26,63        | 24,52        | 1,80        | 6,21         | 0,04        | 0,08        | 2,44        |
| <b>Prom</b> | <b>23,06</b> | <b>22,53</b> | <b>42,68</b> | <b>36,88</b> | <b>4,51</b> | <b>10,32</b> | <b>0,03</b> | <b>0,15</b> | <b>2,43</b> |

Al analizar los errores relativos relacionados con la temperatura promedio se puede observar una disminución del error desde un 18% a un 3%, lo que permite verificar la validez en la representación de esta variable. Para el caso de la temperatura máxima el error disminuye desde un 18% a un 15%, variación que se explica por la mantención de las temperaturas máximas en 5 de los 7 días. Para el caso de la temperatura mínima se puede apreciar un aumento del error relativo, lo que se debe a la eliminación de datos relacionados a los períodos de menor temperatura.

4.2.2.2 Temperatura de salida intercambiador EACS

En la Figura 4.19 se compara la temperatura de salida del intercambiador del EACS obtenida del registro y de la simulación.

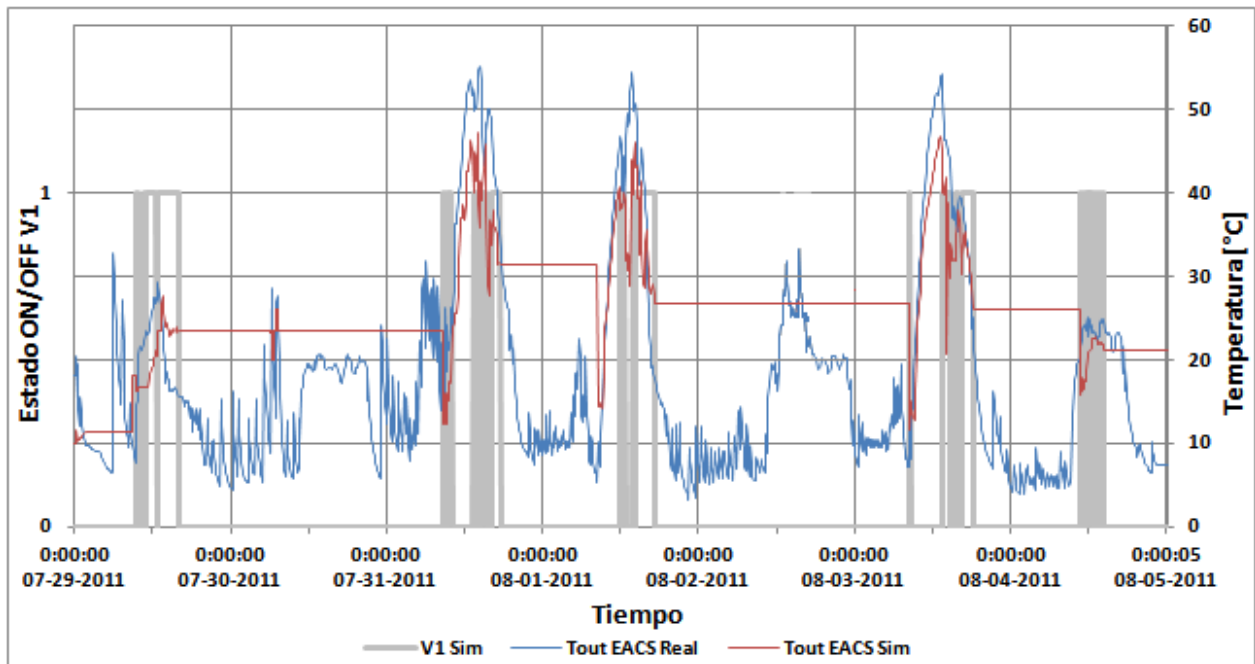


**Figura 4.19: Comparación temperatura de salida intercambiador de EACS**

donde: Tout EACS Real es la temperatura registrada a la salida del intercambiador de EACS

Tout EACS Sim es la temperatura simulada a la salida del intercambiador del EACS

En la Figura 4.19 se observan períodos en los que la variable simulada no sigue el comportamiento de la variable real, manteniéndose constante durante dichos intervalos. Este comportamiento se debe a la detención del flujo que transcurre por el intercambiador de EACS debido al accionamiento de la bomba BR1 y al estado de la válvula V1. En la Figura 4.20 se aprecia el comportamiento de esta variable con respecto al estado de V1.



**Figura 4.20: Influencia de la falta de flujo en temperatura de entrada de EACS**

Se puede observar que la simulación de la temperatura se detiene cuando deja de circular el flujo por el intercambiador de EACS ( $V1=0$ ), lo que TRNSYS traduce como un efecto de estancamiento de la temperatura. Si no se considera este efecto la variable simulada representa con un error cercano al 7% a la variable real. En la Tabla 4.16 se presentan dichos resultados.

**Tabla 4.16: Efecto de eliminar datos relacionados a falta de flujo por EACS**

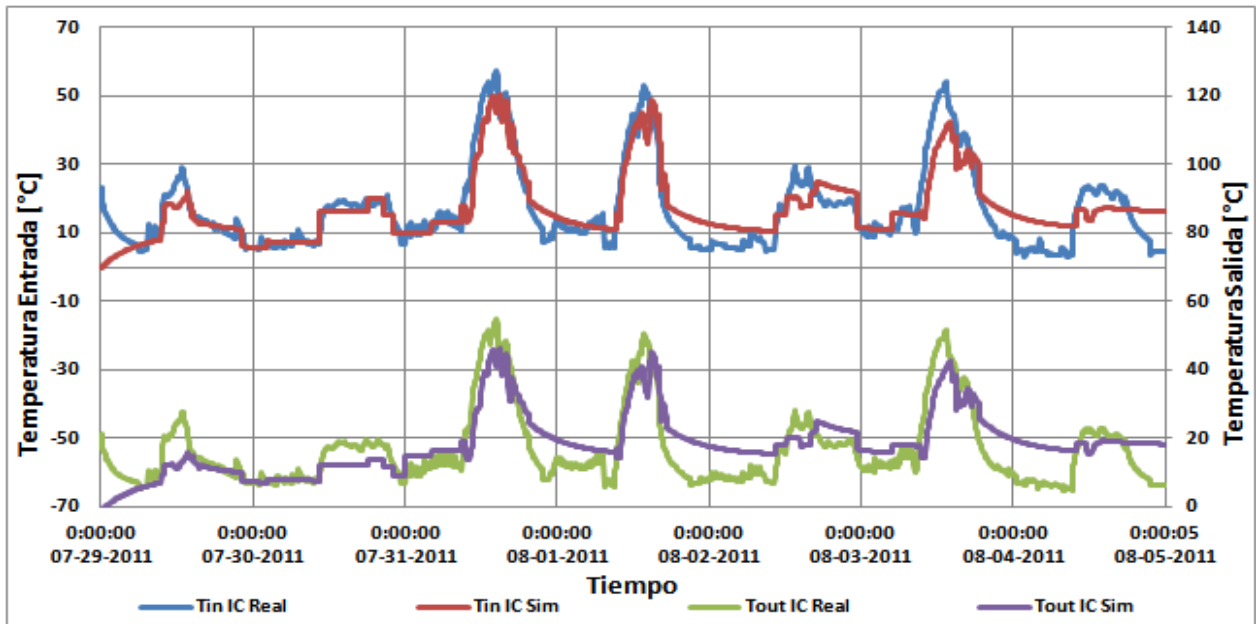
| Día         | Tprom. Real  | Tprom. Sim   | Tmax. Real   | Tmax. Sim    | Tmin. Real   | Tmin. Sim    | eror Tprom. | error Tmax. | error Tmin. |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 1           | 16,35        | 13,50        | 29,33        | 20,77        | 9,70         | 10,07        | 0,17        | 0,29        | 0,04        |
| 2           | 18,52        | 20,01        | 25,34        | 22,4         | 6,2          | 16,46        | 0,08        | 0,12        | 0,26        |
| 3           | 44,55        | 42,55        | 55,16        | 55,22        | 14,85        | 16,12        | 0,04        | 0,00        | 0,09        |
| 4           | 34,65        | 32,25        | 54,51        | 51,11        | 7,29         | 14,18        | 0,07        | 0,06        | 0,94        |
| 5           | 20,18        | 26,53        | 33,06        | 26,53        | 5,35         | 26,53        | 0,31        | 0,2         | 0,8         |
| 6           | 39,06        | 38,56        | 54,13        | 51,80        | 8,10         | 17,91        | 0,01        | 0,04        | 1,21        |
| 7           | 23,54        | 23,59        | 24,17        | 23,81        | 22,38        | 23,42        | 0,00        | 0,01        | 0,05        |
| <b>Prom</b> | <b>31,01</b> | <b>29,21</b> | <b>41,75</b> | <b>39,11</b> | <b>12,48</b> | <b>14,82</b> | <b>0,1</b>  | <b>0,1</b>  | <b>0,48</b> |

Con respecto a lo anterior, es importante mencionar que la depuración de información, relacionada con la falta de flujo en el serpentín de EACS, afecta mayormente a los días 1, 3, 4 y 6, días en los cuales la válvula V1 se encuentra encendida (Ver Figura 4.5). Esto provoca que el flujo que entrega BR1 se desvíe hacia los estanques de acumulación de agua de calefacción durante dichos días, efecto que la simulación establece de forma instantánea y manteniendo la temperatura constante. Sin embargo, cuando se vuelve a reactivar el flujo en el serpentín de EACS, la temperatura se acomoda rápidamente a las condiciones reales de la simulación, observándose descensos abruptos de la temperatura.

#### 4.2.2.3 Temperatura entrada y salida intercambiador Piscina/Jacuzzi

En la Figura 4.21 se presenta un gráfico con los resultados de la temperatura de entrada y salida del intercambiador de calor entre el circuito primario y el circuito de piscina y jacuzzi.





**Figura 4.21: Comparación temperatura de entrada/salida del intercambiador Piscina/Jacuzzi**

donde: Tin IC Real es la temperatura registrada a la entrada del IC

Tin IC Sim es la temperatura simulada a la entrada del IC

Tout IC Real es la temperatura registrada a la salida de IC

Tout IC Sim es la temperatura simulada a la salida de IC

Como se aprecia en la Figura 4.21, y al igual que en los casos anteriores, la simulación presenta períodos en los cuales la representación no es fiel al registro de datos, existiendo una caída paulatina de la temperatura representada en la simulación. Estos períodos son influidos por la falta de circulación del fluido en el circuito primario durante el transcurso de la simulación, situación que no es representada correctamente por el software TRNSYS. Al eliminar dichos períodos, que corresponden principalmente al final de los días 3,4 y 6, los resultados son bastante acertados, presentando errores entre 4% y 5% para la temperatura promedio. Estos resultados se muestran en las Tablas 4.17 y 4.18.

**Tabla 4.17: Comparación temperatura de entrada de IC**

| Día         | Tprom. Real  | Tprom. Sim   | Tmax. Real   | Tmax. Sim    | Tmin. Real   | Tmin. Sim    | error Tprom. | error Tmax. | error Tmin. |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 1           | 19,49        | 18,96        | 28,95        | 26,76        | 10,30        | 0,00         | 0,04         | 0,11        | 1,00        |
| 2           | 18,10        | 18,65        | 26,45        | 25,67        | 8,09         | 6,21         | 0,03         | 0,11        | 0,23        |
| 3           | 41,26        | 38,84        | 57,39        | 55,46        | 10,40        | 12,94        | 0,06         | 0,03        | 0,24        |
| 4           | 33,89        | 33,00        | 53,00        | 49,03        | 5,37         | 10,79        | 0,03         | 0,07        | 1,01        |
| 5           | 25,19        | 26,74        | 29,36        | 26,87        | 21,83        | 17,69        | 0,06         | 0,08        | 0,19        |
| 6           | 37,95        | 36,53        | 54,00        | 52,89        | 9,87         | 14,06        | 0,04         | 0,02        | 0,43        |
| 7           | 22,81        | 23,65        | 23,82        | 20,32        | 21,34        | 13,47        | 0,04         | 0,15        | 0,37        |
| <b>Prom</b> | <b>30,10</b> | <b>29,57</b> | <b>41,09</b> | <b>38,37</b> | <b>13,19</b> | <b>11,49</b> | <b>0,04</b>  | <b>0,08</b> | <b>0,5</b>  |

**Tabla 4.18: Comparación temperatura de salida de IC**

| Día         | Tprom. Real  | Tprom. Sim   | Tmax. Real   | Tmax. Sim    | Tmin. Real   | Tmin. Sim    | error Tprom. | error Tmax. | error Tmin. |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| 1           | 18,92        | 17,66        | 27,77        | 24,49        | 9,58         | 0,00         | 0,07         | 0,12        | 1,00        |
| 2           | 17,58        | 15,66        | 20,33        | 16,56        | 8,24         | 6,13         | 0,00         | 0,12        | 0,26        |
| 3           | 39,42        | 35,98        | 54,76        | 52,83        | 10,57        | 13,67        | 0,09         | 0,04        | 0,29        |
| 4           | 32,52        | 31,34        | 50,52        | 46,56        | 5,60         | 14,41        | 0,04         | 0,08        | 1,57        |
| 5           | 24,20        | 23,54        | 27,70        | 25,20        | 21,17        | 17,69        | 0,03         | 0,09        | 0,16        |
| 6           | 36,33        | 34,97        | 51,49        | 50,38        | 9,81         | 14,06        | 0,04         | 0,02        | 0,43        |
| 7           | 22,09        | 20,64        | 23,07        | 19,56        | 20,67        | 15,47        | 0,07         | 0,15        | 0,25        |
| <b>Prom</b> | <b>28,91</b> | <b>27,36</b> | <b>39,22</b> | <b>36,50</b> | <b>12,90</b> | <b>12,55</b> | <b>0,05</b>  | <b>0,08</b> | <b>0,57</b> |

Los errores obtenidos al comparar las temperaturas mínimas reales y simuladas, que alcanzan entre 50% y 57%, se deben a la eliminación de los valores en los cuales el flujo del circuito primario se detiene, momento en el cual las temperaturas del fluido son bajas. En relación a las temperaturas máximas, los errores relativos de ambas variables corresponden al 8%, lo que se traduce en diferencias no mayores a 4[°C].

#### 4.2.2.4 Estado encendido/apagado BR1, V1, V2 y Resistencia Eléctrica

Las variables de encendido y apagado que forman parte del Circuito Primario son determinadas por el sistema de control del SST. Por este motivo es relevante realizar la comparación del comportamiento de dichas variables entre la situación registrada y la simulada, con lo cual se determinará la validez del sistema de control del modelo computacional. Es importante destacar que si bien la variable de resistencia eléctrica no pertenece al circuito primario,

su comportamiento puede ser relevante para conocer el funcionamiento del modelo de estanque de acumulación.

En las Figuras 4.22, 4.23 y 4.24 se presentan los comportamientos de las variables de estado de la bomba de recirculación del circuito primario (BR1), de la válvula que dirige el flujo hacia EACS o Hacia V2 (V1) y de la resistencia eléctrica que posee EACS, respectivamente. En la parte superior de dichos gráficos se presenta el comportamiento real de la variable y en la parte inferior el comportamiento simulado.

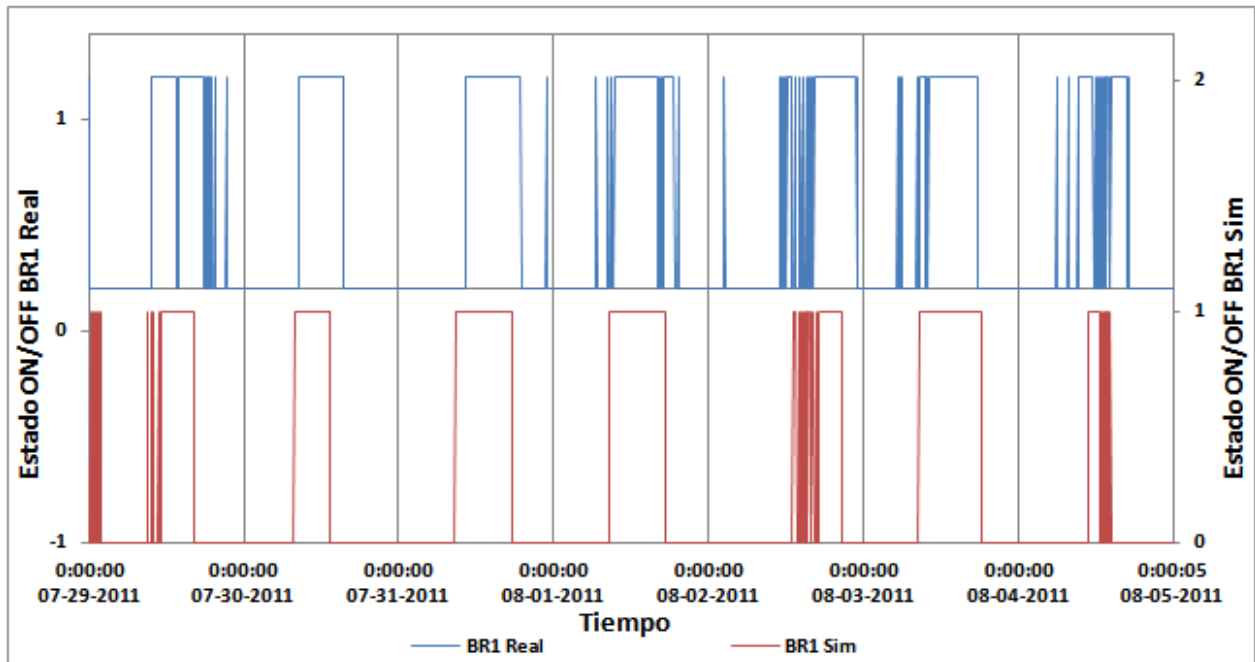


Figura 4.22: Comparación estado BR1

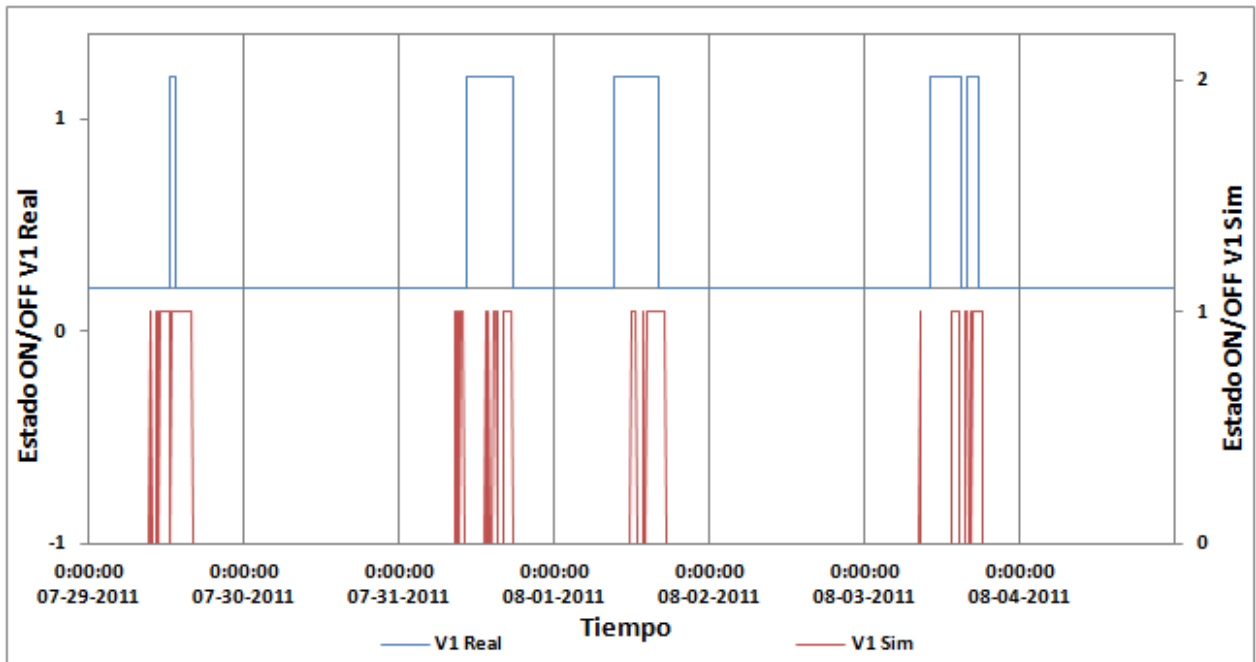


Figura 4.23: Comparación estado V1

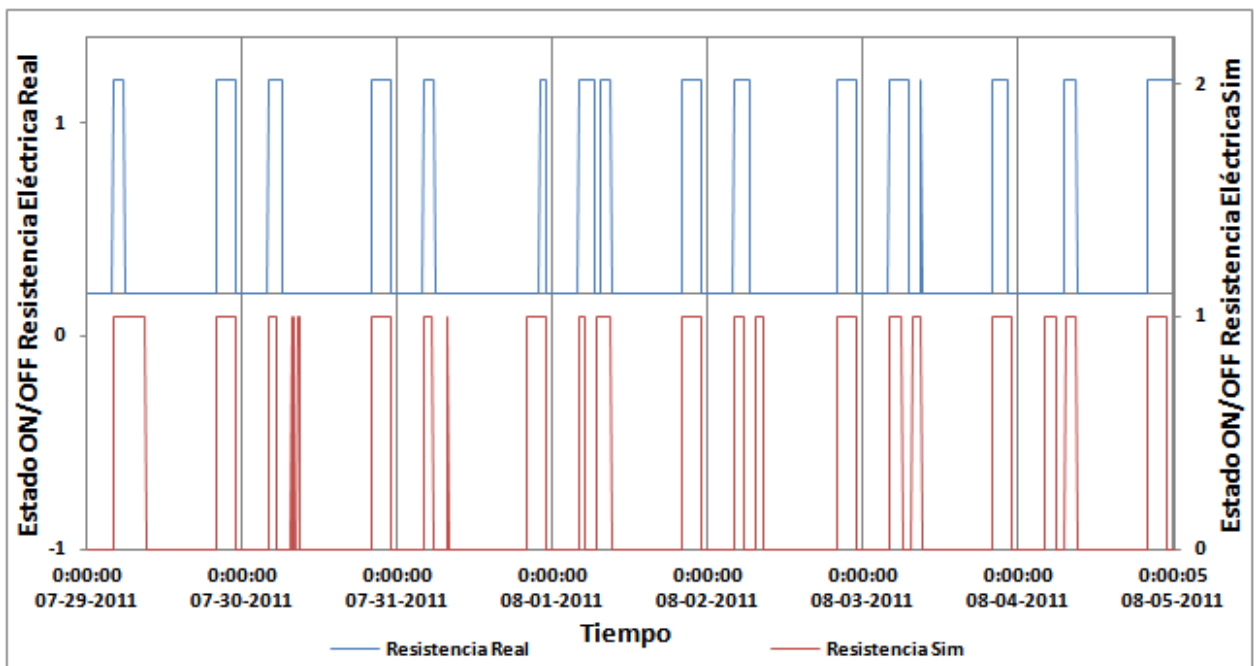


Figura 4.24: Comparación estado Resistencia Eléctrica

Al observar los gráficos es posible apreciar que el sistema de control simulado en el modelo computacional se comporta de manera muy similar al sistema de control instalado en la vivienda. Las pequeñas discrepancias que se presentan entre los gráficos se deben a las diferencias que se producen entre las variables de temperatura controladas por el sistema real y el simulado. Sin embargo, estas diferencias no influyen mayormente en el comportamiento del sistema,

produciéndose pequeños adelantos y/o retrasos en el encendido/apagado de los equipos controlados.

### 4.2.3 Comparación de Resultados

En este acápite de la validación de resultados se comparan los cálculos energéticos realizados sobre los intercambiadores de calor del sistema real con los resultados obtenidos del sistema simulado. Debido a que ya se han validado las variables registradas, en la Tabla 4.19, se compararan solamente los resultados finales de la semana de medición, presentando los resultados energéticos para cada uno de los intercambiadores del Circuito Primario.

**Tabla 4.19: Comparación resultados situación real y simulada período N°1**

| Día  | 1     | 2     | 3      | 4     | 5     | 6      | 7     | Total Semana  |
|--|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|---------------|
| <b>Colectores Solares</b>                      |       |       |        |       |       |        |       |               |
| Energía Disponible [kWh/día]                   | 11,60 | 6,44  | 142,35 | 123,2 | 28,49 | 143,93 | 11,37 | <b>467,39</b> |
| Energía Aportada Real [kWh/día]                | 9,23  | 2,40  | 43,94  | 42,13 | 21,58 | 33,71  | 15,24 | <b>168,23</b> |
| Energía Aportada Simulada [kWh/día]            | 15,07 | 1,89  | 34,7   | 42,56 | 18,68 | 36,83  | 10,32 | <b>160,05</b> |
| <b>Estanque Agua Caliente Sanitaria</b>        |       |       |        |       |       |        |       |               |
| Energía Aportada Real [kWh/día]                | 3,4   | 1,61  | 10,56  | 2,77  | 9,81  | 4,73   | 6,46  | <b>39,34</b>  |
| Energía Aportada Simulada [kWh/día]            | 1,9   | 0,94  | 14,94  | 3,11  | 6,31  | 6,29   | 5,04  | <b>38,53</b>  |
| Energía Auxiliar Real [kWh/día]                | 12    | 12,9  | 6,9    | 17,7  | 13,8  | 14,1   | 15    | <b>92,4</b>   |
| Energía Auxiliar Simulada [kWh/día]            | 19,8  | 12,16 | 11,05  | 14,91 | 13,49 | 15,80  | 16,4  | <b>103,63</b> |
| <b>Estanque Calefacción</b>                    |       |       |        |       |       |        |       |               |
| Energía Aportada Real [kWh/día]                | 0,12  | 0     | 8,2    | 20,32 | 0     | 11,64  | 0     | <b>40,28</b>  |
| Energía Aportada Simulada [kWh/día]            | 1,02  | 0     | 5,59   | 15,94 | 0     | 9,89   | 0     | <b>32,44</b>  |
| <b>Intercambiador de Calor Piscina/Jacuzzi</b> |       |       |        |       |       |        |       |               |
| Energía Aportada Real [kWh/día]                | 1,95  | 0,43  | 12,05  | 10,62 | 3,7   | 12,01  | 2,7   | <b>43,46</b>  |
| Energía Aportada Simulada [kWh/día]            | 2,57  | 0,14  | 10,81  | 9,23  | 4,64  | 10,82  | 1,95  | <b>40,16</b>  |

Como se puede observar en la Tabla 4.19 el modelo computacional simula de buena forma los resultados relacionados a aportes energéticos que realiza el SST a los distintos sistemas de la

vivienda. Además se puede verificar que el sistema de control, incluido junto al modelo de estanque de acumulación y resistencia eléctrica, simula de buena forma el comportamiento y energía aportada por la resistencia. Para visualizar de mejor forma los resultados expuestos se presenta en la Tabla 4.20 un análisis con el error relativo entre los datos reales y los simulados.

**Tabla 4.20: Análisis de error en resultados de simulación período N°1**

| Aporte Energético Semanal [ <i>kWh</i> ] | Datos Reales  | Datos Simulación | Error %       |
|--|---------------|------------------|---------------|
| Colectores                               | 168,23        | 160,05           | <b>4,86%</b>  |
| EACS                                     | 39,34         | 38,53            | <b>2,06%</b>  |
| EAC                                      | 40,28         | 32,44            | <b>19,46%</b> |
| IC                                       | 43,46         | 40,16            | <b>7,59%</b>  |
| <b>Subtotal Energía Renovable</b>        | <b>123,08</b> | <b>111,57</b>    | <b>9,35%</b>  |
| Resistencia Eléctrica                    | 92,4          | 103,63           | <b>12,15%</b> |
| <b>Total Período N°1</b>                 | <b>215,48</b> | <b>215,2</b>     | <b>0,13%</b>  |

A partir de los resultados anteriores se puede calcular los rendimientos que poseen los equipos simulados en el modelo durante la semana en cuestión. En la Tabla 4.21 se tabulan dichos resultados junto a los obtenidos del registro de datos.

**Tabla 4.21: Comparación del rendimiento sistema simulado período N°1**

| Aporte Energético Semanal [ <i>kWh</i> ] | Rendimiento Real | Datos Simulación | Error %       |
|--|------------------|------------------|---------------|
| Colectores                               | 35,99%           | 34,24%           | <b>4,86%</b>  |
| EACS                                     | 46,69%           | 48,31%           | <b>3,47%</b>  |
| EAC                                      | 47,69%           | 40,40%           | <b>15,29%</b> |
| IC                                       | 49,05%           | 45,08%           | <b>8,09%</b>  |
| <b>Rendimiento Global</b>                | <b>26,33%</b>    | <b>23,78%</b>    | <b>9,68%</b>  |

Al analizar los datos, se obtiene que los rendimientos que presenta el sistema simulados son muy similares a los rendimientos del sistema real, por lo cual es posible afirmar que el modelo computacional representa el comportamiento del sistema real durante la semana de medición.

A continuación se procede a realizar la comparación de resultados relacionados al período de medición utilizado como comprobante de la validación, que corresponde a la semana comprendida entre el 26 de Mayo al 6 de Junio del 2011. En la Tabla 4.22 se presentan los resultados reales y simulados para dicho período.

Tabla 4.22: Comparación resultados situación real y simulada período N°2

| Día  | 1      | 2      | 3     | 4      | 5      | 6     | 7      | Total<br>Semana |
|--|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|-----------------|
| <b>Colectores Solares</b>                      |        |        |       |        |        |       |        |                 |
| Energía Disponible [kWh/día]                   | 138,15 | 50,75  | 13,22 | 1,40   | 16,97  | 36,31 | 211,97 | <b>468,77</b>   |
| Energía Aportada Real [kWh/día]                | 225,57 | 39,97  | 10,44 | 1,41   | 14,69  | 39,67 | 143,54 | <b>475,29</b>   |
| Energía Aportada Simulada [kWh/día]            | 138,15 | 50,75  | 13,22 | 1,40   | 16,97  | 36,31 | 211,97 | <b>468,77</b>   |
| <b>Estanque Agua Caliente Sanitaria</b>        |        |        |       |        |        |       |        |                 |
| Energía Aportada Real [kWh/día]                | 50,89  | 34,05  | 3,18  | 0,09   | 7,71   | 5,10  | 89,85  | <b>190,87</b>   |
| Energía Aportada Simulada [kWh/día]            | 43,71  | 30,09  | 5,45  | 0,13   | 7,27   | 8,30  | 97,06  | <b>192,01</b>   |
| Energía Auxiliar Real [kWh/día]                | 10,8   | 11,61  | 6,21  | 15,93  | 12,42  | 12,69 | 13,5   | <b>83,16</b>    |
| Energía Auxiliar Simulada [kWh/día]            | 17,82  | 10,944 | 9,945 | 13,419 | 12,141 | 14,22 | 14,76  | <b>93,249</b>   |
| <b>Estanque Calefacción</b>                    |        |        |       |        |        |       |        |                 |
| Energía Aportada Real [kWh/día]                | 20,72  | 15,96  | 2,47  | 0,67   | 8,49   | 12,54 | 20,01  | <b>80,86</b>    |
| Energía Aportada Simulada [kWh/día]            | 18,65  | 12,77  | 2,71  | 0,61   | 6,79   | 15,05 | 18,01  | <b>74,58</b>    |
| <b>Intercambiador de Calor Piscina/Jacuzzi</b> |        |        |       |        |        |       |        |                 |
| Energía Aportada Real [kWh/día]                | 29,19  | 9,09   | 3,62  | 0,35   | 2,91   | 12,94 | 37,55  | <b>95,66</b>    |
| Energía Aportada Simulada [kWh/día]            | 38,47  | 2,96   | 3,25  | 0,31   | 3,65   | 11,66 | 27,12  | <b>87,41</b>    |

Al igual que en el período anterior, se pueden apreciar pequeñas diferencias entre los resultados obtenidos de los registros reales y la simulación del modelo. Para un análisis más directo de las diferencias entre los resultados en la Tabla 4.23 se presenta un análisis del error relativo entre los principales resultados, verificándose que el modelo simula correctamente, según los parámetros establecidos, el comportamiento del sistema al utilizar una semana distinta como punto de comparación.

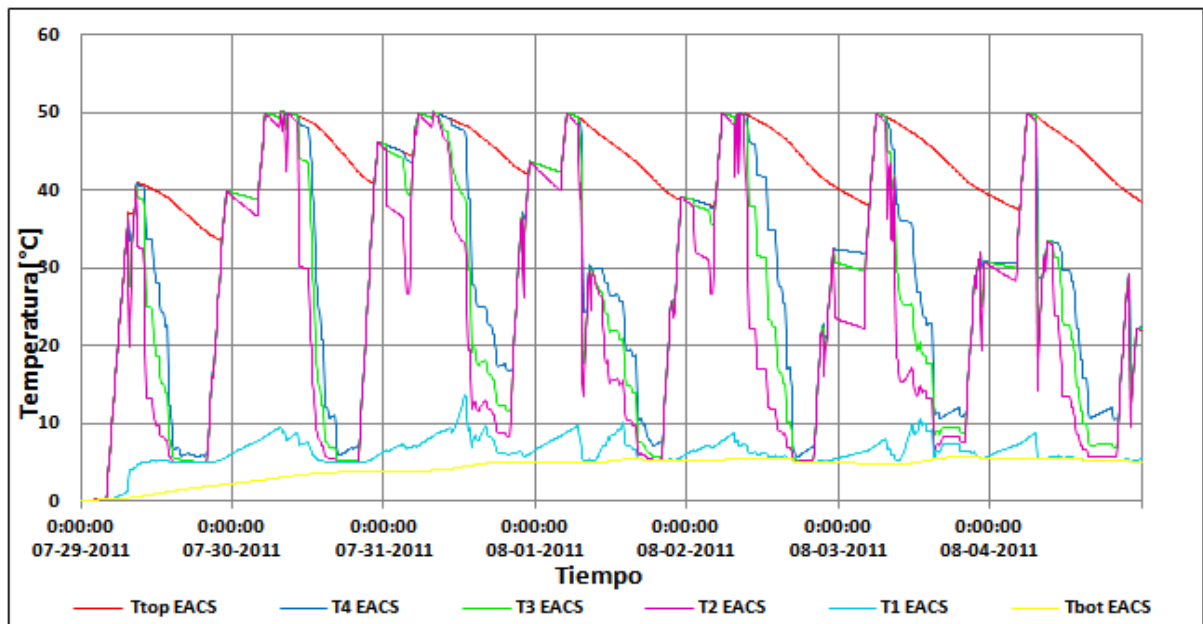
**Tabla 4.23: Análisis de error en resultados de simulación período N°2**

| Aporte Energético Semanal [kWh] | Datos Reales | Datos Simulación | Error %       |
|---------------------------------|--------------|------------------|---------------|
| Colectores                      | 468,77       | 475,29           | <b>1,39%</b>  |
| EACS                            | 190,87       | 192,01           | <b>0,60%</b>  |
| EAC                             | 80,86        | 74,58            | <b>7,76%</b>  |
| IC                              | 95,66        | 87,41            | <b>8,62%</b>  |
| Resistencia Eléctrica           | 83,16        | 93,25            | <b>12,13%</b> |

Al observar los resultados, y como se menciona anteriormente, se puede apreciar que el modelo simulado arroja valores cuyo error relativo se encuentra alrededor del 12% con respecto a los resultados reales para la semana comprendida entre el.

#### 4.2.4 Estanque de Acumulación ACS

Como última sección dentro de la validación del modelo se muestra el comportamiento del estanque de acumulación de agua caliente sanitaria. El objetivo de esta sección es revelar si el modelo creado para dicho estanque se comporta según lo esperado para un estanque estratificado. En la Figura 4.25 se puede apreciar el comportamiento general del estanque a lo largo de la semana de validación.



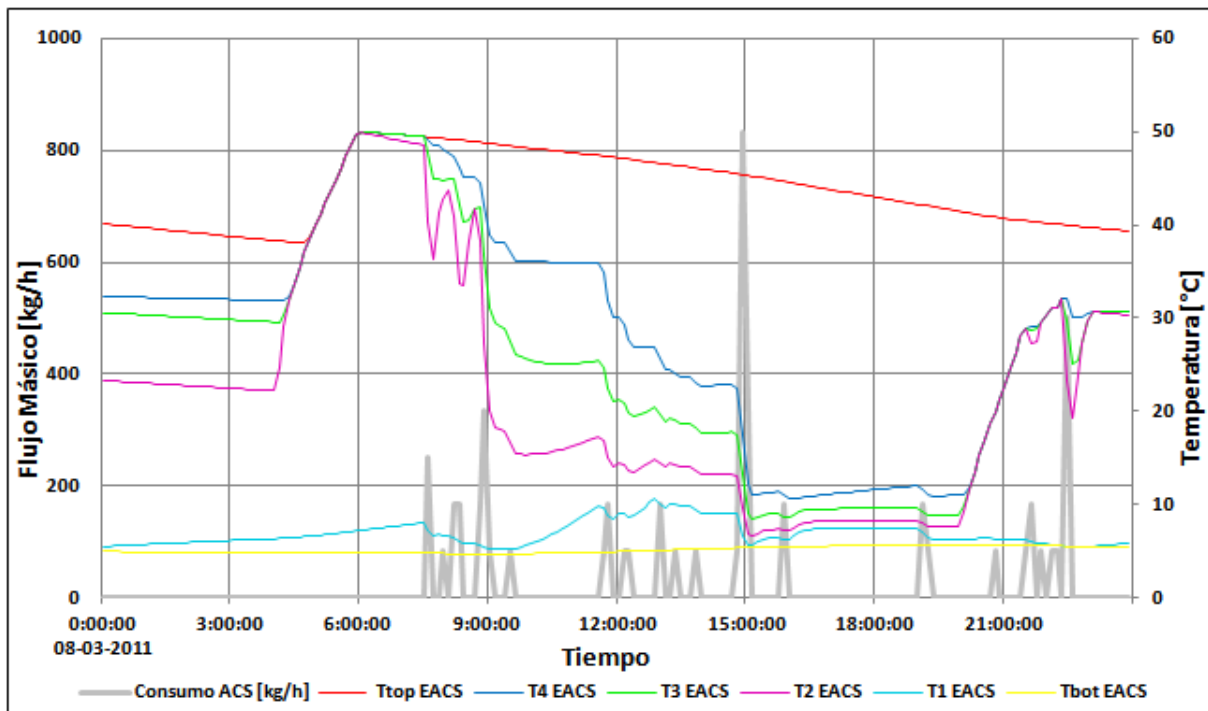
**Figura 4.25: Comportamiento de EACS en semana de validación**

donde: Ttop EACS es la temperatura superior del estanque de acumulación  
 T4, T3, T2 y T1 son las temperaturas de cada nivel de estratificación  
 Tbot EACS es la temperatura inferior del estanque de acumulación



En la Figura 4.25 se observa un comportamiento bastante característico para el EACS, presentándose estratificación de la temperatura según el diseño del estanque. Además, es posible apreciar un comportamiento periódico del estanque, lo que tiene relación con el consumo de ACS y con el encendido/apagado de la resistencia. En las Figuras 4.26 y 4.27 se muestra en detalle los efectos del consumo de ACS y del encendido/apagado de la resistencia eléctrica, respectivamente, sobre la estratificación del estanque en uno de los días de la simulación.

En la Figura 4.26 se puede notar cómo los máximos de consumo producen el descenso de las temperaturas en la estratificación del estanque, haciendo tender las curvas hacia la temperatura de entrada del agua de la red. Adicionalmente, se muestra de qué forma este comportamiento no afecta la temperatura superior del estanque, lo cual se puede explicar por 2 motivos: debido a que la extracción de agua de consumo está a menor altura que la parte superior del estanque y por la estratificación de temperatura que se produce al ascender el fluido cálido.



**Figura 4.26: Efecto del consumo de ACS sobre estratificación**

En la Figura 4.27 se puede apreciar que la entrada en funcionamiento de la resistencia eléctrica provoca un rápido incremento de la temperatura desde el nodo N°2 hacia la parte superior. Esto se debe a que dicho elemento se encuentra ubicado a media altura del estanque.

Asimismo, observando las Figuras 4.26 y 4.27, es posible verificar que la acción de la resistencia eléctrica mientras se consume agua permite que la pendiente de descenso de temperatura sea menos pronunciada, gracias a lo cual se puede obtener agua caliente durante el

consumo. En relación a lo anterior, el peak de consumo ocurre momentos antes de las 9 AM, lo que reduce drásticamente la temperatura del nodo N°2, sin embargo, no influye mayormente en la temperatura del nodo N°4, debido a que la resistencia eléctrica actúa reduciendo el efecto del consumo en los nodos superiores. Luego de terminado el consumo, la estratificación se reorganiza y, como procede un período sin aporte energético, las temperaturas descienden hasta que el nodo N°4, en el cual se ubica la extracción de agua de consumo, se mantiene alrededor de los 37[°C].

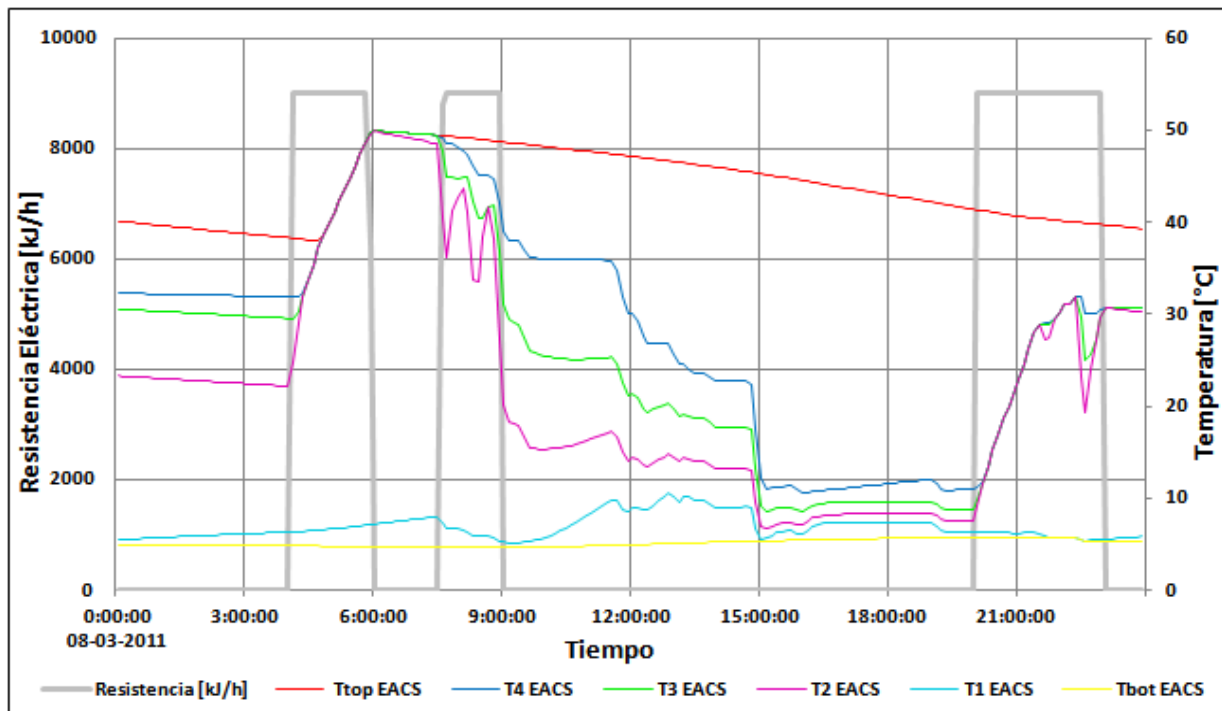


Figura 4.27: Efecto del encendido/apagado resistencia eléctrica sobre estratificación

### 4.3 Simulación Computacional

Una vez verificada la validez del modelo se pueden utilizar las simulaciones computacionales para conocer el comportamiento del sistema en distintas situaciones y/o períodos de tiempo. En este contexto, se realizarán dos tipos de simulaciones sobre el modelo creado:

- Simulación anual del SST instalado en la vivienda, cuyo objetivo es conocer el comportamiento del SST en el período de un año.
- Simulaciones utilizando el período del registro, cuyo objetivo es encontrar mejores soluciones al SST instalado en la vivienda en base a cambios no invasivos sobre el sistema.

En relación a lo anterior, en esta sección se presentan el primer tipo de simulación. El segundo tipo corresponde ser presentado en el Capítulo 5 junto a las discusiones de los resultados, esto

debido a que primero es necesario analizar los resultados del registro para luego proponer de forma más directa las mejoras al circuito.

Para la simulación anual se utiliza la base de datos que posee TRNSYS con información de clima de distintas ciudades del mundo, entre ellas Santiago de Chile. Los resultados más relevantes de la simulación anual se presentan en la Tabla 4.24.

**Tabla 4.24: Resultados generales de simulación anual**

| Componente                     | Energía Disponible Anual [kWh] | Energía Aportada Anual[kWh] | Energía Promedio Diaria [kWh] | Rendimiento |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------|
| Colectores Solares             | 18017,75                       | 8718,72                     | 23,89                         | 48,39%      |
| Estanque ACS                   | 4795,85                        | 2749,94                     | 7,53                          | 57,34%      |
| Estanque Calefacción           | 3922,86                        | 2503,15                     | 6,86                          | 63,81%      |
| Intercambiador Piscina/Jacuzzi | 3465,84                        | 2389,35                     | 6,55                          | 68,94%      |

En relación al uso de la resistencia eléctrica como método auxiliar de energía en el EACS se tiene que la energía total aportada corresponde a 3310,56 [kWh] anuales, lo que da un promedio de 9,07 [kWh] diarios. En la Tabla 4.25 se muestra un detalle mensual de los resultados producidos por la simulación, observándose el comportamiento del sistema según las condiciones de cada mes.

**Tabla 4.25: Detalle mensual de simulación anual**

| Mes                  | Energía Colectores [kWh] | Energía EACS [kWh] | Energía EAC [kWh] | Energía IC [kWh] | Energía Resistencia [kWh] | Energía Radiación [kWh] |
|----------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|
| Enero                | 1112,23                  | 350,80             | 319,33            | 304,80           | 279,85                    | 2277,9                  |
| Febrero              | 943,28                   | 297,52             | 270,82            | 258,50           | 252,24                    | 1938,87                 |
| Marzo                | 878,14                   | 276,97             | 252,12            | 240,65           | 279,36                    | 1780,32                 |
| Abril                | 691,33                   | 218,05             | 198,48            | 189,46           | 271,54                    | 1419,06                 |
| Mayo                 | 475,81                   | 150,07             | 136,61            | 130,39           | 281,78                    | 953,61                  |
| Junio                | 315,52                   | 99,52              | 90,59             | 86,47            | 274,15                    | 628,67                  |
| Julio                | 357,7                    | 112,82             | 102,70            | 98,03            | 283,65                    | 743,09                  |
| Agosto               | 514,12                   | 162,16             | 147,61            | 140,89           | 282,85                    | 1081,53                 |
| Septiembre           | 525,63                   | 165,79             | 150,91            | 144,05           | 272,94                    | 1086,69                 |
| Octubre              | 849,81                   | 268,04             | 243,98            | 232,89           | 281,33                    | 1804,89                 |
| Noviembre            | 965,23                   | 304,44             | 277,12            | 264,52           | 271,25                    | 2033,7                  |
| Diciembre            | 1089,92                  | 343,77             | 312,92            | 298,69           | 279,62                    | 2269,44                 |
| <b>Total general</b> | <b>8718,72</b>           | <b>2749,94</b>     | <b>2503,18</b>    | <b>2389,35</b>   | <b>3310,56</b>            | <b>18017,75</b>         |

Con los resultados anteriormente mostrados se pueden calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas gracias al aporte energético realizado por el SST a cada circuito de la vivienda. En la Tabla 4.26 se presentan los resultados que tienen relación con las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas durante el año de simulación.

**Tabla 4.26: Emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas durante el año de simulación**

|                                   | Energía Aportada Anual<br>[kWh] | Emisión de CO <sub>2</sub> evitada [kg] |
|-----------------------------------|---------------------------------|---|
| Estanque ACS                      | 2749,94                         | 563,74                                  |
| Estanque Calefacción              | 2503,18                         | 513,15                                  |
| Intercambiador Piscina/Jacuzzi    | 2389,35                         | 489,82                                  |
| <b>Subtotal Energía Renovable</b> | <b>7642,47</b>                  | <b>1566,71</b>                          |
| Resistencia Eléctrica             | 3310,56                         | 678,66                                  |
| <b>Total Anual</b>                | <b>10953,03</b>                 | <b>2245,37</b>                          |

Con estos resultados se caracteriza el funcionamiento del modelo del SST y, por lo tanto, el funcionamiento del sistema instalado en la vivienda. En el Anexo L, que se incluye adjunta al final del informe en soporte digital, se encuentran las tablas con los resultados de la simulación anual.

## Capítulo 5

### Discusiones

En este capítulo se presentan las discusiones que se desprenden de los resultados obtenidos en el capítulo anterior. Por este motivo, las discusiones se desarrollan en base al mismo esquema utilizado en el Capítulo 4. Por lo tanto, se inicia con el registro de variables, luego se da paso a las discusiones con respecto a la validación del modelo y, por último, con respecto a la simulación anual. Es importante destacar que dentro de ésta última sección se incluye un análisis crítico del sistema en base a simulaciones, donde se realizan modificaciones al modelo original que permitan evidenciar mejoras en las prestaciones del sistema.

#### 5.1 Registro de Variables

##### 5.1.1 Variables de Clima

Con respecto al registro de variables externas de la vivienda es relevante mencionar que las mediciones están dentro de los rangos esperados para cada período. En este contexto, en la Tabla 5.1 se puede apreciar una comparación entre los datos de temperatura obtenidos en las mediciones y los registros de temperaturas históricos de una base de datos reconocida. [29]

**Tabla 5.1: Comparación registro de temperatura**

|   | Medición de temperatura | Promedio base de datos [29] |
|---|-------------------------|-----------------------------|
| Primer período del 28 de Abril al 4 de Mayo   |                         |                             |
| Mínima Promedio [°C]                          | 3,5                     | 6                           |
| Máxima Promedio [°C]                          | 21,35                   | 19,5                        |
| Promedio [°C]                                 | 10,36                   | 13                          |
| Segundo período del 26 de Mayo al 1 de Junio  |                         |                             |
| Mínima Promedio [°C]                          | -0,95                   | 4                           |
| Máxima Promedio [°C]                          | 12,98                   | 15,5                        |
| Promedio [°C]                                 | 4,86                    | 9,5                         |
| Tercer período del 29 de Julio al 4 de Agosto |                         |                             |
| Mínima Promedio [°C]                          | 0,78                    | 2,5                         |
| Máxima Promedio [°C]                          | 11,7                    | 14,5                        |
| Promedio [°C]                                 | 5,51                    | 9                           |

De la información expuesta en la Tabla 5.1 se puede apreciar que las temperaturas promedio registradas durante los períodos de medición siguen el mismo comportamiento que poseen las temperaturas de comparación obtenidas de la base de datos [29]. Las diferencias existentes pueden explicarse por las condiciones de año seco que se han presentado durante el transcurso del 2011, lo que ha repercutido en observaciones de las temperaturas bajas más extremas de lo comúnmente observado y, por lo tanto, ha influido en los promedios presentados.

En relación a los registros de radiación se presenta en la Tabla 5.2 una comparación entre la irradiancia promedio en cada período de medición y los valores presentados en el Registro Solarimétrico del gobierno. (Ver Anexo A)

**Tabla 5.2: Comparación registro de irradiancia**

|                 | Promedio de Irradiancia $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ | Registro Solarimétrico $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ |
|-----------------|--|---|
| Primer Período  | 216,72   | 215,77  |
| Segundo Período | 160,75   | 161,75  |
| Tercer Período  | 109,52   | 140,88  |

Como se puede observar en la Tabla 5.2 las mediciones de irradiancia realizadas en el primer y segundo período se comportan de forma muy similar a los datos presentados en el Registro Solarimétrico. Por otro lado, en el tercer período de medición se puede evidenciar una mayor diferencia entre los datos presentados, midiéndose menos irradiancia de lo expuesto por el Registro Solarimétrico para dichas fechas. Para explicar este comportamiento es necesario comprender que la radiación extraterrestre no varía de forma importante con el transcurso de los días, debiendo su cambio a la variación en la declinación del sol durante el transcurso del año. Por este motivo, las diferencias presentes en el registro se deben principalmente a la existencia de días nublados durante el período en cuestión, lo que se puede observar en la Figura 4.3 presentada en el capítulo anterior. En este contexto, al observar las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se pueden reconocer los días nublados cuando ocurren variaciones importantes en la radiación registrada.

### 5.1.2 Variables del SST

Antes de continuar con las discusiones es relevante mencionar que las variables de registro del SST instalado en la vivienda corresponden a la medición por sensores previamente instalados en ésta, por lo tanto, no existe posibilidad de realizar registro en zonas diferentes a las mencionadas en el Capítulo 3. Además, es importante destacar que el control del SST está dado por variables que no corresponden necesariamente a las registradas, siendo imposible conocer el comportamiento de

dichas variables durante los períodos de medición (Ver Anexo E). De esta forma, al efectuar la discusión de los resultados primero se realiza una discusión de la elección de cada variable como tal, considerando la importancia de ésta en el registro.

Como el trabajo de título está enfocado a la simulación del circuito primario las discusiones relacionadas al registro de datos en la vivienda se centrarán en dicho circuito, presentándose solamente algunos comentarios con respecto a los otros circuitos del SST.

#### 5.1.2.1 Circuito Primario

Las variables registradas en el circuito primario son de tres tipos:

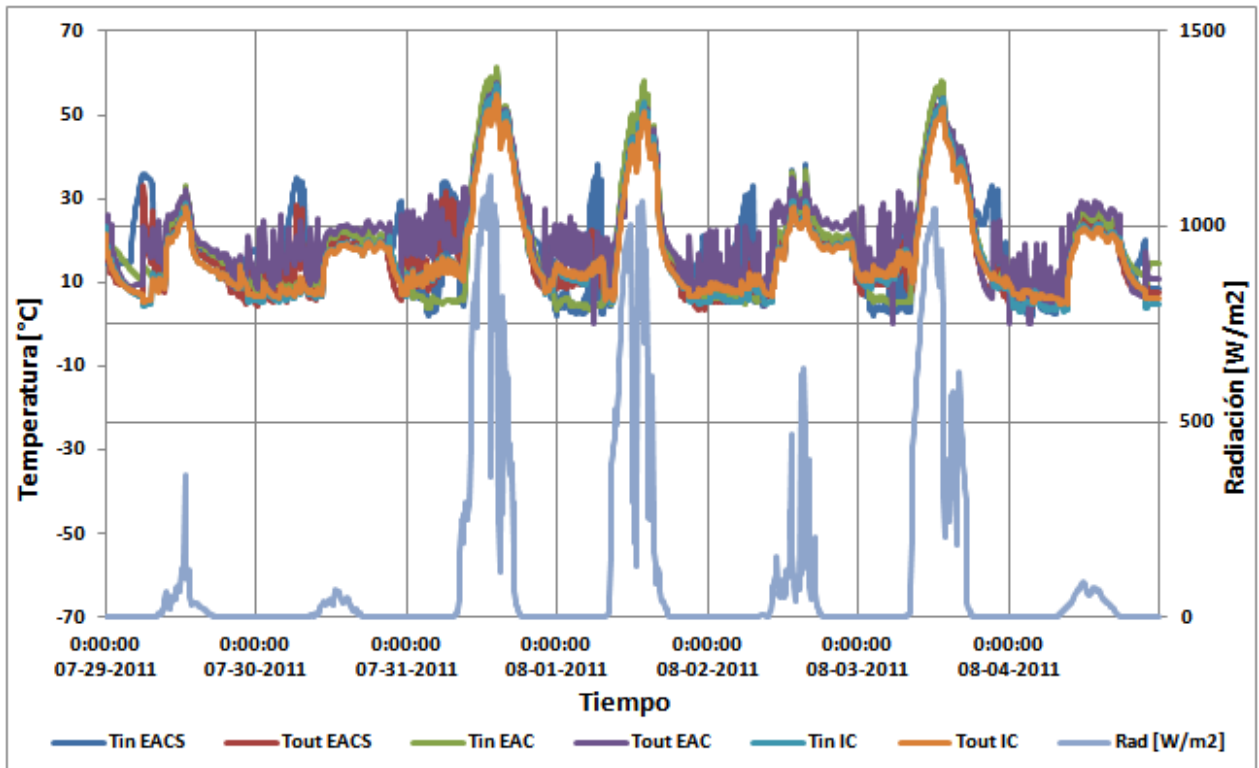
1. Temperatura:
  - Temperatura entrada/salida intercambiador del estanque de agua caliente sanitaria
  - Temperatura entrada/salida intercambiador del estanque de agua de calefacción
  - Temperatura entrada/salida intercambiador Piscina/Jacuzzi
2. Estado encendido/apagado
  - Estado de bomba de recirculación del circuito primario
  - Estado de dos válvulas de tres vías
3. Caudal
  - Caudal acumulado que circula por el circuito primario

A continuación se procederá a comentar los registros de datos para luego realizar una discusión de los resultados derivados de dichos registros.

#### Variables de Temperatura

En relación a las variables de temperatura es relevante señalar que su registro está estrictamente ligado al cálculo de la energía que aporta el sistema solar a los circuitos de agua caliente sanitaria, calefacción y al sistema Piscina/Jacuzzi. En este sentido, el registro de dichas temperaturas es un factor necesario para obtener el aporte energético a los sistemas mencionados. Por otro lado, no existe registro de las temperaturas de entrada y salida de los colectores, por lo tanto, se hace imposible conocer con exactitud la energía que entrega el sistema captador. Si bien no es necesario conocer dicha energía para obtener el aporte solar a cada sistema, su registro resulta relevante para verificar el comportamiento de los colectores, para conocer la energía que dispone el Circuito Primario y para verificar el comportamiento del sistema de control, ya que la temperatura de salida de este equipo corresponde a una de las variables de control de las cuales no se tiene registro.

Con respecto al comportamiento que presentan las variables de temperatura, es posible mencionar que existe una relación directa con el comportamiento de la radiación registrada para la misma semana, la cual que se muestra en la Figura 5.1. En ésta, es posible observar que las máximas temperaturas del sistema se logran en los momentos en los cuales la energía disponible gracias a la radiación es mayor, asimismo se aprecia que en los momentos donde la disponibilidad energética es baja se presentan cambios menores en la distribución de temperatura.



**Figura 5.1: Relación entre el comportamiento de temperaturas y radiación**

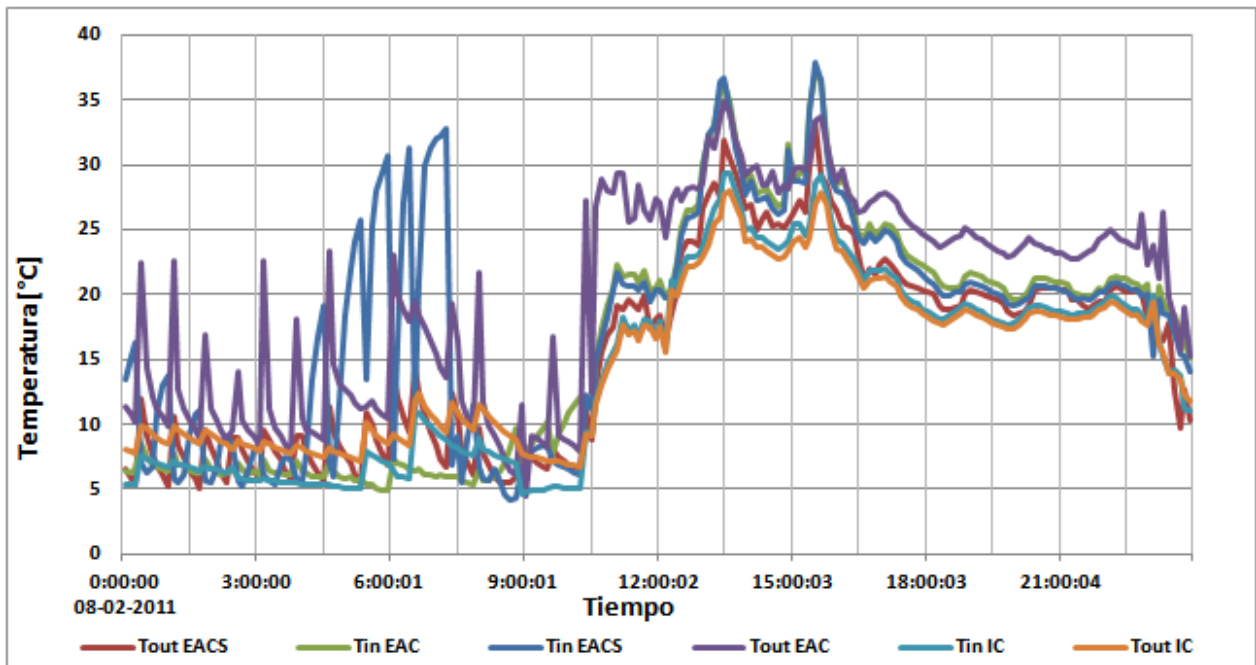
Luego de analizar la distribución de temperatura y radiación presentada en la Figura 5.1, y apoyándose en los resultados obtenidos en el Capítulo 4, se puede realizar una discusión sobre la dependencia y comportamiento de las temperaturas. De esta forma, se desprenden las siguientes afirmaciones:

- Las temperaturas máximas de cada día ocurren cuando la radiación disponible es máxima. De la Figura 5.1 es fácil desprender que la radiación incidente es un factor determinante en el comportamiento de la temperatura, presentándose las más altas temperaturas cuando el sol se encuentra en la parte más alta del cielo. Si bien este detalle es comúnmente sabido resulta importante tenerlo en cuenta, ya que la mayor demanda de ACS y calefacción ocurre cuando la radiación disponible es baja, por lo tanto, es necesario poseer un sistema de acumulación bien diseñado para los requerimientos de la instalación.



- Existe alta variación de temperatura en los momentos de baja radiación. Al observar la Figura 5.1 se puede notar que en la mañana y tarde de cada día las temperaturas presentan una alta variación, especialmente las temperaturas registradas cerca de los estanques de acumulación (entrada y salida del serpentín de los estanques). Este efecto se debe a que en momentos de baja radiación suelen activarse los sistemas auxiliares de energía, los cuales introducen calor a sus respectivos circuitos y que, por mecanismos de transferencia de calor, afectan zonas aledañas a éstos. Por este motivo, los sensores de temperatura de entrada y salida del serpentín de EACS y EAC registran períodos de alta variación cuando entran en funcionamiento la resistencia eléctrica y la bomba de calor, respectivamente.

Si se grafica en detalle un día de medición se puede apreciar de mejor forma el efecto que tiene el encendido de la resistencia eléctrica sobre las temperaturas. En la Figura 5.2 se muestra el detalle de la distribución de temperatura correspondiente al quinto día de medición.



**Figura 5.2: Detalle comportamiento temperaturas circuito primario**

Al observar la Figura 5.2 destaca un alza de la temperatura a la entrada del intercambiador de EACS (Tin EACS), alza anormal que se sitúa en el contexto de la entrada en operación de la resistencia eléctrica (definida para funcionar desde las 4 AM a las 9 AM y según condiciones de operación). Este efecto también se aplica al accionamiento de la bomba de calor, la cual afecta en mayor medida al sistema debido a la gran cantidad de energía que entrega. En este sentido el accionamiento de la bomba de calor, en momentos en los que no circula fluido por el circuito

primario, conduce a un incremento de la temperatura por conducción a través de la pared de las tuberías.

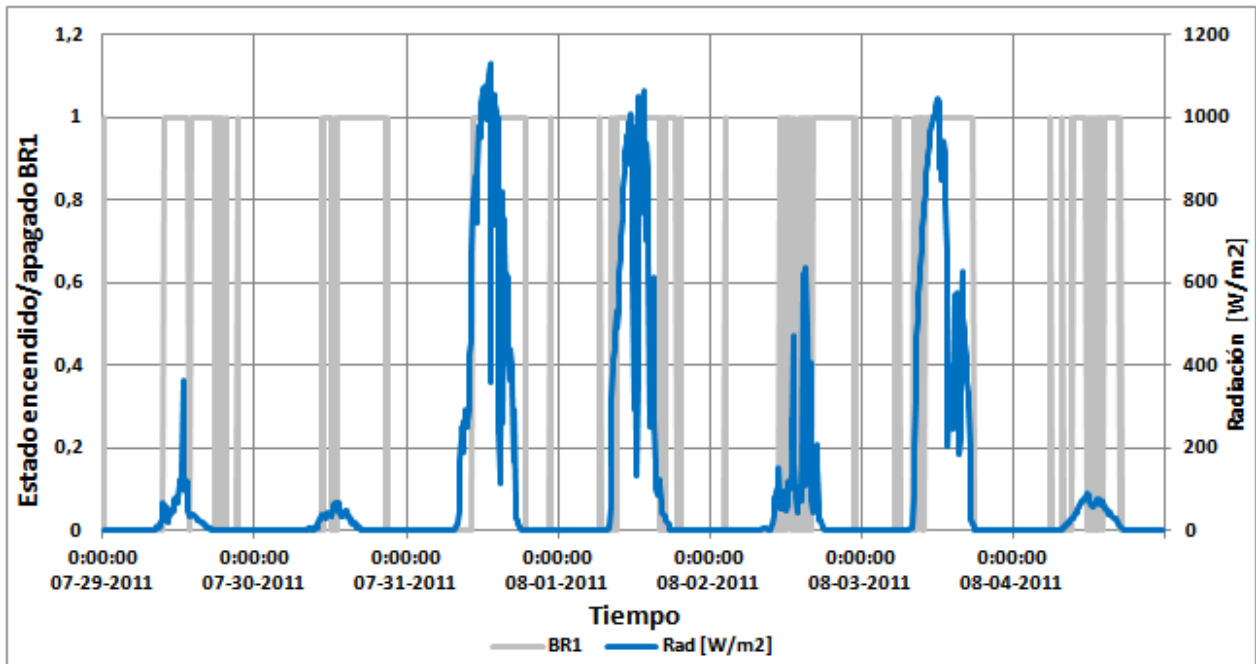
Según lo expuesto anteriormente, un factor muy relevante que se debe tener en consideración en la instalación del sistema es el efecto que genera la puesta en marcha de elementos externos a éste. Para el caso del SST en estudio, existen variables de control cuyo lugar de medición se encuentra muy cercano a zonas afectadas por elementos externos (como por ejemplo el efecto que produce la resistencia eléctrica sobre T2), lo que provoca acciones indeseadas del sistema frente a cambios no relacionados con la lógica establecida para su funcionamiento.

### Variables de Estado

Las variables de estado permiten identificar la entrada en funcionamiento de los equipos a los que representan, por lo tanto, su inclusión en el registro de datos es muy relevante para verificar el funcionamiento del sistema de control. Sin embargo, al no ser registradas todas las variables de control, se pierde la capacidad de verificar el funcionamiento de este sistema al no existir punto de comparación para determinar si la variable de estado opera adecuadamente. Ejemplo de lo anterior corresponde al registro de las variables de estado de BR1 y V1, cuyo control está dado por el comportamiento de T1 (temperatura salida colectores), T2 (temperatura salida intercambiador EACS) y T3 (temperatura inferior de EAC), de las cuales T2 es la única registrada.

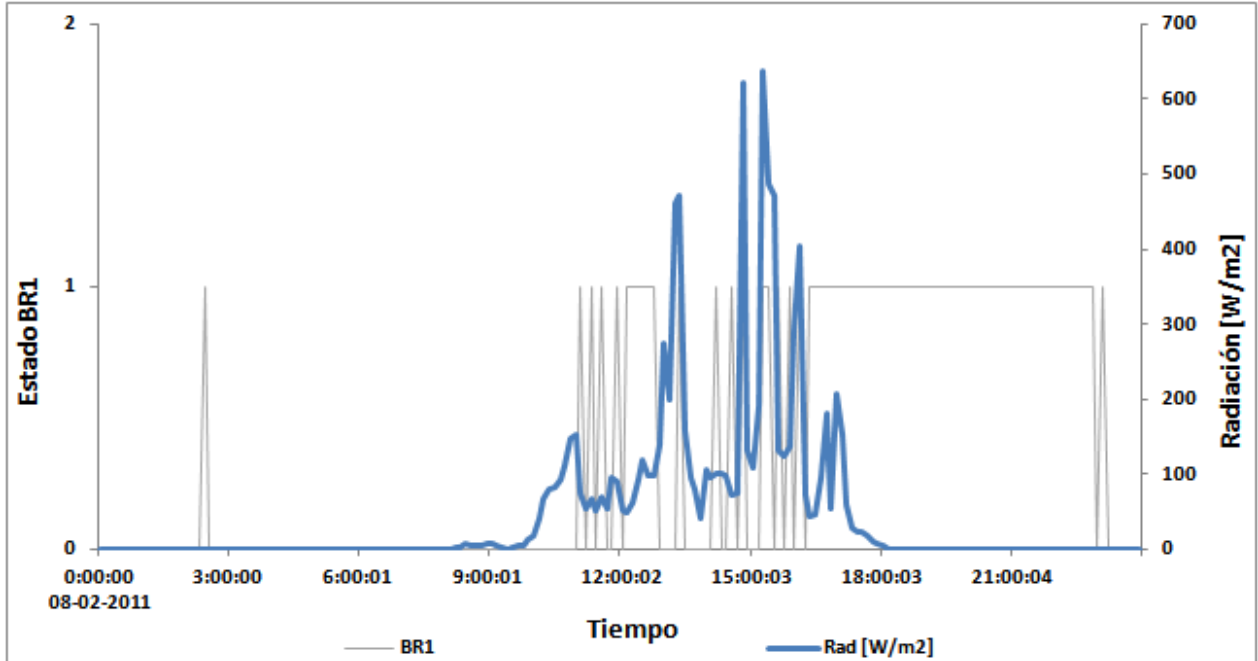
Por otro lado, el conocimiento de las variables de estado permite obtener una idea de cómo se comportan los equipos del circuito primario al realizar comparaciones con otras variables del sistema y ver si siguen la lógica básica de funcionamiento. En este contexto, en la Figura 4.5, se puede apreciar el estado de BR1 y V1, observándose que el sistema de agua caliente sanitaria posee prioridad en la entrega de energía, ya que V1 está apagado la mayor parte del tiempo. Además, se puede analizar el comportamiento de las variables de estado en función de variables más generales como la radiación, verificando así el comportamiento intuitivo del sistema.

En relación a lo anterior, en la Figura 5.3 se puede evidenciar cierta relación entre el estado de BR1 con la radiación incidente sobre los colectores, observándose que BR1 está encendida mayormente cuando existe radiación presente. Sin embargo, no se puede efectuar un análisis más acabado de dicha relación ya que no se posee registro de todas las temperaturas relacionadas al control de este equipo.



**Figura 5.3: Relación entre estado BR1 y radiación**

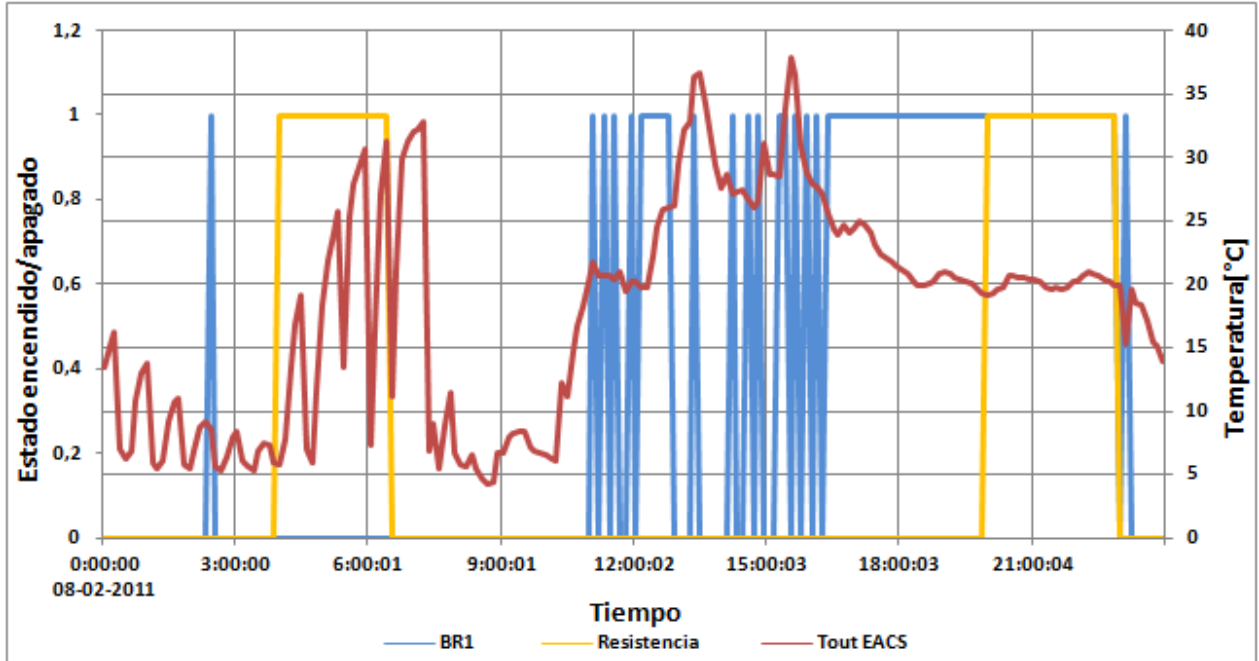
Un comportamiento normal de de BR1 indicaría la puesta en marcha del equipo al superar cierto umbral de radiación incidente, momento en el cual el sistema de control detecta que el aporte energético del SST es favorable para los sistemas de la vivienda. Si bien en la Figura 5.3 se ilustra dicho comportamiento, existen situaciones en las cuales BR1 no se comporta según lo esperado. Ejemplos de lo anterior corresponden a lo ocurrido en el primer, segundo y quinto día de medición, donde se puede observar que la bomba de recirculación permanece activa hasta cerca de la medianoche, momento en el cual no existe radiación incidente sobre los colectores. En este contexto, es lógico deducir que los días nublados generan condiciones favorables para el funcionamiento de los sistemas auxiliares que apoyan al SST, por lo tanto, los efectos que estos equipos generan sobre las variables de control se acentúan en esos días. En la Figura 5.4 se presenta un detalle del quinto día de medición, pudiéndose apreciar con mayor claridad que BR1 continúa en funcionamiento a pesar de que la energía solar disponible sea nula.



**Figura 5.4: Detalle comportamiento BR1 en relación a radiación**

La razón del comportamiento observado en la Figura 5.4 se debe principalmente a la entrada en funcionamiento de la resistencia eléctrica, la que afecta directamente el comportamiento de la temperatura de control T2, cuyo sensor se encuentra ubicado a la salida del intercambiador de EACS. El principal problema que se puede dilucidar es que el sensor se ubica cerca de la zona afectada por el incremento de temperatura interna del estanque, por lo tanto, la variable de control mide un efecto externo no considerado en el diseño del control del SST. De esta manera, se produce un comportamiento indeseado de BR1, haciendo que su variable de estado siga en condición de encendido aunque no haya energía disponible para entregar a los estanques.

En la Figura 5.5 se aprecia en detalle el comportamiento de BR1, resistencia eléctrica y temperatura de salida de EACS. El objetivo del gráfico es dejar plasmada la incidencia de los elementos externos en las temperaturas registradas. Antes de proceder con el análisis es importante destacar que la variable de estado relacionada el encendido y apagado de la bomba de calor se encuentra en condición de encendido durante todo el día utilizado para el análisis.



**Figura 5.5: Efecto resistencia eléctrica sobre BR1y T2**

Observando la Figura 5.5 se desprende de qué manera el encendido de la resistencia eléctrica afecta el comportamiento de las temperaturas registradas en las cercanías del estanque. De esta forma, se observan períodos de alteración en la mañana y en la tarde:

- Durante la mañana BR1 está apagada por lo que el incremento de temperatura afecta al registro de entrada del serpentín, elevando su temperatura a más de 32[°C]
- Al anochecer BR1 se mantiene encendida hasta pasadas las 22 horas debido a que la resistencia eléctrica mantiene la temperatura de control T2 y la temperatura de entrada del intercambiador de EACS en alrededor de 20[°C].

Estos efectos generan un funcionamiento anormal del SST, produciéndose descensos abruptos de temperatura luego de terminado el accionar de los sistemas auxiliares.

### Variable de Caudal

Con respecto a la variable de caudal es importante destacar que su registro es necesario para realizar los cálculos energéticos sobre el sistema, siendo uno de los factores de la ecuación utilizada para dicho cálculo. Además de permitir el cálculo de energía transmitida en cada intercambiador del circuito, el registro de dicha variable permite conocer la entrada en funcionamiento de BR1, cumpliendo una función similar a la variable de estado de la bomba de recirculación.

Por otro lado, al observar la Figura 4.7 se puede apreciar que el flujo másico máximo obtenido del caudal que pasar por el caudalímetro es constante, verificándose que BR1 es una bomba que proporciona un flujo másico de  $500[kg/h]$  cuando está encendida.

### Resultados del Registro

La información recuperada del análisis de las variables registradas en la vivienda permite obtener los resultados tabulados en la Tabla 4.4. En relación a estos resultados es importante recordar que la situación analizada corresponde a un período invernal con temperaturas promedio que no superan los  $6[^\circ C]$ , siendo relevantes las pérdidas que se producen debido a las grandes diferencias de temperatura entre el ambiente y el sistema. Lo anterior se evidencia al analizar los rendimientos que los equipos pertenecientes al circuito primario desarrollaron durante la semana de medición.

- Colectores solares: Según el registro de datos los colectores presentan un rendimiento cercano al 36%, el cual está influenciado por las altas pérdidas que posee este equipo hacia el medio y, debido a que no se posee registro de temperatura de entrada y salida, por las pérdidas en tuberías entre el colector y los distintos puntos de medición (salida IC y entrada intercambiador EACS). Por este motivo el rendimiento real puede ser levemente mayor.
- Intercambiador EACS: El intercambio térmico que ocurre en el serpentín de EACS tiene un rendimiento de 46,7% en base a la energía que entrega el sistema de colección. Si se considera como diferencia de temperatura característica la que ocurre entre la entrada y salida del intercambiador (no se puede calcular  $lmtd$  ya que no se tiene información de las temperaturas internas del estanque) y la Ecuación 2.42, se obtiene que el coeficiente de intercambio promedio con el cual opera este componente es  $U_{hx} = 685,49 [W/m^2^\circ C]$ , lo que está dentro de los rango esperados para intercambiadores circulares sumergidos en fluido. [30]
- Intercambiador EAC: El rendimiento que presenta el serpentín de EAC corresponde a un 47,7%, siendo muy similar al rendimiento del intercambiador de EACS. Debido a que el diseño de los estanques de EAC es el mismo que el de agua caliente los rendimientos debiese ser similares. Como se puede observar esto se cumple, existiendo una pequeña diferencia que se puede deber a las condiciones de operación de cada uno. En este contexto EAC suele trabajar a mayor temperatura debido al funcionamiento de la bomba de calor. Si se realiza el mismo procedimiento que en EACS se obtiene que el coeficiente de intercambio promedio para este equipo es  $U_{hx} = 1107,21 [W/m^2^\circ C]$ , valor que se encuentra en la parte superior del rango para este tipo de intercambiadores [30]. Las diferencias entre los resultados de

EACS y EAC se pueden deber a que el fluido de EACS posee más impurezas (mayormente minerales) al venir desde la red, las cuales pueden afectar el intercambio térmico al depositarse en las paredes del serpentín.

- Intercambiador Piscina/Jacuzzi: El intercambio térmico de IC tiene un rendimiento de un 49,1%, lo que es bastante elevado si se consideran las condiciones de operación del sistema (ubicado en el exterior de la vivienda). Este rendimiento se explica por la alta eficiencia del intercambiador de placas planas utilizado en la instalación. En este contexto, y usando el mismo procedimiento que en los intercambiadores de los estanques, se tiene que el coeficiente de intercambio promedio es  $U_{hx} = 1400,76 [W/m^2\text{°C}]$ , lo que corresponde al rango inferior para los valores típicos de este tipo de intercambiadores. Este resultado se debe principalmente a las condiciones de operación del intercambiador, siendo muy influyente sobre éste la baja temperatura ambiente. [30]

Considerando lo anterior, el SST posee un rendimiento global cercano al 26%, lo que es bastante bueno para el período de invierno en el cual se realizaron los registros.

Por otro lado, uno de los resultados del registro consiste en el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas al utilizar la energía provista por el SST. En este contexto, se utiliza como comparación el uso del gas natural como combustible convencional. La elección de este combustible se justifica básicamente en que es uno de los combustibles más utilizados para proveer de ACS y corresponde al que emite menor cantidad de dióxido de carbono. De esta forma, el sistema solar instalado en la vivienda evita la emisión de 24,81 kilogramos de CO<sub>2</sub> durante la semana de análisis, lo que se eleva a una cantidad de 1,6 toneladas de CO<sub>2</sub> si se considera el análisis anual del sistema. En este contexto, si se considera que las emisiones per cápita durante el año 2007 ascendían a 4,3 toneladas [31], la reducción realizada en la vivienda habitada por 5 personas corresponde a un 7% del valor per cápita para dicho año.

#### 5.1.2.2 Circuito ACS

Las variables registradas del circuito de agua caliente sanitaria corresponden al estado de encendido/apagado de la resistencia eléctrica y al caudal de consumo.

En relación al estado de la resistencia eléctrica es posible decir que su comportamiento, presentado en la Figura 4.8, sigue los patrones establecidos por la lógica de control. Como no existe registro de la temperatura interna del ensaque de acumulación no se puede verificar el funcionamiento del termostato que éste posee, sin embargo, gracias a la Figura 4.8 es posible establecer que la resistencia solo entra en funcionamiento en parte de su horario establecido, lo que tiene concordancia con la existencia de un límite de temperatura impuesto en el termostato. Por

otro lado, la energía que entrega la resistencia eléctrica representa el 245,7% de la energía que el SST entrega a EACS, transformándose durante el invierno en el elemento energético preferencial para calentar el agua de uso sanitario. Este resultado puede llamar la atención, pero en situación de invierno es completamente entendible un consumo de este nivel, principalmente debido al bajo rendimiento que presentan los colectores solares en estas condiciones.

En relación al caudal de consumo es posible establecer, gracias a la información obtenida, el perfil de flujo másico que se presenta en la Figura 4.10. Al analizar dicho perfil es posible encontrar un patrón de comportamiento para cada día, patrón que se utiliza durante el desarrollo del modelo de consumo para la simulación anual. Con respecto al patrón en sí es posible identificar los siguientes puntos:

- Peak de consumo en la mañana: Casi todos los días pertenecientes al registro poseen una pequeña alza en el consumo durante la mañana, lo que se debe principalmente al ser este un período en el que usualmente se utiliza la ducha, elemento que presenta alto consumo de ACS. La excepción a esta regla se presenta en el tercer día de medición, el cual corresponde a un día domingo, días que no suelen tener un orden como los correspondientes a días hábiles.
- Peak de consumo al mediodía: Durante los días hábiles se presenta un peak de consumo al mediodía, lo que se debe principalmente al uso de agua para efectuar tareas de aseo y cocina por parte del personal de aseo domiciliario contratado en la vivienda.
- Peak de consumo en la tarde: Al igual que en el caso anterior, los días hábiles poseen un pequeño peak de consumo durante la tarde, peak que se explica por ser esta la hora de ducha del personal de aseo que posee la vivienda.

Teniendo en cuenta los principales eventos de consumo durante la semana de medición es posible construir, de forma aproximada, un modelo de consumo que represente una semana tipo en la vivienda. Adicionalmente, este modelo se puede extender para caracterizar un consumo anual, consumo que servirá de referencia para realizar las simulaciones anuales sobre la vivienda.

Con respecto al consumo en sí, es posible decir que el total de agua caliente consumida durante el período de medición asciende a 4.060 litros. Si bien este valor puede resultar bajo si se considera que la vivienda es habitada por 5 personas (cada persona tiene un consumo promedio de 250 litros diarios [32]), es importante destacar que no incluye el consumo de agua fría desde la red, por lo que no sirve como parámetro que permita medir el comportamiento del consumo de agua en la vivienda.



### 5.1.2.3 Circuito de calefacción

Las variables registradas en el circuito de calefacción están relacionadas con las temperaturas de entrada/salida del sistema de losa radiante (surtidor y retorno) y de la bomba de calor, con las variables de estado de la bomba de calor (BC) y BR2 y con el flujo de agua utilizado por BC.

En primer lugar, las temperaturas de entrada y salida de la bomba de calor y el flujo de agua que pasa por BC se registran para poder calcular la energía aportada por este elemento al sistema de calefacción. En relación al registro de las temperaturas de surtidor y de retorno, que representan las temperaturas de entrada y salida del sistema de losa radiante, es posible decir que su utilidad se encuentra limitada por falta de registro del caudal que pasa por las bombas de recirculación BRC, por lo que no se puede calcular la energía entregada en calefaccionar las dependencias de la vivienda.

Al observar los gráficos presentados en las Figuras 4.11 y 4.12 se puede verificar que la puesta en marcha de la bomba de calor influye considerablemente en la distribución de las temperaturas registradas. Si bien esto puede resultar bastante deducible para las temperaturas relacionadas a la entrada y salida de BC, no lo es para la temperatura de entrada y salida de la losa radiante, ya que estas temperaturas consideran el uso de agua proveniente del estanque de acumulación. La gran influencia que se menciona anteriormente se explica porque la cantidad de energía aportada por la bomba de calor al sistema de calefacción corresponde a un 6.989,8% de la energía entregada por el SST a este sistema, haciendo verdaderamente ínfimo el aporte que realiza el SST al sistema de calefacción durante el período de invierno.

En relación a las variables de estado, es posible añadir que, según lo observado en la Figura 4.12, existe concordancia entre la puesta en marcha de BR2 y BC, lo cual resulta lógico ya que se requiere que ambos equipos estén encendidos para que se realice el aporte energético del sistema auxiliar.

### 5.1.2.4 Circuito Piscina/Jacuzzi

Con respecto al sistema de piscina y jacuzzi es posible mencionar que el traspaso de energía que realiza el SST, por medio del intercambiador de calor, no es perceptible durante el transcurso de la medición. Esto se debe principalmente a que en situación de invierno resulta muy difícil calefaccionar una gran masa de agua con la reducida energía disponible y con las pérdidas asociadas a las condiciones ambientales. Por este motivo el diseño de la vivienda contempla el uso de una bomba de calor auxiliar para apoyar la calefacción del presente circuito, equipo que a la fecha no ha sido instalado.

## 5.2 Validación del Modelo

Si bien en el Capítulo 4 se presentan las principales discusiones relacionadas a la validación del modelo computacional, debido a que son necesarias para proseguir con la simulación anual del SST, en esta sección se presentan las discusiones más generales que surgieron durante el proceso de validación.

En este contexto, es importante mencionar que en la creación del modelo computacional se utilizan las principales ecuaciones que describen el funcionamiento de los elementos presentes en el circuito primario del SST, lo que significa introducir en el código de TRNSYS gran cantidad de parámetros que definen matemáticamente cada componente. Además, se deben introducir ecuaciones que simulan de mejor forma las condiciones de operación del sistema, tomando en cuenta los efectos que producen los elementos externos sobre el comportamiento del SST. Por ejemplo, se incluyeron ecuaciones que aumentan la temperatura, según el encendido y apagado de la resistencia eléctrica, de las zonas aledañas a ésta, con el objetivo de simular de mejor forma la realidad del sistema. El conjunto de todas las acciones realizadas para crear el modelo permite generar un SST muy similar al real, gracias a lo cual cumple satisfactoriamente la validación del modelo.

## 5.3 Simulación Computacional

Las discusiones relacionadas a las simulaciones computacionales se presentan en dos secciones distintas. La primera se refiere a los resultados expuestos en el Capítulo 4 y que tienen relación con la simulación anual del modelo de la vivienda. La segunda, tiene relación al uso del modelo computacional como plataforma de mejoramiento del sistema original, permitiendo generar nuevas soluciones y complementar las discusiones realizadas sobre el registro de variables.

### 5.3.1 Simulación anual del SST original

Como se muestra en el Capítulo 4, el objetivo principal del modelo es caracterizar el comportamiento de la vivienda durante el período de un año. En relación a lo discutido con respecto a la validación del modelo es posible afirmar que la simulación anual realizada a la vivienda si representa el comportamiento de ésta en base a los archivos de clima que posee TRNSYS. De esta forma, los resultados presentados en la Tabla 4.21, 4.22 y 4.23 corresponden a los resultados aproximados que tendría la vivienda bajo las mismas condiciones climáticas utilizadas en el modelo. La afirmación anterior es muy relevante al indicar que la confección del modelo computacional

cumple con todos sus objetivos, permitiendo tener una representación bastante completa del comportamiento anual del circuito primario perteneciente al SST instalado en la vivienda.

En relación a los resultados obtenidos, en la Tabla 5.3 se puede observar una comparación entre los rendimientos energéticos presentados durante la semana de registro (rendimiento del sistema real), durante la semana de validación (rendimiento del sistema simulado) y durante el año (rendimiento del sistema simulado).

**Tabla 5.3: Rendimientos promedio real y simulados**

| Componente                    | Rendimiento real<br>(29 Julio al 4 de Agosto) | Rendimiento simulado (29<br>Julio al 4 de Agosto) | Rendimiento simulado<br>(anual) |
|-------------------------------|---|---|---------------------------------|
| Colectores                    | 35,99%  | 34,24%  | 48,39%                          |
| EACS                          | 46,69%  | 48,31%  | 57,34%                          |
| EAC                           | 47,69%  | 40,40%  | 63,81%                          |
| IC                            | 49,05%  | 45,08%  | 68,94%                          |
| <b>Rendimiento<br/>Global</b> | <b>26,1%</b>                                  | <b>23,78%</b>                                     | <b>42,42%</b>                   |

Al observar la Tabla 5.3 se pueden apreciar las grandes similitudes entre los rendimientos reales del sistema y los rendimientos simulados en el mismo período de tiempo, lo que ratifica que el modelo computacional representa el comportamiento de la vivienda. Por otro lado, al observar los resultados de la simulación anual se observa un incremento considerable en los rendimientos, lo que se relaciona principalmente con el período que abarca la simulación. En este contexto, es importante destacar que los sistemas presentan su menor rendimiento en invierno ya que las malas condiciones climáticas aumentan el factor de pérdidas térmicas de los colectores, por lo que es de esperarse que los rendimientos de dicho período sean considerablemente menores que los anuales. Además, es importante tener en cuenta que la radiación disponible para la simulación anual se obtiene de una base de datos del tipo TMY (“Typical Meteorological Year” o año meteorológico típico), esta base de datos incluye información de las condiciones climáticas típicas (temperatura, radiación, precipitación, etc.) para el período de un año. En este sentido, por ser bases de datos generadas a partir de registros históricos, no se representan situaciones climatológicas extremas, por lo que es muy comprensible obtener mejores resultados con su uso incluso durante períodos de tiempo determinados.

### 5.3.2 Alternativas al SST original

Uno de los objetivos secundarios de la creación del modelo es la posibilidad de utilizarlo en la confección de un circuito primario basado en el original pero con mejores prestaciones. En este

contexto, y en base a las discusiones realizadas sobre el registro de variables, se procede a identificar los puntos sensibles del circuito que pueden ser foco de mejoras:

1. Sistema de Control: Sin duda alguna uno de los puntos más sensibles del circuito es el sistema de control, el cual representa el “cerebro” del SST instalado.
2. Sistema de Colección: Otro punto sensible es el arreglo de colectores, equipos que juegan el rol de transformar la radiación en energía para el sistema y que presentan el menor rendimiento dentro del circuito.
3. Estanques de acumulación: Debido a que la energía disponible suele no coincidir con su requerimiento es necesario contar con un buen sistema de acumulación que tenga la capacidad de entregar la mayor cantidad de energía posible.
4. Sistema de tuberías: Si bien el sistema de tuberías se puede considerar como un elemento sencillo del circuito, las pérdidas de energía que se generan a través de éstas pueden ser importantes.

A continuación se presentan con mayor detalle los cuatro puntos identificados anteriormente, mostrando como estos influyen en las características del sistema y cuáles son las acciones que permitirán mejorar las prestaciones del SST instalado en la vivienda.

#### 5.3.2.1 Sistema de Control

Como se mencionó, el sistema de control es uno de los puntos más sensibles del SST, lo que se debe principalmente a que éste concentra toda la capacidad de respuesta del sistema, incidiendo directamente en la cantidad de energía que se aporta. Si bien los colectores y equipos de intercambio son los encargados de entregar la energía, el sistema de control es el encargado de determinar que dichos equipos funcionen en su punto óptimo.

Basándose en la lógica del sistema de control (Ver Anexo E), en las discusiones relacionadas sobre éste y en la investigación de este tipo de sistemas [2] es posible proponer las siguientes alternativas a su diseño.

1. Cambiar variable de control T2: La variable de control T2 está determinada para ser la temperatura de salida del intercambiador de EACS, temperatura que no representa la de consumo. Por este motivo se cambia dicha variable por la temperatura presente en la parte inferior del interior del estanque, considerando que el funcionamiento de éste está determinado por las necesidades de temperatura dentro del estanque. La razón de escoger este nuevo punto de control se debe a que consiste en la temperatura más baja que podrá

recibir el usuario, lo que permitirá al sistema de control establecer de mejor forma si la energía disponible es suficiente para generar un aporte al circuito.

2. Cambiar valor de decisión en diferencia de temperaturas de control: El sistema instalado enciende el circuito primario cuando la diferencia entre T1 y T2 es mayor a 5[°C] y lo apaga cuando es menor al mismo valor, lo que produce inestabilidades al exigir mucha precisión al sistema. En este contexto, se recomienda utilizar la siguiente ecuación que relaciona las diferencias de temperatura de control:

$$\frac{\Delta T_{on}}{\Delta T_{off}} \geq \frac{\dot{m}C_p}{A_c F_R U_L} \quad 5.1$$

Si se escoge como temperatura de apagado  $\Delta T_{off} = 5[°C]$  y se calcula la razón presentada en la Ecuación 5.1 con los datos del SST se obtiene que la temperatura de encendido debiera ser  $\Delta T_{on} = 26[°C]$ . Esto evitará inestabilidades en el sistema que pueden producir daño de equipos y pérdidas de energía al retrasar el encendido. Asimismo, es importante destacar que si bien el cambio en la decisión de encendido significa dejar de captar cierta cantidad de energía, las pérdidas asociadas a éstas son menores, aún más si se considera que la energía aportada tiene que al menos cubrir los costos de operar el sistema.

3. Proteger sensores de los efectos externos del sistema: En las discusiones realizadas al registro de variables se pudo apreciar un importante efecto de los sistemas auxiliares de energía sobre las variables registradas. Por este motivo, se hace necesario ubicar las variables de registro en zonas que no estén tan expuestas a los elementos externos del circuito primario.

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados relacionados a las modificaciones del sistema de control junto a los resultados obtenidos en el Capítulo 4.

**Tabla 5.4: Modificación sistema de control**

| Aporte energético [kWh] | Reales | Simulación SST original | Simulación SST modificado |
|-------------------------|--------|-------------------------|---------------------------|
| Colectores              | 168,23 | 160,05                  | <b>165,42</b>             |
| EACS                    | 38,67  | 38,53                   | <b>48,93</b>              |
| EAC                     | 40,28  | 32,44                   | <b>28,02</b>              |
| IC                      | 43,04  | 40,16                   | <b>43,52</b>              |
| Resistencia Eléctrica   | 92,4   | 103,63                  | <b>103,5</b>              |

De los resultados tabulados en la Tabla 5.10 se puede deducir que el conjunto de cambios realizados al sistema de control de la SST permitieron mejorar sus prestaciones en los siguientes aspectos

- Se incrementó en un 3,36% la cantidad de energía captada por los colectores. Este aumento se debe principalmente a la reducción en la temperatura de entrada de los colectores desde un promedio de 9,58[°C] a un promedio de 7,46[°C], lo que ha incidido en un aumento de la eficiencia de los colectores al desplazarse hacia la izquierda en su curva de rendimiento (ver curva de rendimiento de colectores presentada en Figura 2.6). En este contexto el nuevo rendimiento de los colectores corresponde a un 35,39%.
- Se incrementó en un 26,99% la energía aportada al estanque de acumulación de ACS. Este aumento de la energía entregada se debe principalmente al cambio en el lugar de medición de T2, con lo que la válvula V1 se mantuvo apagada (dirigiendo el flujo hacia EACS) alrededor de un 20% más de tiempo que en la simulación original.
- Se redujo en un 7,46% la energía aportada al estanque de acumulación de agua de calefacción. Esta reducción se debe principalmente a que la lógica de control está centrada en abastecer de energía con mayor prioridad a EACS, por lo que al aumentar la demanda energética debido al cambio de variables de control (T2) se dirigió más energía a dicho estanque. Prueba de lo anterior es que la energía disponible para ser entregada en EAC se redujo en 5,13[kWh] con respecto a la simulación del SST original.
- Se incrementó en un 8,37% la energía portada al intercambiador Piscina/Jacuzzi. Este aumento de energía se debe principalmente al aumento del rendimiento del sistema de colección, lo que permite tener más energía disponible para ser entregada en los distintos sistemas.

En resumen, el conjunto de medidas destinadas a optimizar el sistema de control del SST mejoraron las prestaciones del sistema, pasando de un rendimiento global de 23,78% a un rendimiento de 25,78%, lo que significa aportar un total de 120,47[kWh] versus los 111,13[kWh] que indica la simulación del modelo original. Analizando estos resultados se podría pensar que el aumento del rendimiento es menor, sin embargo, hay que tener en cuenta que el sistema simulado con los es más estable que el original, presentando muy bajas oscilaciones producto del encendido y apagado de los equipos. Por otro lado, si se aplican estos cambios a la simulación anual que se realiza sobre el sistema, los incrementos de rendimiento se elevan desde un 42,4% a un 46%, lo que significa un incremento del aporte solar desde 7642,5[kWh] a 8370,4[kWh] anuales.

### 5.3.2.2 Sistema de Colección

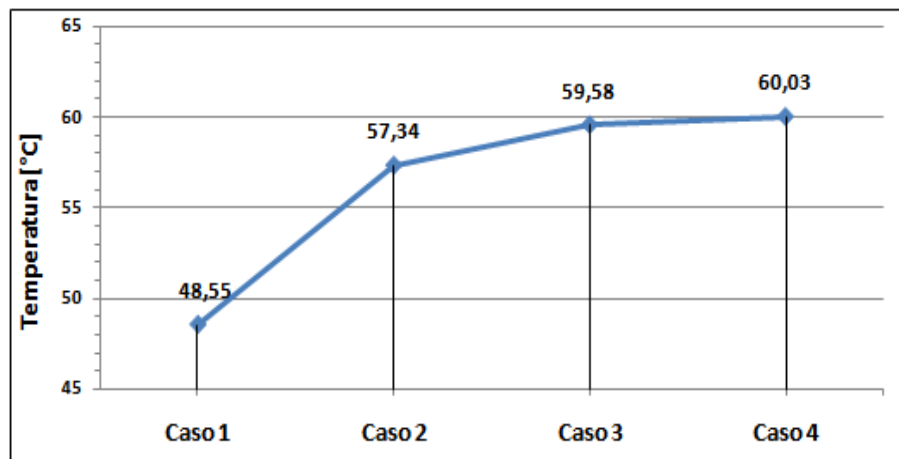
El sistema de colección se identificó como uno de los puntos sensibles ya que es el único medio de captación de la energía solar, transformándose en uno de los elementos críticos dentro del funcionamiento del SST. En este contexto, una vez escogido el sistema de captación es relevante

analizar la cantidad de colectores a instalar y el tipo de conexión entre estos. De esta forma, es interesante realizar un análisis de sensibilidad sobre el sistema de colección instalado en la vivienda, haciendo uso del software para caracterizar el comportamiento del sistema en cada caso analizado.

En la literatura relacionada a los sistemas de colección [2][24][26] se indica que una buena relación entre la inversión monetaria y el funcionamiento de la captación solar corresponde a la instalación de no más de 3 colectores en serie, obteniéndose incrementos de temperatura marginales al aumentar la cantidad de colectores con este tipo de conexión. De esta forma, se analizará en la vivienda el uso de los siguientes arreglos de colectores en el sistema, manteniendo el tipo de distribución que éste posee:

- Caso 1: 3 colectores solares conectados en paralelo.
- Caso 2: 3 arreglos de colectores conectados en paralelo, cada uno con 2 colectores en serie.
- Caso 3: 3 arreglos de colectores conectados en paralelo, cada uno con 3 colectores serie.
- Caso 4: Este caso corresponde a la situación real del sistema, consiste en 3 arreglos de colectores conectados en paralelo donde dos de ellos poseen 3 colectores en serie y uno posee 4 colectores en serie.

Para comparar los casos presentados se utiliza la simulación del modelo durante la semana de registro. En la Figura 5.6 se puede apreciar el efecto sobre la temperatura máxima a la salida del sistema de colección al considerar los casos mencionados anteriormente.



**Figura 5.6: Temperatura máxima a la salida de los colectores**

Al observar la Figura 5.6 se aprecia un incremento en la temperatura de salida al aumentar la cantidad de colectores en serie en cada arreglo del sistema. Sin embargo, se puede determinar que desde el Caso 2 en adelante el incremento es cada vez menor, situación que se explica por el aumento en la temperatura de entrada de los colectores pertenecientes al arreglo en serie, por lo

que se desplaza la operación de éstos hacia la derecha de la curva de rendimiento (ver Figura 2.6). Lo anterior significa un aumento del coeficiente de pérdidas térmicas que llega a ser comparable con respecto al incremento de temperatura del fluido caloportador, este equilibrio reduce el aporte energético de los últimos colectores del arreglo.

Luego, del análisis realizado a la Figura 5.6, se puede obtener que el uso de 4 colectores en serie, como se presenta en el Caso 4, no significa un incremento considerable en la energía aportada con respecto al uso de 3 colectores, como se presenta en el Caso 3. Asimismo, si además se incluye un análisis que contabilice la inversión necesaria con respecto a la ganancia energética, es posible determinar que el Caso 2 sea el óptimo para un sistema de colección solar típico.

Por otro lado, entre las medidas no invasivas que se pueden tomar para aumentar el rendimiento de los colectores ya instalados en la vivienda se encuentran las siguientes:

- Optimizar el sistema de control. Ya se observó anteriormente que al modificar el sistema de control se puede aumentar el rendimiento de la instalación captadora, haciendo mejor uso de la curva que describe el rendimiento de estos equipos.
- Mantenimiento periódico. Verificar el estado de los colectores es una de las herramientas más importantes para evitar la pérdida de rendimiento de estos. Acciones tan simples como limpiar la superficie de la cubierta de vidrio pueden ser relevantes para mantener el funcionamiento óptimo de los colectores.

Otra medida que aumenta la energía aportada por el sistema de colección, aunque requiere una mayor inversión, consiste en la utilización de un sistema de seguimiento, el cual permite aumentar la energía solar disponible al mantener la superficie de colección en dirección hacia el sol. Como ejemplo de lo anterior, en la Tabla 5.5 se presenta una comparación entre los resultados obtenidos de la simulación del SST original y los resultados obtenidos al utilizar colectores con seguimiento del sol.

**Tabla 5.5: Comparación uso de seguimiento en sistema de colección**

| Aporte energético [kWh] | Sistema sin seguimiento | Sistema con seguimiento |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Colectores              | 160,05                  | 176,13                  |
| EACS                    | 38,53                   | 42,40                   |
| EAC                     | 32,44                   | 35,70                   |
| IC                      | 40,16                   | 44,19                   |

En relación a los resultados anteriores se puede deducir que el sistema con seguimiento del sol posee la capacidad de captar un 10,04% más de energía durante la semana de registro en



comparación con el sistema sin seguimiento, lo que significa 11,16[kWh] adicionales en el aporte de energía a los distintos sistemas durante dicha semana.

Por último, una alternativa que no se puede descartar es el cambio del tipo de colectores por unos de mejor rendimiento. En este contexto, los colectores planos con cubierta son de los más utilizados en las instalaciones solares domiciliarias, presentando una buena relación entre su rendimiento, costo y mantención. Por otro lado, si se desea obtener un mayor rendimiento se puede optar por otros tipos de colectores como los que utilizan tubos al vacío, los cuales reducen las pérdidas con el ambiente en condiciones más extremas pero requieren de mayor inversión en su mantenimiento y reparación.

Las dos últimas medidas que permiten mejorar el rendimiento de la batería de colectores pueden significar un mayor gasto y acciones invasivas sobre el SST instalado, lo que incide negativamente en la conveniencia de aplicarlas en el sistema.

### 5.3.2.3 Estanques de Acumulación

Los estanques de acumulación son uno de los elementos principales en el SST debido a que la energía solar no siempre está disponible cuando se requiere. Por este motivo es necesario contar con un buen sistema de acumulación que garantice los requerimientos energéticos para los cuales se diseñó el SST. De esta forma, para diseñar un sistema de acumulación deben tenerse presentes los siguientes factores:

- Nivel de cobertura con energía solar. La cantidad de aporte energético que se desea de una instalación influye directamente en el tamaño de la acumulación que se debe instalar. De esta forma, a mayor nivel de cobertura mayor debe ser el sistema de acumulación.
- Perfil de consumo: El flujo másico que se extrae del estanque define en gran parte su diseño, debiendo este ofrecer la capacidad de absorber el consumo. De esta forma, mientras más heterogéneo es el perfil de consumo mayor debe ser la capacidad de acumulación.
- Estratificación: La estratificación es un mecanismo que permite aumentar el rendimiento de los estanques al mantener temperaturas bajas en su parte inferior, lo que enfría el fluido que se dirige a los colectores, y temperaturas altas en su parte superior, zona en la cual se extrae el agua de consumo. De esta forma, se permite aumentar el rendimiento del sistema al extraer al agua más cálida del estanque y al enfriar el fluido que ingresa a los colectores.

En relación a lo anterior, los estanques utilizados en la vivienda están diseñados con una cubierta de aislación térmica que reduce las pérdidas al ambiente y que permite aprovechar la estratificación de temperatura para la cual también se diseñaron.

5.3.2.4 Sistema de Tuberías.

El sistema de tuberías puede ser una de las partes más sencillas de la instalación pero influye de forma importante si no se toman algunas precauciones. En este sentido, tuberías mal diseñadas pueden afectar enormemente el rendimiento del sistema principalmente por las pérdidas térmicas al ambiente. Por este motivo las tuberías utilizadas en la mayoría de los SST, incluyendo el analizado, se encuentran completamente aisladas, teniendo siempre el resguardo de reducir su longitud al mínimo posible.

Para ejemplificar lo anteriormente planteado, en la Tabla 5.6 se presentan los resultados de la simulación del modelo del circuito primario considerando la aislación que posee el SST y sin ella.

**Tabla 5.6: Comparación uso de aislación en tuberías**

| Aporte energético [ <i>kWh</i> ] | Tuberías con aislación | Tuberías sin aislación |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| EACS                             | 38,53                  | 34,68                  |
| EAC                              | 32,44                  | 29,2                   |
| IC                               | 40,16                  | 36,14                  |

De lo anterior se puede deducir que al correr el modelo sin la aislación de las tuberías la energía aportada se redujo en aproximadamente un 10% para cada sistema. Esto produce una caída en el rendimiento global desde un 23,78% a un 21,4%, lo que significa pérdidas de energía del orden de 1,6[*kWh*] diarios.

## Capítulo 6

### Conclusiones y Recomendaciones

Para desarrollar el presente capítulo primero se exponen las conclusiones que se derivan del desarrollo del trabajo y luego se presenta una sección con recomendaciones para replicar la experiencia realizada.

#### 6.1 Conclusiones

Durante el desarrollo del trabajo de título se aplicó exitosamente la metodología planteada para realizar las tareas requeridas, cumpliéndose los objetivos impuestos para cada una de ellas. De esta forma, se logró abarcar completamente el objetivo general del trabajo, estudiando con gran profundidad el circuito primario del SST por medio de la medición de su comportamiento y de la simulación de su modelo.

A continuación se expone de forma general el cumplimiento de los distintos puntos expuestos en la metodología de trabajo, destacando las principales conclusiones que se derivan de ellos:

1. Analizar el diseño e instalación del SST:

Se recopiló con éxito toda la información necesaria para conocer detalladamente los equipos instalados y su funcionamiento, identificando la lógica de control del sistema, los puntos específicos en los cuales se miden las variables de control y los puntos específicos en los que se registra información importante. En este contexto, se desprenden las siguientes conclusiones:

- a. El sistema cuenta con todos los elementos necesarios para confeccionar un SST funcional.
- b. Con la información recopilada se logró crear una versión inicial del modelo computacional que representa el circuito primario del SST.
- c. Es posible identificar la ausencia de válvulas de corte a la entrada y salida de la mayoría de los componentes, esto hace más difícil la detención del sistema durante los períodos de mantención, produciéndose mayores pérdidas de fluido caloportador durante dichos períodos.

2. Registrar y analizar información relevante al funcionamiento del SST:

Se recopiló toda la información disponible para caracterizar el funcionamiento real del SST durante el período de una semana, abarcando registro de variables climáticas y variables del sistema. Con esta información, se analizó el comportamiento de los sistemas de la vivienda frente a las distintas condiciones meteorológicas presentadas, extrayéndose las siguientes conclusiones:

- a. El registro de datos climatológicos y de funcionamiento del sistema se comportan según lo esperado, observándose la existencia de cierto nivel de dependencia entre dichas variables.
- b. El sistema de control funciona de acuerdo a lo establecido en su lógica de funcionamiento.
- c. Existe dependencia entre el accionamiento de elementos externos al circuito primario (Bomba de Calor y Resistencia Eléctrica) y las temperaturas de registro y control cercanas a éstos. La relevancia de dicha dependencia radica en la medición de variables de control, cuyos valores determinan el comportamiento del sistema en base a las condiciones de operación.

3. Desarrollar un modelo válido del circuito primario del SST:

Se logró ajustar el modelo inicial, creado en base al levantamiento de equipos, debiéndose realizar pruebas iterativas en las cuales se modificó el código fuente del programa. En este sentido, la creación del modelo se logró gracias a la capacidad que ofrece TRNSYS de utilizar el código de sus componentes a los gustos del usuario, obteniéndose un modelo válido del circuito primario del sistema con diferencias menores al 20% en la simulación de las variables reales de éste.

Por otro lado, el proceso de validación permitió observar como el accionamiento de los sistemas auxiliares de calor, que pertenecen al circuito ACS y de calefacción, incrementan de forma anormal las temperaturas registradas del circuito primario. Por este motivo las variables de control se ven afectadas, generándose un comportamiento anormal del sistema al existir error asociado a la medición de éstas. De este proceso se derivan las siguientes conclusiones generales:

- a. No es suficiente utilizar la información recabada en el levantamiento de equipos para generar un modelo válido del sistema, requiriéndose de un amplio registro de variables para ajustarlo al comportamiento real de la vivienda.
- b. Para lograr una mejor representación del sistema es necesario registrar variables del entorno de éste, con el objetivo de incluir en el modelo correlaciones entre el funcionamiento de elementos externos y el comportamiento del sistema a modelar.

4. Determinar consumos y aportes energéticos:

En base a cálculos específicos se logró caracterizar el sistema analizando los aportes energéticos y consumos, proveyéndose de información relevante al funcionamiento de la vivienda.

Adicionalmente, se utilizó el modelo computacional para caracterizar, en función de los mismos cálculos, el circuito primario durante la semana de registro. De esta forma, los principales resultados y conclusiones son:

- a. El rendimiento real del SST durante la semana de registro se sitúa alrededor del 26%, lo que significa un aporte del sistema solar que asciende a 123,1[kWh] semanales. El bajo rendimiento se explica por realizarse el cálculo en una semana de invierno, donde las pérdidas térmicas del sistema se incrementan y se reducen las ganancias.
- b. El rendimiento simulado del SST durante la semana de registro se sitúa alrededor del 24%, lo que significa un aporte del sistema solar que asciende a 111,6[kWh] semanales. La diferencia de los resultados simulados y reales en los cálculos energéticos no son mayores al 10%, por lo que la aproximación del modelo es bastante acertada.
- c. El uso de energía solar permite evitar emisiones de CO<sub>2</sub> que se producen al utilizar sistemas con combustibles convencionales como el gas natural. En este contexto, el sistema de la vivienda lograr evitar alrededor de 25 kilogramos de CO<sub>2</sub> semanales sin mayores pérdidas de confort en comparación al uso del combustible mencionado.

Luego, y gracias al uso de bases de datos climatológicas, se recreó el funcionamiento del sistema durante el período de un año, obteniéndose rendimientos globales del orden del 42% y realizándose un aporte solar cercano a 7650[kWh] durante este período, lo que significa 1,6 toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas. De estos resultados se desprende lo siguiente:

- a. El aumento en el rendimiento global del sistema corresponde a la consideración de período anual, lo que incluye situaciones más favorables para el funcionamiento del SST, marcadas por la disminución de las pérdidas térmicas del sistema de colección.
- b. El uso de sistemas solares similares al estudiado permite una importante reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que significa un aporte al medio ambiente si se considera uso masivo de este tipo de sistemas en las viviendas. De esta forma, los resultados obtenidos son cada vez más atractivos para una población con una preocupación creciente en el cuidado del medio ambiente, situación que significa un aumento constante en la demanda de estos sistemas.

##### 5. Proponer y evaluar mejoras al SST:

Se utilizó favorablemente el registro de datos y el modelo computacional para recrear soluciones que permiten mejorar las prestaciones del sistema, haciendo hincapié en las que no consisten en una acción invasiva sobre las instalaciones de la vivienda. Luego de identificar los puntos más sensibles del circuito la propuesta de alternativas se focalizó en la optimización del sistema de control, batería de colectores, estanques acumuladores y sistema de tuberías, lográndose generar

alternativas que permiten aumentar la energía aportada, además de hacer más estable el sistema. En este contexto, las conclusiones que se derivan del análisis realizado sobre el sistema de control son:

- a. La lógica de control propuesta permite aumentar el rendimiento semanal del SST desde un 24% a un 26%, lo que significa que la lógica de control establecida en el SST no facilita que el sistema opere en su óptimo.
- b. El aumento en la estabilidad no influye mayormente en el rendimiento del sistema si se aplican en conjunto las medidas propuestas. Adicionalmente, mayor estabilidad permite reducir el número de detenciones por mantención y/o reparación de componentes.

Por otro lado, del análisis de sensibilidad realizado sobre la cantidad de colectores en serie que poseen los arreglos se concluye que:

- a. El uso de más de tres colectores en serie no mejora el rendimiento del sistema. Esta situación se explica por el reducido incremento de temperatura que se produce al considerar cuatro colectores en uno de los arreglos del sistema, tal como en la situación real de la vivienda.
- b. Si se realiza un análisis económico sobre la inversión es posible obtener que la instalación óptima del sistema corresponde a dos colectores solares en serie para los tres arreglos de la vivienda (los cuales están conectados en paralelo). Esto se deba a que el aumento de la temperatura a la salida de los colectores, al conectar 3 arreglos de 3 en serie, puede no suplir la inversión necesaria para realizar dicha instalación.

Del análisis cualitativo realizado sobre los estanques de acumulación y del estudio del comportamiento del modelo confeccionado para este equipo se desprende que:

- a. El tamaño de los estanques depende del nivel de cobertura que se desea del sistema y del comportamiento del flujo másico de extracción, debiéndose tener la capacidad de absorber el consumo de agua caliente.
- b. La estratificación eleva el rendimiento del sistema al extraerse agua más caliente y al enfriar el fluido que se dirige hacia los colectores, lo que incrementa el rendimiento de estos al desplazar su operación hacia la izquierda de la respectiva curva. (Ver Figura 2.6)

Por último, en relación al análisis del sistema de tuberías se obtiene que:

- a. El diseño del SST debe considerar que la longitud del piping sea la menor posible.
- b. El uso de aislación en el sistema de tuberías es importante para reducir las pérdidas al exterior, siendo una herramienta relativamente fácil de utilizar y muy efectiva para mejorar el funcionamiento del sistema.

Con lo expuesto anteriormente, se comprobó que el uso de software especializado en la simulación de este tipo de sistemas es una gran herramienta tanto para el diseño como para la evaluación de proyectos, permitiendo encontrar mejores soluciones al ofrecer la capacidad de analizar una mayor cantidad de éstas en un menor período de tiempo. En este contexto, la principal cualidad del software es permitir comparar distintas soluciones con un bajo nivel de detalle, permitiendo al usuario tomar una decisión rápida de la mejor solución al problema. Sin embargo, al utilizar esta herramienta como método de evaluación de un sistema existente, se debe ofrecer una especial atención en la modelación de la instalación que se evalúa, existiendo una fuerte dependencia entre los óptimos resultados y el nivel de detalle con el cual se realiza la simulación.

## **6.2 Recomendaciones**

En esta sección se presentan las principales recomendaciones que es posible realizar para futuros trabajos en los que se utiliza la modelación computacional para recrear el funcionamiento de un sistema real.

Primero que todo, es importante recopilar la mayor cantidad de antecedentes de los equipos del sistema que se modelará. Esto permite crear un primer modelo con alto nivel de detalle en base a los equipos instalados. El modelo debe ofrecer la capacidad de evolucionar, es decir, permitir un fácil ajuste de su programación para obtener una mejor recreación del sistema que se analiza.

Segundo, si se estudia un sistema solar con capacidad de medición es importante registrar la mayor cantidad de variables que permitan caracterizar el funcionamiento del sistema, lo que incluye posibilidad de calcular aportes energéticos y conocer el comportamiento de las variables utilizadas en el control. Esto permite ajustar con mayor nivel de detalle el modelo computacional.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta las condiciones de operación del sistema ya que estas influyen en su comportamiento. Por esta razón, puede resultar útil incluir registro de variables de los equipos externos al sistema estudiado y que cuya operación puede afectar su funcionamiento.

En relación al funcionamiento del sistema, es importante tener siempre en cuenta identificar los componentes críticos y establecer un plan de mantenimiento de éstos. Este tipo de acciones preventivas es muy útil si se desea mantener la operación del sistema en su óptimo y evitar fallas que generen una detención inesperada. En este contexto, también es muy relevante operar el sistema en los parámetros para los cuales fue diseñado, siendo esta la única forma de garantizar el funcionamiento para el cual se concibió.

## Capítulo 7

### Glosario

#### Alfabético

|              |   |
|--------------|---|
| $A$          | Área de transferencia de calor [ $m^2$ ]                    |
| $A, B, C, K$ | Constantes modelo Perrin de Brichambaut. Adimensionales     |
| $C_p$        | Calor específico [ $\frac{J}{kg K}$ ]                       |
| $D$          | Radiación difusa [ $\frac{W}{m^2}$ ]                        |
| $d$          | Diámetro [ $m$ ]  |
| $E$          | Energía interna [ $J$ ]                                     |
| $e$          | Espesor [ $m$ ]   |
| $F_R$        | Factor de remoción de calor. Adimensional                   |
| $G$          | Radiación global [ $\frac{W}{m^2}$ ]                        |
| $Gr$         | Número de Grashof. Adimensional                             |
| $G_{SC}$     | Constante solar [ $\frac{W}{m^2}$ ]                         |
| $g$          | Aceleración de gravedad [ $\frac{m}{s^2}$ ]                 |
| $h$          | Coeficiente convectivo [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]                |
| $I_b$        | Radiación directa [ $\frac{W}{m^2}$ ]                       |
| $k$          | Conductividad térmica [ $\frac{W}{m K}$ ]                   |
| $L$          | Longitud [ $m$ ]  |
| $lmtd$       | Diferencia de temperatura media logarítmica [ $^{\circ}C$ ] |



|           |  |
|-----------|--|
| $m$       | Masa [ $kg$ ]  |
| $\dot{m}$ | Flujo másico [ $\frac{kg}{s}$ ]  |
| $Nu_D$    | Número de Nusselt para ductos. Adimensional  |
| $P$       | Presión [ $bar$ ]  |
| $Pr$      | Número de Prandtl. Adimensional  |
| $Q$       | Tasa de transferencia de calor o potencia térmica [ $W$ ]  |
| $q$       | Tasa de transferencia de calor por unidad de área [ $\frac{W}{m^2}$ ]                            |
| $R$       | Resistencia térmica [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]   |
| $Ra$      | Número de Rayleigh. Adimensional   |
| $Ra_c$    | Número de Rayleigh crítico. Adimensional   |
| $Re_D$    | Número de Reynolds para ductos. Adimensional   |
| $T$       | Temperatura [ $^\circ C$ ]   |
| $t$       | Tiempo [ $s$ ]   |
| $U$       | Transmitancia térmica o coeficiente de transferencia de calor [ $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ] |
| $U_L$     | Coeficiente global de pérdida de calor [ $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ]                        |
| $V$       | Volumen [ $m^3$ ]  |
| $v$       | Velocidad [ $\frac{m}{s}$ ]  |
| $W$       | Tasa de transferencia de trabajo o potencia mecánica [ $W$ ]                                     |

### Griego

|               |   |
|---------------|---|
| $\alpha_t$    | Difusividad térmica [ $\frac{m^2}{s}$ ]                               |
| $\beta$       | Coeficiente térmico de expansión volumétrica [ $\frac{1}{^\circ C}$ ] |
| $\varepsilon$ | Factor de emisividad de un cuerpo. Adimensional                       |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\varepsilon_f$ | Eficiencia   |
| $\eta$          | Rendimiento  |
| $\theta_{Az}$   | Ángulo acimutal [°]  |
| $\theta_h$      | Altura solar [°]   |
| $\mu$           | Viscosidad $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$                   |
| $\nu$           | Viscosidad cinemática $\left[\frac{m^2}{s}\right]$               |
| $\rho$          | Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$                           |
| $\sigma$        | Constante de Stefan – Boltzmann $\left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$ |
| $\tau$          | Coefficiente de transmitancia térmica. Adimensional              |

### Abreviaciones

|                 |   |
|-----------------|---|
| ACS             | Agua caliente sanitaria   |
| BC              | Bomba de Calor  |
| BCA             | Bomba de Calor Auxiliar   |
| BJ              | Bomba Jacuzzi   |
| BP              | Bomba Piscina   |
| BR1             | Bomba de recirculación circuito primario  |
| BR2             | Bomba de recirculación bomba de calor   |
| BRC             | Bomba recirculación agua calefacción  |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de carbono  |
| COP             | Coefficient Of Performance (Coeficiente de performance)                             |
| DVH             | Doble Vidriado Hermético  |
| EAC             | Estanque Agua Calefacción   |
| EIFS            | Exterior Insulation Finish System (Sistema de aislación térmica y acabado exterior) |
| EPS             | Expanded Polystyrene (Poliestireno expandido)                                       |

|      |   |
|------|---|
| ERNC | Energías renovables no convencionales   |
| IC   | Intercambiador de Calor   |
| IR   | Infrarroja  |
| NUT  | Número de unidades de transferencia. Adimensional                               |
| OSB  | Oriented Strand Board (Tablero de fibras orientadas)                            |
| PCI  | Poder Calorífico Inferior   |
| RAC  | Retorno Agua Caliente   |
| RAF  | Retorno Agua Fría   |
| SST  | Sistema solar térmico   |
| TMY  | Typical Meteorological Year (Año meteorológico típico)                          |
| UF   | Unidades de fomento   |
| UV   | Ultravioleta  |
| V1   | Válvula de tres vías estanque agua caliente sanitaria y V2                      |
| V2   | Válvula de tres vías estanque agua calefacción e Intercambiador Piscina/Jacuzzi |
| V3   | Válvula de tres vías circuito piscina jacuzzi y bomba de calor auxiliar         |

## Capítulo 8

### Referencias

- [1] ROMÁN, R. 2009. *Técnicas en Instalaciones Eléctricas con Mención en Energía Solar*. [diapositivas] Apuntes ME716: Conversión Térmica de la Energía Solar, Universidad de Chile.
- [2] DUFFIE, J.A. y BECKMAN, W.A. 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd ed. Wisconsin, John Wiley & Sons. 919p.
- [3] LOSTER, M. 2006. *Global Solar Radiation*. [en línea] <[http://www.ez2c.de/ml/solar\\_land\\_area/](http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/)> [consulta: 15 noviembre 2010]
- [4] DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. *Instrumental Meteorológico Electrónico*. [en línea] <[http://www.meteochile.gob.cl/instrumentos/inst\\_electronico.html](http://www.meteochile.gob.cl/instrumentos/inst_electronico.html)> [consulta: 30 marzo 2011]
- [5] LIENHARD (V), J.H. y LIENHARD (IV), J.H. 2001. *A Heat Transfer Textbook*. 3th ed. Massachusetts, Phlogiston Press. 705p.
- [6] FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER. 2006. Por Frank P. Incropera “et al”. 6th ed. West Sussex, John Wiley & Sons. 997p
- [7] SOMERTON C.W. *Nusselt Number Correlation*. Michigan State University[en línea] <<http://www.egr.msu.edu/~somerton/Nusselt/>> [consulta: 28 Mayo 2011]
- [8] CORONADO R., J.E. 2008. *Análisis Numérico del Flujo Energético 3D en Colectores Solares Concentradores*. Memoria de Ingeniero Civil Mecánico. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 102p.
- [9] PLATAFORMA SOLAR DE ALMERÍA (PSA). *Instalaciones de Torre con Receptor Central*. [en línea] <<http://www.psa.es>> [consulta: 15 noviembre 2010]
- [10] ARANEDA H., S.A. 2008. *Diseño de Banco de Ensayos para Homologación de Colectores Solares*. Memoria de Ingeniero Civil Mecánico. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 125p.

- [11] SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS: MANUAL DE DISEÑO PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA. 2007. Por Roberto Román “et al”. Santiago, Corporación del Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción. 141p.
- [12] GORENJE GROUP. 2006. *Solar Collector SI-SOL ST*. [en línea] : <<http://en.gorenjetiki.si/21054>> [consulta: 11 noviembre 2010]
- [13] JARAMILLO, O.A. 2007. *Intercambiadores de Calor*. Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. 33p.
- [14] WIKIPEDIA. *Imagen intercambiadores de calor*. [en línea] <[http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_exchanger](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger)> [consulta: 1 junio 2011]
- [15] INDUSTRIAL QUICK SEARCH. 2009. *Recuperating Waste Heat with Heat Exchangers*. [en línea] <<http://www.iqsnewsroom.com/post/2009/06/12/Recuperating-Waste-Heat-with-Heat-Exchangers.aspx>> [consulta: 10 junio 2011]
- [16] THE ENGINEERING TOOLBOX. *Arithmetic and Logarithmic Mean Temperature Difference*. [en línea] <[http://www.engineeringtoolbox.com/arithmetic-logarithmic-mean-temperature-d\\_436.html](http://www.engineeringtoolbox.com/arithmetic-logarithmic-mean-temperature-d_436.html)> [consulta: 10 junio 2011]
- [17] FREDERICK, R. 2009. *Transferencia de Calor: Intercambio de calor entre dos fluidos*. [documento] Apuntes ME43B: Transferencia de Calor, Universidad de Chile.
- [18] SOLAR ENERGY LABORATORY. 2007. *TRNSYS 16: A Transient System Simulation Program*. [manual] University of Winsconsin-Madison. 1 manual; texto en inglés. 87p
- [19] TORREALBA R., J.A. 2009. *Análisis técnico económico de una vivienda unifamiliar de alto confort y energéticamente eficiente*. Memoria de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [20] AUSTRALIAN GOVERNMENT:YOUR HOME. *Technical Manual Home: Shading*. [en línea] <<http://www.yourhome.gov.au/technical/fs44.html>> [consulta: 30 abril 2011]
- [21] RETROFIT INSULATION. *Insulation Services: Air Sealing*. [en línea]<[http://retrofitinsulation.com/air\\_sealing.htm](http://retrofitinsulation.com/air_sealing.htm)> [consulta: 30 abril 2011]
- [22] ROMÁN, R. y CORVALÁN, R. 2003. *Técnicas Modernas de Climatización Industrial*. Santiago, Universidad de Chile, Departamento de ingeniería Mecánica.

- [23] COMERCIALIZADORA MUNDIAL. *Herramientas para E.I.F.S.* [en línea] <[http://www.comercializadoramundial.com.mx/prod\\_herr\\_iefs.html](http://www.comercializadoramundial.com.mx/prod_herr_iefs.html)> [consulta: 11 mayo 2011]
- [24] HOBBI, A y SIDDIQUI, K. 2008. *Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS*. Montreal, Concordia University, Department of Mechanical and Industrial Engineering.
- [25] THERMAL STRATIFICATION WITHIN THE WATER TANK. 2008. Por Y.M. Han “et al”. Shanghai, Shanghai Jiao Tong University, Institute of Refrigeration and Cryogenics.
- [26] CRUICKSHANK, C.A. y HARRISON, S.J. 2010. *Heat loss characteristics for typical solar domestic hot water storage*. Kingston, Queen’s University, Department of Mechanical and Materials Engineering.
- [27] NEWTON, B.J. 1995. *Modeling of Solar Storage Tanks*. Master of Science Mechanical Engineering. Wisconsin, University of Wisconsin-Madison, Department of Mechanical Engineering. 121p
- [28] TRANS ÉNERGIE. 2006. Estudio del mercado solar térmico chileno. Ecully, Francia.
- [29] WEATHERBASE *Base de datos de condiciones climáticas en ciudad de Santiago* [en línea] <<http://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=47558&refer=&cityname=Santiago-o-Chile>> [consulta: 15 septiembre 2011]
- [30] CHEMICAL ENGINEERING TOOLS AND INFORMATION. *U in Heat Exchangers* [en línea] <<http://www.cheresources.com/uexchangers.shtml>> [consulta: 22 Septiembre 2011]
- [31] EL BANCO MUNDIAL. *Emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita en distintas ciudades del mundo* [en línea] <<http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC>> [consulta: 22 Septiembre 2011]
- [32] ONG PROYECTO MEDIO AMBIENTE Y SOCIEDAD. 2007. Medio Ambiente: Recurso Agua. [en línea] <<http://www.promas.cl/agua.html>> [consulta: 18 septiembre 2011]

# Capítulo 9 Anexos

## 9.1 Anexo A: Registro Solarimétrico

**TABLA D7A** TABLA DE RADIACIÓN TOTAL HORARIA, PROMEDIO MENSUAL PARA DISTINTAS ORIENTACIONES (AZIMUT, AZ) E INCLINACIONES DE SUPERFICIES (W/m<sup>2</sup>)

LOCALIDAD: SANTIAGO  
LATTITUD: 33,45 [GRADOS] SUR

|            |      | ENERO      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|            |      | 6          | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| HORIZONTAL |      | 113,0      | 254,0 | 408,4 | 558,7 | 685,2 | 769,7 | 799,3 | 769,7 | 685,2 | 558,7 | 408,4 | 254,0 | 113,0 |
| 180        | 23   | 92,6       | 228,5 | 383,1 | 539,3 | 674,6 | 766,6 | 799,3 | 766,6 | 674,6 | 539,3 | 383,1 | 228,5 | 92,6  |
| al         | 33   | 81,6       | 211,1 | 360,2 | 512,6 | 645,8 | 737,0 | 769,4 | 737,0 | 645,8 | 512,6 | 360,2 | 211,1 | 81,6  |
| NORTE      | 43   | 77,8       | 190,6 | 331,1 | 476,0 | 603,5 | 691,3 | 722,5 | 691,3 | 603,5 | 476,0 | 331,1 | 190,6 | 77,8  |
|            | 90   | 54,5       | 109,1 | 153,2 | 209,4 | 270,8 | 313,6 | 329,0 | 313,6 | 270,8 | 209,4 | 153,2 | 109,1 | 54,5  |
| -135 NO    | 90   | 54,5       | 109,1 | 153,2 | 182,7 | 199,2 | 206,9 | 293,9 | 374,1 | 410,4 | 392,1 | 323,2 | 222,3 | 115,3 |
| 135 NE     | 90   | 115,3      | 222,3 | 323,2 | 392,1 | 410,4 | 374,1 | 293,9 | 206,9 | 199,2 | 182,7 | 153,2 | 109,1 | 54,5  |
| -90 O      | 90   | 54,5       | 109,1 | 153,2 | 182,7 | 199,2 | 206,9 | 209,1 | 336,6 | 426,2 | 452,0 | 406,4 | 305,0 | 180,9 |
| 90 E       | 90   | 180,9      | 305,0 | 406,4 | 452,0 | 426,2 | 336,6 | 209,1 | 206,9 | 199,2 | 182,7 | 153,2 | 109,1 | 54,5  |
| -45 SO     | 90   | 54,5       | 109,1 | 153,2 | 182,7 | 199,2 | 206,9 | 209,1 | 223,2 | 309,0 | 354,2 | 341,3 | 273,0 | 172,5 |
| 45 SE      | 90   | 172,5      | 273,0 | 341,3 | 354,2 | 309,0 | 223,2 | 209,1 | 206,9 | 199,2 | 182,7 | 153,2 | 109,1 | 54,5  |
| 0 SUR      | 90   | 94,9       | 145,0 | 166,0 | 182,7 | 199,2 | 206,9 | 209,1 | 206,9 | 199,2 | 182,7 | 166,0 | 145,0 | 94,9  |

|            |      | FEBRERO    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|            |      | 6          | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| HORIZONTAL |      | 65,6       | 199,5 | 350,3 | 499,7 | 626,8 | 712,2 | 742,4 | 712,2 | 626,8 | 499,7 | 350,3 | 199,5 | 65,6  |
| 180        | 23   | 56,1       | 187,8 | 341,8 | 500,5 | 639,7 | 735,2 | 769,2 | 735,2 | 639,7 | 500,5 | 341,8 | 187,8 | 56,1  |
| al         | 33   | 50,8       | 177,7 | 327,9 | 484,5 | 623,0 | 718,6 | 752,7 | 718,6 | 623,0 | 484,5 | 327,9 | 177,7 | 50,8  |
| NORTE      | 43   | 48,4       | 165,0 | 308,4 | 459,0 | 593,3 | 686,4 | 719,6 | 686,4 | 593,3 | 459,0 | 308,4 | 165,0 | 48,4  |
|            | 90   | 33,5       | 91,8  | 162,2 | 243,7 | 316,2 | 366,5 | 384,5 | 366,5 | 316,2 | 243,7 | 162,2 | 91,8  | 33,5  |
| -135 NO    | 90   | 33,5       | 91,8  | 141,3 | 175,7 | 195,3 | 231,6 | 332,6 | 406,4 | 431,2 | 396,8 | 310,8 | 197,2 | 85,8  |
| 135 NE     | 90   | 85,8       | 197,2 | 310,8 | 396,8 | 431,2 | 406,4 | 332,6 | 231,6 | 195,3 | 175,7 | 141,3 | 91,8  | 33,5  |
| -90 O      | 90   | 33,5       | 91,8  | 141,3 | 175,7 | 195,3 | 204,4 | 207,0 | 328,0 | 407,9 | 420,3 | 360,2 | 249,1 | 125,1 |
| 90 E       | 90   | 125,1      | 249,1 | 360,2 | 420,3 | 407,9 | 328,0 | 207,0 | 204,4 | 195,3 | 175,7 | 141,3 | 91,8  | 33,5  |
| -45 SO     | 90   | 33,5       | 91,8  | 141,3 | 175,7 | 195,3 | 204,4 | 207,0 | 204,4 | 260,1 | 300,5 | 281,3 | 208,8 | 110,8 |
| 45 SE      | 90   | 110,8      | 208,8 | 281,3 | 300,5 | 260,1 | 204,4 | 207,0 | 204,4 | 195,3 | 175,7 | 141,3 | 91,8  | 33,5  |
| 0 SUR      | 90   | 51,2       | 100,0 | 141,3 | 175,7 | 195,3 | 204,4 | 207,0 | 204,4 | 195,3 | 175,7 | 141,3 | 100,0 | 51,2  |

|            |      | MARZO      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|------------|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|            |      | 6          | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18   |
| HORIZONTAL |      | 10,3       | 118,6 | 245,8 | 375,1 | 487,0 | 563,0 | 589,9 | 563,0 | 487,0 | 375,1 | 245,8 | 118,6 | 10,3 |
| 180        | 23   | 9,5        | 117,1 | 247,7 | 385,4 | 508,4 | 593,7 | 624,2 | 593,7 | 508,4 | 385,4 | 247,7 | 117,1 | 9,5  |
| al         | 33   | 8,9        | 113,7 | 242,1 | 378,8 | 502,0 | 588,1 | 619,0 | 588,1 | 502,0 | 378,8 | 242,1 | 113,7 | 8,9  |
| NORTE      | 43   | 8,5        | 108,7 | 232,7 | 365,8 | 486,4 | 571,0 | 601,5 | 571,0 | 486,4 | 365,8 | 232,7 | 108,7 | 8,5  |
|            | 90   | 5,8        | 70,2  | 149,8 | 234,1 | 309,6 | 362,2 | 381,1 | 362,2 | 309,6 | 234,1 | 149,8 | 70,2  | 5,8  |
| -135 NO    | 90   | 5,8        | 62,6  | 119,1 | 165,0 | 195,8 | 263,0 | 333,1 | 373,6 | 367,6 | 311,6 | 219,5 | 116,8 | 28,6 |
| 135 NE     | 90   | 28,6       | 116,8 | 219,5 | 311,6 | 367,6 | 373,6 | 333,1 | 263,0 | 195,8 | 165,0 | 119,1 | 62,6  | 5,8  |
| -90 O      | 90   | 5,8        | 62,6  | 119,1 | 165,0 | 195,8 | 212,3 | 217,4 | 290,6 | 324,9 | 303,3 | 230,3 | 131,7 | 39,3 |
| 90 E       | 90   | 39,3       | 131,7 | 230,3 | 303,3 | 324,9 | 290,6 | 217,4 | 212,3 | 195,8 | 165,0 | 119,1 | 62,6  | 5,8  |
| -45 SO     | 90   | 5,8        | 62,6  | 119,1 | 165,0 | 195,8 | 212,3 | 217,4 | 212,3 | 206,6 | 214,0 | 176,1 | 106,1 | 30,4 |
| 45 SE      | 90   | 30,4       | 106,1 | 176,1 | 214,0 | 206,6 | 212,3 | 217,4 | 212,3 | 195,8 | 165,0 | 119,1 | 62,6  | 5,8  |
| 0 SUR      | 90   | 7,0        | 62,6  | 119,1 | 165,0 | 195,8 | 212,3 | 217,4 | 212,3 | 195,8 | 165,0 | 119,1 | 62,6  | 7,0  |

|            |      | ABRIL      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |    |
|------------|------|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |    |
|            |      | 6          | 7    | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17   | 18 |
| HORIZONTAL |      |            | 51,6 | 155,0 | 264,2 | 360,7 | 427,0 | 450,7 | 427,0 | 360,7 | 264,2 | 155,0 | 51,6 |    |
| 180        | 23   |            | 53,2 | 159,8 | 276,6 | 383,5 | 458,9 | 486,1 | 458,9 | 383,5 | 276,6 | 159,8 | 53,2 |    |
| al         | 33   |            | 52,7 | 158,0 | 274,8 | 382,7 | 459,3 | 487,1 | 459,3 | 382,7 | 274,8 | 158,0 | 52,7 |    |
| NORTE      | 43   |            | 51,5 | 153,9 | 268,5 | 375,3 | 451,4 | 479,1 | 451,4 | 375,3 | 268,5 | 153,9 | 51,5 |    |
|            | 90   |            | 37,7 | 109,3 | 189,6 | 264,1 | 317,0 | 336,2 | 317,0 | 264,1 | 189,6 | 109,3 | 37,7 |    |
| -135 NO    | 90   |            | 29,0 | 82,3  | 130,5 | 178,8 | 243,1 | 294,2 | 314,5 | 291,8 | 228,3 | 141,6 | 56,5 |    |
| 135 NE     | 90   |            | 56,5 | 141,6 | 228,3 | 291,8 | 314,5 | 294,2 | 243,1 | 178,8 | 130,5 | 82,3  | 29,0 |    |
| -90 O      | 90   |            | 29,0 | 82,3  | 130,5 | 165,9 | 186,5 | 193,0 | 236,9 | 245,8 | 209,8 | 139,1 | 59,2 |    |
| 90 E       | 90   |            | 59,2 | 139,1 | 209,8 | 245,8 | 236,9 | 193,0 | 186,5 | 165,9 | 130,5 | 82,3  | 29,0 |    |
| -45 SO     | 90   |            | 29,0 | 82,3  | 130,5 | 165,9 | 186,5 | 193,0 | 186,5 | 165,9 | 144,8 | 103,3 | 44,1 |    |
| 45 SE      | 90   |            | 44,1 | 103,3 | 144,8 | 165,9 | 186,5 | 193,0 | 186,5 | 165,9 | 130,5 | 82,3  | 29,0 |    |
| 0 SUR      | 90   |            | 29,0 | 82,3  | 130,5 | 165,9 | 186,5 | 193,0 | 186,5 | 165,9 | 130,5 | 82,3  | 29,0 |    |



**TABLA D7B TABLA DE RADIACIÓN TOTAL HORARIA, PROMEDIO MENSUAL PARA DISTINTAS ORIENTACIONES (AZIMUT, AZ) E INCLINACIONES DE SUPERFICIES (W/m<sup>2</sup>)**

LOCALIDAD: SANTIAGO  
LATITUD: 33,45 [GRADOS] SUR

|            |      | MAYO       |      |      |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |
|------------|------|------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|----|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |      |      |       |       |       |       |       |       |       |      |      |    |
|            |      | 6          | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16   | 17   | 18 |
| HORIZONTAL |      |            | 8,4  | 78,7 | 156,0 | 225,9 | 274,6 | 292,0 | 274,6 | 225,9 | 156,0 | 78,7 | 8,4  |    |
| 180        | 23   |            | 9,4  | 79,5 | 158,2 | 231,2 | 283,1 | 301,8 | 283,1 | 231,2 | 158,2 | 79,5 | 9,4  |    |
| al         | 33   |            | 9,6  | 78,1 | 155,6 | 228,1 | 280,0 | 298,8 | 280,0 | 228,1 | 155,6 | 78,1 | 9,6  |    |
| NORTE      | 43   |            | 9,7  | 75,7 | 151,0 | 221,9 | 272,8 | 291,3 | 272,8 | 221,9 | 151,0 | 75,7 | 9,7  |    |
|            | 90   |            | 8,2  | 54,1 | 107,3 | 157,8 | 194,4 | 207,7 | 194,4 | 157,8 | 107,3 | 54,1 | 8,2  |    |
| -135 NO    | 90   |            | 4,9  | 45,5 | 87,8  | 131,8 | 169,7 | 192,2 | 191,1 | 163,8 | 116,0 | 61,0 | 12,5 |    |
| 135 NE     | 90   |            | 12,5 | 61,0 | 116,0 | 163,8 | 191,1 | 192,2 | 169,7 | 131,8 | 87,8  | 45,5 | 4,9  |    |
| -90 O      | 90   |            | 4,9  | 45,5 | 87,8  | 123,4 | 146,6 | 154,5 | 161,8 | 146,1 | 108,3 | 58,8 | 12,4 |    |
| 90 E       | 90   |            | 12,4 | 58,8 | 108,3 | 146,1 | 161,8 | 154,5 | 146,6 | 123,4 | 87,8  | 45,5 | 4,9  |    |
| -45 SO     | 90   |            | 4,9  | 45,5 | 87,8  | 123,4 | 146,6 | 154,5 | 146,6 | 123,4 | 88,5  | 48,8 | 7,9  |    |
| 45 SE      | 90   |            | 7,9  | 48,8 | 88,5  | 123,4 | 146,6 | 154,5 | 146,6 | 123,4 | 87,8  | 45,5 | 4,9  |    |
| 0 SUR      | 90   |            | 4,9  | 45,5 | 87,8  | 123,4 | 146,6 | 154,5 | 146,6 | 123,4 | 87,8  | 45,5 | 4,9  |    |

|            |      | JUNIO      |   |      |       |       |       |       |       |       |       |      |    |    |
|------------|------|------------|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----|----|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |   |      |       |       |       |       |       |       |       |      |    |    |
|            |      | 6          | 7 | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16   | 17 | 18 |
| HORIZONTAL |      |            |   | 50,6 | 112,4 | 169,1 | 208,8 | 223,0 | 208,8 | 169,1 | 112,4 | 50,6 |    |    |
| 180        | 23   |            |   | 50,7 | 112,2 | 169,5 | 210,3 | 225,0 | 210,3 | 169,5 | 112,2 | 50,7 |    |    |
| al         | 33   |            |   | 49,7 | 109,8 | 166,1 | 206,3 | 220,9 | 206,3 | 166,1 | 109,8 | 49,7 |    |    |
| NORTE      | 43   |            |   | 48,1 | 106,0 | 160,5 | 199,6 | 213,9 | 199,6 | 160,5 | 106,0 | 48,1 |    |    |
|            | 90   |            |   | 34,3 | 74,4  | 112,7 | 140,4 | 150,5 | 140,4 | 112,7 | 74,4  | 34,3 |    |    |
| -135 NO    | 90   |            |   | 29,7 | 65,6  | 101,3 | 129,3 | 143,2 | 138,5 | 114,8 | 77,9  | 37,4 |    |    |
| 135 NE     | 90   |            |   | 37,4 | 77,9  | 114,8 | 138,5 | 143,2 | 129,3 | 101,3 | 65,6  | 29,7 |    |    |
| -90 O      | 90   |            |   | 29,7 | 65,3  | 96,8  | 118,1 | 125,6 | 124,6 | 106,3 | 73,9  | 36,0 |    |    |
| 90 E       | 90   |            |   | 36,0 | 73,9  | 106,3 | 124,6 | 125,6 | 118,1 | 96,8  | 65,3  | 29,7 |    |    |
| -45 SO     | 90   |            |   | 29,7 | 65,3  | 96,8  | 118,1 | 125,6 | 118,1 | 96,8  | 65,3  | 30,9 |    |    |
| 45 SE      | 90   |            |   | 30,9 | 65,3  | 96,8  | 118,1 | 125,6 | 118,1 | 96,8  | 65,3  | 29,7 |    |    |
| 0 SUR      | 90   |            |   | 29,7 | 65,3  | 96,8  | 118,1 | 125,6 | 118,1 | 96,8  | 65,3  | 29,7 |    |    |

|            |      | JULIO      |     |      |       |       |       |       |       |       |       |      |     |    |
|------------|------|------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|----|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |     |      |       |       |       |       |       |       |       |      |     |    |
|            |      | 6          | 7   | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16   | 17  | 18 |
| HORIZONTAL |      |            | 0,5 | 64,1 | 135,1 | 199,7 | 244,9 | 261,1 | 244,9 | 199,7 | 135,1 | 64,1 | 0,5 |    |
| 180        | 23   |            | 1,6 | 64,8 | 136,6 | 203,6 | 251,3 | 268,6 | 251,3 | 203,6 | 136,6 | 64,8 | 1,6 |    |
| al         | 33   |            | 2,0 | 63,6 | 134,2 | 200,6 | 248,2 | 265,5 | 248,2 | 200,6 | 134,2 | 63,6 | 2,0 |    |
| NORTE      | 43   |            | 2,4 | 61,7 | 130,2 | 194,9 | 241,6 | 258,6 | 241,6 | 194,9 | 130,2 | 61,7 | 2,4 |    |
|            | 90   |            | 3,2 | 44,3 | 92,6  | 138,9 | 172,5 | 184,8 | 172,5 | 138,9 | 92,6  | 44,3 | 3,2 |    |
| -135 NO    | 90   |            | 0,3 | 37,3 | 77,0  | 118,4 | 152,7 | 172,0 | 169,4 | 143,0 | 99,0  | 49,4 | 6,7 |    |
| 135 NE     | 90   |            | 6,7 | 49,4 | 99,0  | 143,0 | 169,4 | 172,0 | 152,7 | 118,4 | 77,0  | 37,3 | 0,3 |    |
| -90 O      | 90   |            | 0,3 | 37,3 | 76,9  | 111,0 | 133,4 | 141,2 | 145,2 | 128,4 | 92,5  | 47,4 | 6,4 |    |
| 90 E       | 90   |            | 6,4 | 47,4 | 92,5  | 128,4 | 145,2 | 141,2 | 133,4 | 111,0 | 76,9  | 37,3 | 0,3 |    |
| -45 SO     | 90   |            | 0,3 | 37,3 | 76,9  | 111,0 | 133,4 | 141,2 | 133,4 | 111,0 | 76,9  | 39,5 | 2,5 |    |
| 45 SE      | 90   |            | 2,5 | 39,5 | 76,9  | 111,0 | 133,4 | 141,2 | 133,4 | 111,0 | 76,9  | 37,3 | 0,3 |    |
| 0 SUR      | 90   |            | 0,3 | 37,3 | 76,9  | 111,0 | 133,4 | 141,2 | 133,4 | 111,0 | 76,9  | 37,3 | 0,3 |    |

|            |      | AGOSTO     |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |    |
|------------|------|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |    |
|            |      | 6          | 7    | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17   | 18 |
| HORIZONTAL |      |            | 27,6 | 110,4 | 199,3 | 278,6 | 333,4 | 352,9 | 333,4 | 278,6 | 199,3 | 110,4 | 27,6 |    |
| 180        | 23   |            | 28,4 | 111,6 | 203,3 | 287,4 | 346,7 | 368,2 | 346,7 | 287,4 | 203,3 | 111,6 | 28,4 |    |
| al         | 33   |            | 28,1 | 109,6 | 200,2 | 284,1 | 343,7 | 365,3 | 343,7 | 284,1 | 200,2 | 109,6 | 28,1 |    |
| NORTE      | 43   |            | 27,5 | 106,2 | 194,4 | 276,6 | 335,3 | 356,7 | 335,3 | 276,6 | 194,4 | 106,2 | 27,5 |    |
|            | 90   |            | 20,4 | 75,2  | 137,1 | 195,1 | 236,6 | 251,7 | 236,6 | 195,1 | 137,1 | 75,2  | 20,4 |    |
| -135 NO    | 90   |            | 16,1 | 62,5  | 108,5 | 154,9 | 200,0 | 229,8 | 233,7 | 206,4 | 153,0 | 87,7  | 27,6 |    |
| 135 NE     | 90   |            | 27,6 | 87,7  | 153,0 | 206,4 | 233,7 | 229,8 | 200,0 | 154,9 | 108,5 | 62,5  | 16,1 |    |
| -90 O      | 90   |            | 16,1 | 62,5  | 108,5 | 145,7 | 169,0 | 176,9 | 192,9 | 182,1 | 142,8 | 85,5  | 28,1 |    |
| 90 E       | 90   |            | 28,1 | 85,5  | 142,8 | 182,1 | 192,9 | 176,9 | 169,0 | 145,7 | 108,5 | 62,5  | 16,1 |    |
| -45 SO     | 90   |            | 16,1 | 62,5  | 108,5 | 145,7 | 169,0 | 176,9 | 169,0 | 145,7 | 112,5 | 69,8  | 21,5 |    |
| 45 SE      | 90   |            | 21,5 | 69,8  | 112,5 | 145,7 | 169,0 | 176,9 | 169,0 | 145,7 | 108,5 | 62,5  | 16,1 |    |
| 0 SUR      | 90   |            | 16,1 | 62,5  | 108,5 | 145,7 | 169,0 | 176,9 | 169,0 | 145,7 | 108,5 | 62,5  | 16,1 |    |



**TABLA D7C TABLA DE RADIACIÓN TOTAL HORARIA, PROMEDIO MENSUAL PARA DISTINTAS ORIENTACIONES (AZIMUT, AZ) E INCLINACIONES DE SUPERFICIES (W/m<sup>2</sup>)**

LOCALIDAD: SANTIAGO  
LATITUD: 33,45 [GRADOS] SUR

|            |      | SEPTIEMBRE |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |    |
|------------|------|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |    |
|            |      | 6          | 7    | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17   | 18 |
| HORIZONTAL |      |            | 80,8 | 187,7 | 298,0 | 394,2 | 459,8 | 483,1 | 459,8 | 394,2 | 298,0 | 187,7 | 80,8 |    |
| 180        | 23   |            | 80,3 | 188,5 | 303,4 | 406,6 | 478,5 | 504,3 | 478,5 | 406,6 | 303,4 | 188,5 | 80,3 |    |
| al         | 33   |            | 78,3 | 184,3 | 298,1 | 400,9 | 473,0 | 499,0 | 473,0 | 400,9 | 298,1 | 184,3 | 78,3 |    |
| NORTE      | 43   |            | 75,2 | 177,7 | 288,2 | 388,8 | 459,6 | 485,1 | 459,6 | 388,8 | 288,2 | 177,7 | 75,2 |    |
|            | 90   |            | 51,1 | 119,8 | 193,4 | 259,9 | 306,5 | 323,3 | 306,5 | 259,9 | 193,4 | 119,8 | 51,1 |    |
| -135 NO    | 90   |            | 45,3 | 100,1 | 149,3 | 187,1 | 245,6 | 291,4 | 309,5 | 289,4 | 232,6 | 153,1 | 71,8 |    |
| 135 NE     | 90   |            | 71,8 | 153,1 | 232,6 | 289,4 | 309,5 | 291,4 | 245,6 | 187,1 | 149,3 | 100,1 | 45,3 |    |
| -90 O      | 90   |            | 45,3 | 100,1 | 149,3 | 185,9 | 207,5 | 214,6 | 252,7 | 258,2 | 222,9 | 155,3 | 76,9 |    |
| 90 E       | 90   |            | 76,9 | 155,3 | 222,9 | 258,2 | 252,7 | 214,6 | 207,5 | 185,9 | 149,3 | 100,1 | 45,3 |    |
| -45 SO     | 90   |            | 45,3 | 100,1 | 149,3 | 185,9 | 207,5 | 214,6 | 207,5 | 185,9 | 170,1 | 125,1 | 63,6 |    |
| 45 SE      | 90   |            | 63,6 | 125,1 | 170,1 | 185,9 | 207,5 | 214,6 | 207,5 | 185,9 | 149,3 | 100,1 | 45,3 |    |
| 0 SUR      | 90   |            | 45,3 | 100,1 | 149,3 | 185,9 | 207,5 | 214,6 | 207,5 | 185,9 | 149,3 | 100,1 | 45,3 |    |

|            |      | OCTUBRE    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|------------|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|            |      | 6          | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18   |
| HORIZONTAL |      | 38,6       | 147,2 | 271,1 | 395,0 | 500,9 | 572,4 | 597,6 | 572,4 | 500,9 | 395,0 | 271,1 | 147,2 | 38,6 |
| 180        | 23   | 35,5       | 141,9 | 266,2 | 393,9 | 506,1 | 583,2 | 610,7 | 583,2 | 506,1 | 393,9 | 266,2 | 141,9 | 35,5 |
| al         | 33   | 33,4       | 136,3 | 257,3 | 382,7 | 493,7 | 570,3 | 597,7 | 570,3 | 493,7 | 382,7 | 257,3 | 136,3 | 33,4 |
| NORTE      | 43   | 31,8       | 128,9 | 244,7 | 365,4 | 472,7 | 547,2 | 573,9 | 547,2 | 472,7 | 365,4 | 244,7 | 128,9 | 31,8 |
|            | 90   | 21,6       | 78,7  | 149,8 | 222,4 | 286,0 | 329,8 | 345,4 | 329,8 | 286,0 | 222,4 | 149,8 | 78,7  | 21,6 |
| -135 NO    | 90   | 21,6       | 78,4  | 134,8 | 181,7 | 214,6 | 256,5 | 314,3 | 346,5 | 339,7 | 291,5 | 212,5 | 122,6 | 41,6 |
| 135 NE     | 90   | 41,6       | 122,6 | 212,5 | 291,5 | 339,7 | 346,5 | 314,3 | 256,5 | 214,6 | 181,7 | 134,8 | 78,4  | 21,6 |
| -90 O      | 90   | 21,6       | 78,4  | 134,8 | 181,7 | 214,6 | 233,1 | 239,0 | 296,7 | 320,2 | 296,4 | 229,7 | 140,6 | 54,5 |
| 90 E       | 90   | 54,5       | 140,6 | 229,7 | 296,4 | 320,2 | 296,7 | 239,0 | 233,1 | 214,6 | 181,7 | 134,8 | 78,4  | 21,6 |
| -45 SO     | 90   | 21,6       | 78,4  | 134,8 | 181,7 | 214,6 | 233,1 | 239,0 | 233,1 | 238,7 | 234,0 | 191,3 | 122,2 | 48,1 |
| 45 SE      | 90   | 48,1       | 122,2 | 191,3 | 234,0 | 238,7 | 233,1 | 239,0 | 233,1 | 214,6 | 181,7 | 134,8 | 78,4  | 21,6 |
| 0 SUR      | 90   | 26,2       | 78,4  | 134,8 | 181,7 | 214,6 | 233,1 | 239,0 | 233,1 | 214,6 | 181,7 | 134,8 | 78,4  | 26,2 |

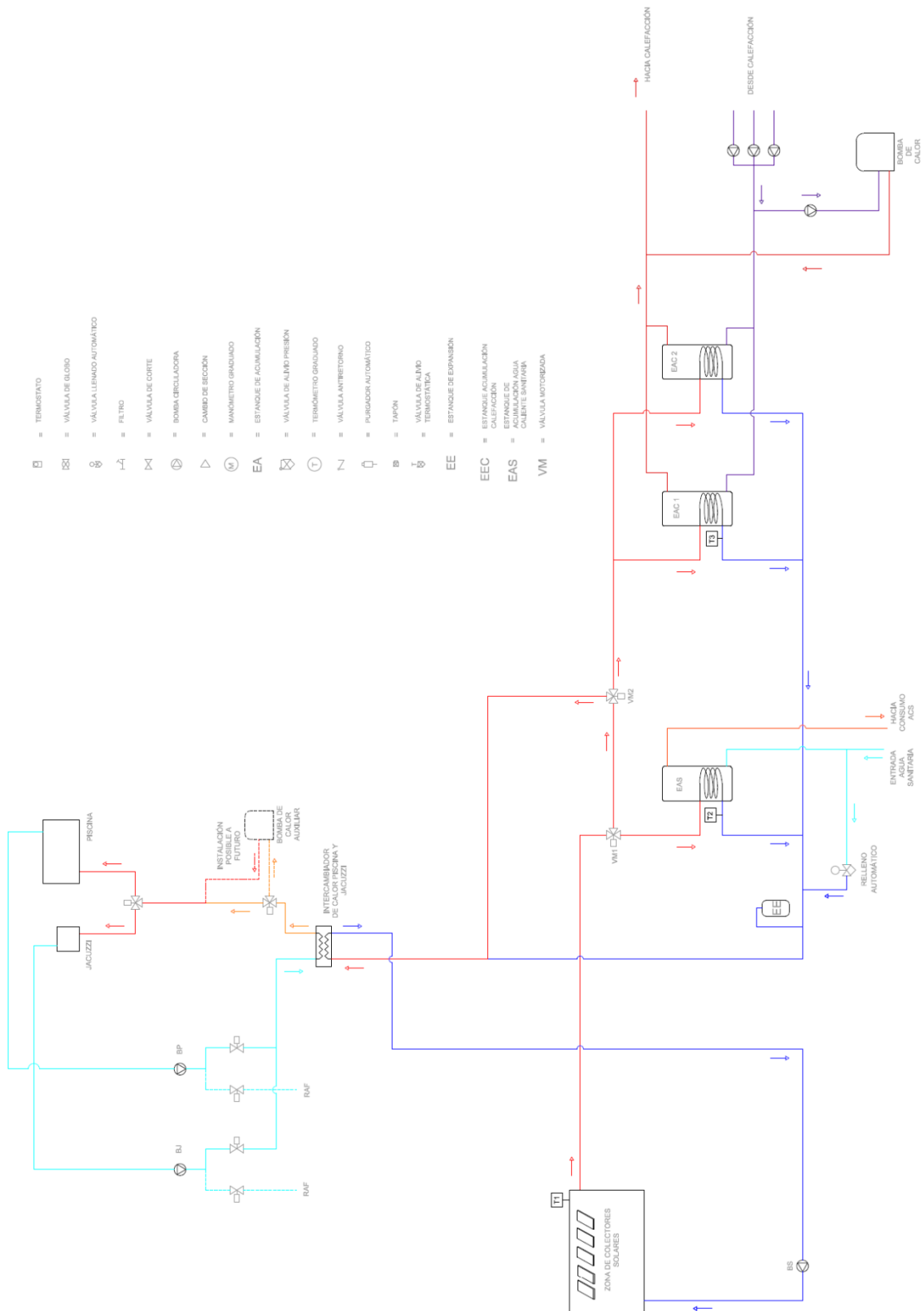
  

|            |      | NOVIEMBRE  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|            |      | 6          | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| HORIZONTAL |      | 93,3       | 223,9 | 367,8 | 508,7 | 627,5 | 707,0 | 735,0 | 707,0 | 627,5 | 508,7 | 367,8 | 223,9 | 93,3  |
| 180        | 23   | 80,1       | 206,3 | 350,1 | 495,5 | 621,7 | 707,7 | 738,2 | 707,7 | 621,7 | 495,5 | 350,1 | 206,3 | 80,1  |
| al         | 33   | 72,6       | 193,4 | 332,4 | 474,3 | 598,4 | 683,6 | 713,9 | 683,6 | 598,4 | 474,3 | 332,4 | 193,4 | 72,6  |
| NORTE      | 43   | 69,2       | 177,8 | 309,2 | 444,4 | 563,4 | 645,4 | 674,7 | 645,4 | 563,4 | 444,4 | 309,2 | 177,8 | 69,2  |
|            | 90   | 47,9       | 104,9 | 154,4 | 221,5 | 282,0 | 323,8 | 338,7 | 323,8 | 282,0 | 221,5 | 154,4 | 104,9 | 47,9  |
| -135 NO    | 90   | 47,9       | 104,9 | 154,4 | 190,4 | 212,5 | 223,6 | 306,0 | 368,3 | 389,1 | 360,0 | 287,3 | 189,9 | 91,7  |
| 135 NE     | 90   | 91,7       | 189,9 | 287,3 | 360,0 | 389,1 | 368,3 | 306,0 | 223,6 | 212,5 | 190,4 | 154,4 | 104,9 | 47,9  |
| -90 O      | 90   | 47,9       | 104,9 | 154,4 | 190,4 | 212,5 | 223,6 | 226,9 | 328,1 | 392,6 | 399,1 | 344,2 | 245,8 | 134,6 |
| 90 E       | 90   | 134,6      | 245,8 | 344,2 | 399,1 | 392,6 | 328,1 | 226,9 | 223,6 | 212,5 | 190,4 | 154,4 | 104,9 | 47,9  |
| -45 SO     | 90   | 47,9       | 104,9 | 154,4 | 190,4 | 212,5 | 223,6 | 226,9 | 226,7 | 290,7 | 316,0 | 290,0 | 219,2 | 126,6 |
| 45 SE      | 90   | 126,6      | 219,2 | 290,0 | 316,0 | 290,7 | 226,7 | 226,9 | 223,6 | 212,5 | 190,4 | 154,4 | 104,9 | 47,9  |
| 0 SUR      | 90   | 72,5       | 125,5 | 156,3 | 190,4 | 212,5 | 223,6 | 226,9 | 223,6 | 212,5 | 190,4 | 156,3 | 125,5 | 72,5  |

|            |      | DICIEMBRE  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| AZ         | INCL | HORA SOLAR |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|            |      | 6          | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| HORIZONTAL |      | 123,5      | 262,6 | 413,9 | 560,5 | 683,6 | 765,6 | 794,4 | 765,6 | 683,6 | 560,5 | 413,9 | 262,6 | 123,5 |
| 180        | 23   | 101,2      | 234,5 | 384,9 | 535,9 | 666,1 | 754,6 | 786,0 | 754,6 | 666,1 | 535,9 | 384,9 | 234,5 | 101,2 |
| al         | 33   | 89,1       | 215,9 | 360,5 | 507,3 | 635,1 | 722,4 | 753,4 | 722,4 | 635,1 | 507,3 | 360,5 | 215,9 | 89,1  |
| NORTE      | 43   | 85,0       | 194,2 | 329,9 | 468,9 | 590,9 | 674,6 | 704,4 | 674,6 | 590,9 | 468,9 | 329,9 | 194,2 | 85,0  |
|            | 90   | 59,5       | 113,4 | 157,3 | 199,9 | 257,2 | 297,0 | 311,3 | 297,0 | 257,2 | 199,9 | 157,3 | 113,4 | 59,5  |
| -135 NO    | 90   | 59,5       | 113,4 | 157,3 | 187,2 | 204,3 | 212,6 | 283,1 | 359,1 | 393,8 | 377,2 | 312,9 | 218,0 | 116,4 |
| 135 NE     | 90   | 116,4      | 218,0 | 312,9 | 377,2 | 393,8 | 359,1 | 283,1 | 212,6 | 204,3 | 187,2 | 157,3 | 113,4 | 59,5  |
| -90 O      | 90   | 59,5       | 113,4 | 157,3 | 187,2 | 204,3 | 212,6 | 214,9 | 335,4 | 419,4 | 443,1 | 399,4 | 302,8 | 184,0 |
| 90 E       | 90   | 184,0      | 302,8 | 399,4 | 443,1 | 419,4 | 335,4 | 214,9 | 212,6 | 204,3 | 187,2 | 157,3 | 113,4 | 59,5  |
| -45 SO     | 90   | 59,5       | 113,4 | 157,3 | 187,2 | 204,3 | 212,6 | 214,9 | 239,7 | 319,1 | 359,1 | 344,1 | 276,7 | 178,8 |
| 45 SE      | 90   | 178,8      | 276,7 | 344,1 | 359,1 | 319,1 | 239,7 | 214,9 | 212,6 | 204,3 | 187,2 | 157,3 | 113,4 | 59,5  |
| 0 SUR      | 90   | 103,7      | 154,9 | 179,3 | 187,2 | 204,3 | 212,6 | 214,9 | 212,6 | 204,3 | 187,2 | 179,3 | 154,9 | 103,7 |

## 9.2 Anexo B: Diagrama del SST



- ⊠ = TERMOSTATO
- ⊞ = VÁLVULA DE BLOQUEO
- ⊞ = VÁLVULA LLENADO AUTOMÁTICO
- ⊞ = FILTRO
- ⊞ = VÁLVULA DE CORTE
- ⊞ = BOMBA CIRCULADORA
- ⊞ = CAMBIO DE SECCIÓN
- ⊞ = MANÓMETRO GRADUADO
- EA = ESTANQUE DE ACUMULACIÓN
- ⊞ = VÁLVULA DE ALTA PRESIÓN
- ⊞ = TERMÓMETRO GRADUADO
- ⊞ = VÁLVULA ANTIREFRÍO
- ⊞ = PURGADOR AUTOMÁTICO
- ⊞ = TAPON
- ⊞ = VÁLVULA DE ALMID
- ⊞ = TERMOSTÁTICA
- EE = ESTANQUE DE EXPANSIÓN
- EEC = ESTANQUE DE ACUMULACIÓN CALIFACCIÓN
- EAS = ESTANQUE DE ACUMULACIÓN AGUA CALIENTE SIN TUBERÍA
- VM = VÁLVULA MOTORIZADA

DIAGRAMA HIDRÁULICO GENERAL

### 9.3 Anexo C: Colectores Solares



**CHROMAGEN**  
Sistemas De Energía Solar  
**CAPTADORES SOLARES  
SELECTIVOS DE ALTA EFICIENCIA**

NUESTRAS CERTIFICACIONES



NUESTRAS DELEGACIONES

**DELEGACION BARCELONA**  
Prol. Avda. Arrabona, 41-48  
P.I. SANTIAGA  
Barbora del Vallès  
08.010 BARCELONA  
Tfno.: (+34) 93 710 13 00  
Fax: (+34) 93 710 01 08  
barcelona@chromagen.es

**DELEGACION SEVILLA**  
C/Brújula, 9 (cra C/Fomento)  
P.I. PISA  
Marina del Aljarafe  
41.007 SEVILLA  
Tfno.: (+34) 95 410 45 41  
Fax: (+34) 95 340 05 37  
sevilla@chromagen.es

**DELEGACION CANARIAS**  
C/ Las Canarias caquina  
C/Olivos  
P.I. ARINAGA  
Agüimes  
38.118 LAS PALMAS  
Tfno.: (+34) 820 80 20 18  
canarias@chromagen.es

**6 años**

| TIPO DE CAPTADOR SOLAR                                      | CHROMAGEN CR 10-SN   | CHROMAGEN CR 12-SN   |
|---|--|--|
| <b>DIMENSIONES / PESOS</b>                                  |  |  |
| Dimensiones (mm)  | 2.190 x 1.090 x 90   | 2.190 x 1.290 x 90   |
| Superficie total (m <sup>2</sup> )                          | 2,39   | 2,83   |
| Superficie de apertura (m <sup>2</sup> )                    | 2,18   | 2,60   |
| Superficie del absorbedor (m <sup>2</sup> )                 | 2,13   | 2,54   |
| Peso en vacío (kg)  | 44,0   | 51,0   |
| Capacidad de fluido caloportador (l)                        | 4,2  | 5,0  |
| <b>PRESIONES DE PRUEBA</b>                                  |  |  |
| Presión de timbre (bar)                                     | 14,0   |  |
| Presión máxima de trabajo (bar)                             | 8,0  |  |
| Caida de presión (mm.c.a.) (q <sub>i</sub> = l/min)         | 0,375 · q <sub>i</sub> <sup>2</sup> + 1,250 · q <sub>i</sub>               | 0,100 · q <sub>i</sub> <sup>2</sup> + 2,050 · q <sub>i</sub> |
| Fluidos compatibles   | Agua o Agua con anticongelante   |  |
| <b>CALIDADES DE FABRICACIÓN</b>                             |  |  |
| Cubierta transparente                                       | Vidrio solar templado de 3,20 mm de espesor (τ = 0,91)                     |  |
| Carcasa   | Acero Inoxidable AISI 316  |  |
| Absorbedor  | Aletas de cobre ε = 0,5mm soldadas por ultrasonidos a parrilla de cobre    |  |
| Tratamiento selectivo                                       | Cromo Negro sobre base de Níquel Claro                                     |  |
| Relación en parrilla  | Colector principal Ø 23mm / Colector secundario Ø 12mm                     |  |
| Aislamiento térmico FONDO                                   | Poliuretano rígido inyectado 30mm + lámina de aluminio + Lana mineral 30mm |  |
| Aislamiento térmico LATERAL                                 | Poliuretano rígido inyectado 30mm + lámina de aluminio                     |  |
| Terminación posterior                                       | Lámina de polipropileno moldeado   |  |
| Sellado   | Esponja de EPDM  |  |
| Conexiones  | BSP hembra de ¼" en bronce (4)   |  |
| <b>CURVAS DE RENDIMIENTO ESTACIONARIO</b>                   |  |  |
| Factor óptico (η <sub>o</sub> )                             | 0,6715   | 0,7132   |
| Factor de pérdidas (α <sub>1</sub> ) W/(m <sup>2</sup> ·°K) | 3,141  | 4,396  |
| Registro I.N.T.A. DOC. N°                                   | CA/RPT/4451/010/INTA/01  | CA/RPT/4451/002/INTA/02                                      |
| Contraseña de certificación Mo. Ec.                         | NPS -0702  | NPS-0802   |

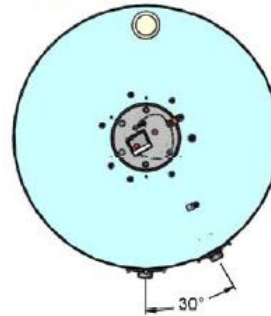
## 9.4 Anexo D: Estanques de Acumulación



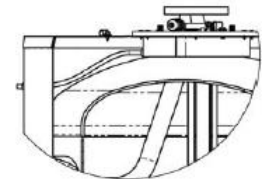
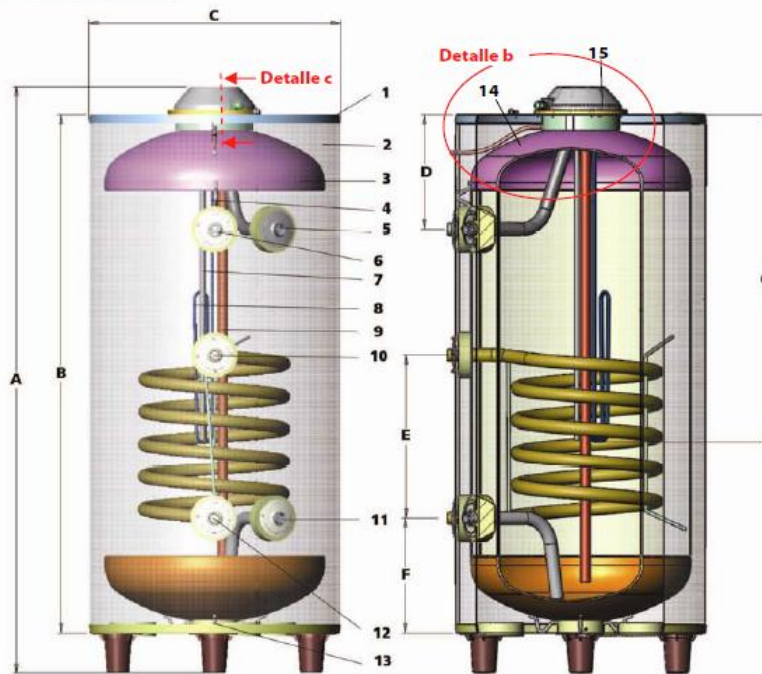
### Acumuladores verticales de suelo

1. Cubierta de acero
2. Aislante de poliuretano de 40mm
3. Vitrificado en esmalte
4. Vaina 1
5. Salida de agua a consumo
6. Conexión de válvula de seguridad
7. Vaina 2
8. Resistencia eléctrica\*
9. Cátodo anticorrosión
10. Retorno de captadores
11. Entrada agua fría
12. Salida hacia captadores
13. Vaciado
14. Tubo de drenaje
15. Tapa plástica acumulador

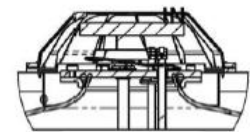
Cubierta superior



Detalle de brida



Detalle b



Detalle c

| Código | Capacidad (l) | Cotas (mm) |      |     |     |     |     |     | Peso (Kg) | Intercambiador      |       |
|--------|---------------|------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|---------------------|-------|
|        |               | A          | B    | C   | D   | E   | F   | G   |           | S (m <sup>2</sup> ) | V (l) |
| AVES01 | 150           | 1120       | 950  | 600 | 270 | 340 | 280 | 860 | 75        | 0,6                 | 3,2   |
| AVES05 | 200           | 1380       | 1210 | 600 | 270 | 440 | 285 | 860 | 93        | 0,6                 | 3,2   |
| AVES11 | 300           | 1540       | 1360 | 650 | 301 | 430 | 301 | 860 | 134       | 0,9                 | 5     |

\*Kit resistencia OPCIONAL compuesto por : Elemento eléctrico 2.300 w + termostato de control.

## 9.5 Anexo E: Levantamiento de Equipos del Circuito Primario

### Sistema de Colección

- Descripción General: Consiste en 3 arreglos de colectores conectados en paralelo, 2 de ellos poseen 3 colectores conectados en serie y el último posee 4 colectores conectados en serie. La temperatura a la salida del sistema de colección corresponde a una de las variables de control (T1).
- Descripción Específica:
  - 10 Colectores marca Chromagen modelo CR 12-SN
  - Factor Óptico ( $F_R \alpha \tau$ ): 0,7132
  - Factor de Pérdidas Térmicas ( $F_R U_L$ ): 4,396 [ $W/m^2K$ ]

Para más detalles ver Anexo C.

### Estanque de Agua Caliente Sanitaria

- Descripción General: El estanque de acumulación de ACS se utiliza para almacenar el agua de consumo de la vivienda. Posee un intercambiador de calor interno por el cual circula el fluido del circuito primario, sin mezclarse con el agua de consumo, y una resistencia eléctrica que se encarga del apoyo auxiliar de energía. La temperatura a la salida del intercambiador de calor corresponde a una de las variables de control (T2)
- Descripción Específica
  - 1 estanque de 300 litros
  - Diseño de sus componentes favorecen la estratificación

Para más detalles ver Anexo D

### Estanques de Agua de Calefacción

- Descripción General: Los estanques de acumulación de calefacción se utilizan para almacenar el agua utilizada en la calefacción de la vivienda. Poseen un intercambiador de calor interno por el cual circula el fluido del circuito primario sin mezclarse con el fluido de calefacción. La temperatura interna de la parte inferior de uno de los estanques corresponde a una de las variables de control (T3)
- Descripción Específica
  - 2 estanques de 300 litros
  - Diseño de sus componentes favorecen la estratificación
  - Estanques conectados en paralelo por medio de sus intercambiadores

Para más detalles ver Anexo D



Intercambiador de Calor

- Descripción General: Intercambiador de placas encargado de entregar el aporte solar al circuito de la piscina y jacuzzi. Este aporte se realiza en base al remanente de energía que posee el fluido del circuito primario luego de pasar por los estanques de acumulación. Sin embargo, si el usuario lo desea puede dirigir el flujo directo a este elemento luego de satisfecha la demanda de energía establecida para el estanque de acumulación de ACS.
- Descripción Específica:
  - Marca Zilmet modelo Z2
  - Presión de trabajo 10 [bar]

Válvulas

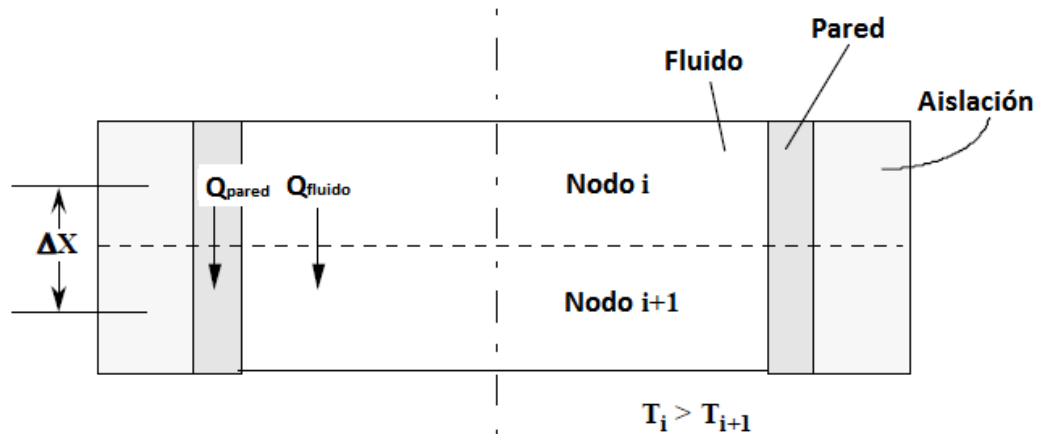
- Descripción General: 2 válvulas de tres vías (V1 y V2), V1 dirige el flujo hacia los estanques de acumulación de agua caliente sanitaria o a V2 y ésta, dirige el flujo hacia los estanques de acumulación de agua de calefacción o directo al intercambiador de piscina/jacuzzi.
- Descripción Específica:
  - V1 es controlada por el sistema de control de la vivienda
  - V2 es controlada manualmente por medio del sistema domótico
  - V1 dirige flujo a estanque de agua caliente sanitaria si  $(T2 \leq 35[^\circ\text{C}])$  ó  $(T1 - T2 > 5^\circ\text{C})$
  - V1 dirige flujo a V2 si  $(T1 - T2 < 5[^\circ\text{C}])$  y  $(T1 - T3 > 5[^\circ\text{C}])$
  - V2 está accionada para dirigir siempre el flujo hacia los estanques de calefacción a no ser que el usuario desee lo contrario.

Bomba de Recirculación

- Descripción General: El circuito primario posee una bomba que se encarga de mantener en circulación el fluido caloportador del circuito, siendo accionada por el sistema de control según las necesidades del SST.
- Descripción Específica:
  - Marca Salmsom modelo SXM 32-45, SXM indica que es una sola bomba, 32 [mm] es el diámetro de la salida y 45 [dm] es la altura capaz de elevar.
  - Potencia 100 [W]
  - Velocidad Máxima 2160 [rpm]
  - Esta bomba se detiene si:
    - $(T1 - T2 < 5[^\circ\text{C}])$  y  $T1 - T3 < 5[^\circ\text{C}]$ ) ó  $(T2 > 40[^\circ\text{C}])$  y  $T3 > 35[^\circ\text{C}]$

## 9.6 Anexo F: Conducción Longitudinal

En el presente anexo se muestra el desarrollo realizado para obtener el flujo de calor debido a la conducción longitudinal en el estanque. En la Figura 8.X se muestra un esquema del análisis combinado de conducción longitudinal por el fluido y por la pared del estanque.



**Figura 9.1: Conducción Longitudinal**

Así, y asumiendo que la pared y el fluido en cierto nodo tienen la misma temperatura, se expresa el flujo de calor total como:

$$Q_{Total} = Q_{pared} + Q_{fluido} \quad 9.1$$

donde:  $Q_{Total}$  es el flujo de calor debido a la conducción longitudinal entre nodos [W]  
 $Q_{pared}$  es el flujo de calor entre nodos a lo largo de la pared del estanque [W]  
 $Q_{fluido}$  es el flujo de calor entre nodos por medio del fluido [W]

De esta forma, y utilizando la Ecuación 2.10 correspondiente a la ecuación de conducción, se tienen las siguientes expresiones para los flujos de calor por pared y fluido.

$$Q_{pared} = \frac{k_{pared} A_{c,pared}}{\Delta x} (T_i - T_{i+1}) \quad 9.2$$

$$Q_{fluido} = \frac{k_{fluido} A_{c,fluido}}{\Delta x} (T_i - T_{i+1}) \quad 9.3$$

donde:  $k_{pared}$  es la conductividad térmica de la pared  $\left[\frac{W}{mK}\right]$   
 $k_{fluido}$  es la conductividad térmica del fluido  $\left[\frac{W}{mK}\right]$   
 $A_{c,pared}$  es el área de sección transversal de la pared (anillo)  $[m^2]$   
 $A_{c,fluido}$  es el área de sección transversal del interior del estanque  $[m^2]$

$\Delta x$  es la distancia entre centros de nodos contiguos [m]

$T_i$  es la temperatura del nodo  $i$  [°C]

$T_{i+1}$  es la temperatura del nodo  $i+1$  [°C]

Así, la Ecuación 8.1 puede escribirse de la siguiente forma

$$Q_{Total} = \frac{k_{pared} A_{c,pared}}{\Delta x} (T_i - T_{i+1}) + \frac{k_{fluido} A_{c,fluido}}{\Delta x} (T_i - T_{i+1}) \quad 9.4$$

Además, si considera la siguiente expresión,

$$\Delta k = k_{pared} \frac{A_{c,pared}}{A_{c,fluido}} \quad 9.5$$

Por último, utilizando la Ecuación 8.5 se puede reescribir la Ecuación 8.4 como es utilizada en el balance térmico.

$$Q_{total} = \frac{(k + \Delta k) A_c}{\Delta x} \Delta T \quad 9.6$$

Esta forma de escribir la ecuación se escoge para permitir al usuario del programa cambiar el valor de  $\Delta k$  según las características del estanque. Además, esta forma de ecuación permite considerar un aumento de la conductividad al representar efectos de convección en la pared exterior del estanque, por lo que se escogería un valor mayor al de la Ecuación 8.5.



## 9.7 Anexo G: Intercambiador de Calor

Para resolver el intercambio térmico que ocurre entre el fluido que pasa por el interior de los tubos del intercambiador de calor y el fluido presente en su exterior se debe solucionar la Ecuación 2.42 que se resume a continuación:

$$Q_{hx} = UA_{hx}(lmtd)$$

donde:  $Q_{hx}$  es la potencia entregada por el intercambiador de calor interno [W]  
 $UA_{hx}$  es el coeficiente global de intercambio térmico [W/K]  
 $lmtd$  es la diferencia de temperatura media logarítmica [°C]

Para encontrar el valor de la transmitancia térmica ( $U$ ) se utiliza una representación circuital de los componentes relacionados con el intercambio térmico dentro del estanque, considerando un intercambiador cilíndrico de superficie lisa como el instalado en los estanques de la vivienda. En este contexto, y utilizando la Ecuación 2.42, el coeficiente global de intercambio térmico se calcula como:

$$\frac{1}{UA_{hx}} = R_{interior} + R_{pared} + R_{exterior} \quad 9.7$$

$$R_{interior} = \frac{1}{h_i A_i} \quad 9.8$$

$$R_{pared} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi L k} \quad 9.9$$

$$R_{exterior} = \frac{1}{h_e A_e} \quad 9.10$$

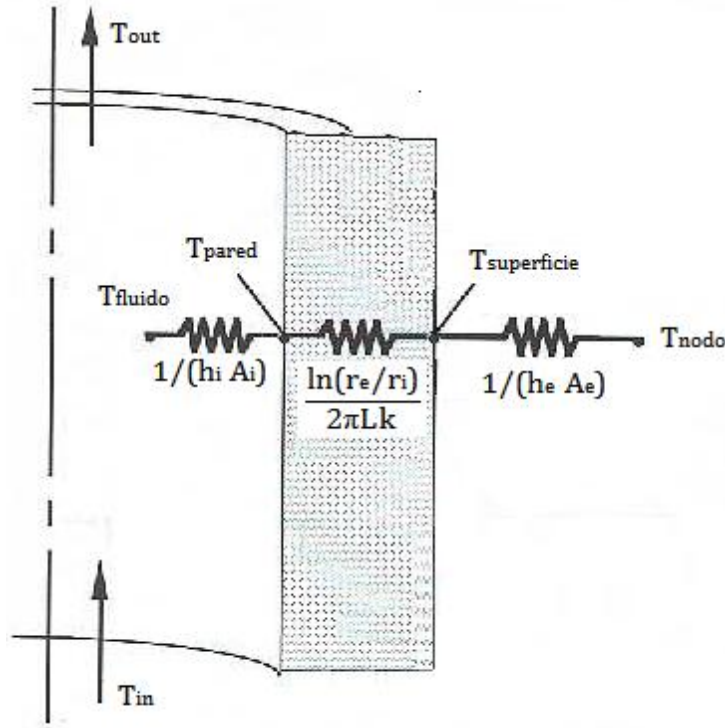
donde:  $R_{interior}$  es la resistencia convectiva al interior del intercambiador  $\left[\frac{W}{K}\right]$   
 $R_{pared}$  es la resistencia conductiva de la pared del intercambiador  $\left[\frac{W}{K}\right]$   
 $R_{exterior}$  es la resistencia convectiva al exterior del intercambiador  $\left[\frac{W}{K}\right]$   
 $h_i$  es el coeficiente convectivo al interior del intercambiador  $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$   
 $h_e$  es el coeficiente convectivo al exterior del intercambiador  $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$   
 $k$  es el coeficiente conductivo de la pared del intercambiador  $\left[\frac{W}{m K}\right]$   
 $A_i$  es el área de la superficie interna del intercambiador [ $m^2$ ]  
 $A_e$  es el área de la superficie externa del intercambiador [ $m^2$ ]

$r_i$  es el radio interno del intercambiador [m]

$r_e$  es el radio externo del intercambiador [m]

$L$  es el largo del intercambiador de calor [m]

En la Figura 8.2 se puede apreciar la representación circuital con las ecuaciones correspondientes a cada resistencia térmica.



**Figura 9.2: Representación circuital del intercambio térmico**

A continuación se plantea el procedimiento para resolver las resistencias descritas en la Figura 8.2.

### Resistencia convectiva interna

La resistencia convectiva interna está dada por la Ecuación 8.8, dónde el área interna de intercambio se calcula con los diámetros internos de los ductos del intercambiador de calor y el coeficiente convectivo se calcula utilizando el número de Nusselt, tal como se plantea en la Ecuación 2.26 que se resume a continuación:

$$h_i = \frac{k_{fluido,1} Nu_{D,i}}{d_i}$$

donde:  $k_{fluido,1}$  es el coeficiente conductivo del fluido del intercambiador  $\left[ \frac{W}{mK} \right]$

$d_i$  es el diámetro interno del intercambiador de calor [m]

$Nu_{D,i}$  es el número de Nusselt correspondiente al fluido interno

Para determinar el valor del número de Nusselt se debe analizar el número de Reynolds correspondiente al fluido interno ( $Re_{D,i}$ ) para ver si se está bajo situación de flujo turbulento o no, según en valor crítico definido para este número adimensional (Ver Capítulo 2 sección de números adimensionales).

En este contexto, si se está en situación de flujo turbulento ( $2300 \leq Re_{D,i} \leq 5 \cdot 10^6$ ) se utiliza la correlación de Petukhov y Gnielinski descrita en las Ecuaciones 2.27 y 2.28.

$$Nu_{D,i} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re_{D,i} - 1000)Pr_i}{1 + 12,7\left(\frac{f}{8}\right)^{1/2}\left(Pr_i^{2/3} - 1\right)}$$

$$f = [1,82 \log(Re_{D,i}) - 1,64]^{-2}$$

donde:  $Nu_{D,i}$  es el número de Nusselt correspondiente al fluido interno  
 $Re_{D,i}$  es el número de Reynolds correspondiente al fluido interno  
 $Pr_i$  es el número de Prandtl correspondiente al fluido interno  
 $f$  es el factor de fricción del fluido para tubos lisos

Si se está en situación de flujo laminar ( $Re_{D,i} < 2300$ ) se utiliza la correlación de Hausen y Stephan descrita en las Ecuaciones 2.29, 2.30 y 2.31.

$$Nu_{D,i} = 4,4 + \frac{a \left(\frac{Re_{D,i} Pr_i d_i}{L}\right)^{1,666}}{1 + b \left(\frac{Re_{D,i} Pr_i d_i}{L}\right)^{1,125}}$$

$$a = (-1,7419 \cdot 10^{-4})(Pr_i - 0,7) + 0,00398$$

$$b = (-5,8387 \cdot 10^{-4})(Pr_i - 0,7) + 0,0114$$

donde:  $Nu_{D,i}$  es el número de Nusselt correspondiente al fluido interno  
 $Re_{D,i}$  es el número de Reynolds correspondiente al fluido interno  
 $Pr_i$  es el número de Prandtl correspondiente al fluido interno  
 $d_i$  es el diámetro interno del intercambiador de calor [m]  
 $L$  es el largo del intercambiador de calor [m]

### Resistencia conductiva pared

La resistencia conductiva de la pared se resuelve utilizando la Ecuación 8.9, donde todas sus variables corresponden a propiedades físicas y geométricas del intercambiador de calor.

Resistencia convectiva externa

La resistencia convectiva externa está dada por la Ecuación 8.10, dónde el área interna de intercambio se calcula con los diámetros externos de los ductos del intercambiador de calor y el coeficiente convectivo se calcula utilizando el número de Nusselt en la Ecuación 2.26:

$$h_e = \frac{k_{fluido,2} Nu_{D,e}}{d_e}$$

donde:  $k_{fluido,2}$  es el coeficiente conductivo del fluido del estanque  $\left[\frac{W}{mK}\right]$   
 $d_e$  es el diámetro externo del intercambiador de calor [m]  
 $Nu_{D,e}$  es el número de Nusselt correspondiente al fluido externo

Para calcular el número de Nusselt correspondiente a la convección externa del intercambiador se deben considerar los efectos de la convección natural y la convección forzada, por lo que el número de Nusselt se puede expresar como:

$$Nu_{D,e} = Nu_{D,e}(Ra_D, Re_{D,e}, Pr_e) \tag{9.11}$$

donde:  $Nu_{D,e}$  es el número de Nusselt correspondiente al fluido del estanque  
 $Ra_D$  es el número de Rayleigh correspondiente al fluido del estanque  
 $Re_{D,e}$  es el número de Reynolds correspondiente al fluido del estanque  
 $Pr_e$  es el número de Prandtl correspondiente al fluido del estanque

Por este motivo se utiliza una ecuación propuesta por Churchill para el cálculo del número de Nusselt global que combina efectos de convección natural y forzada.

$$Nu_{D,e} = \left[ |Nu_F|^3 + |Nu_N|^3 \right]^{1/3} \tag{9.12}$$

donde:  $Nu_F$  es el número de Nusselt en convección forzada  
 $Nu_N$  es el número de Nusselt en convección natural

Para el cálculo del número de Nusselt en convección forzada se utiliza la correlación de Churchill y Bernstein presentada en la Ecuación 2.32 y que se resume a continuación:

$$Nu_F = \left[ 1,08 \sqrt{Re_{D,e}} \sqrt[3]{Pr_e} \left( 1 + \left( \frac{0,412}{Pr_e} \right)^{2/3} \right)^{-1/4} \right]^{1/3}$$

Para el cálculo del número de Nusselt en convección natural se utiliza la correlación de McAdams presentada en la Ecuación 2.33 y que se resume a continuación:

$$Nu_N = 0,5(Ra_D)^{0,25}$$

donde:  $Nu_F$  es el número de Nusselt correspondiente a la convección forzada  
 $Nu_N$  es el número de Nusselt correspondiente a la convección natural

Es importante destacar que tanto  $Nu_F$  como  $Nu_N$  pueden tener signo negativo o positivo, signo que dependerá de la dirección del fluido dentro del estanque. Sin embargo, como se considera que solo ocurre carga en una dirección, ambos valores serán positivos para las simulaciones realizadas.

Con este conjunto de ecuaciones se puede calcular el coeficiente global de intercambio térmico ( $UA_{hx}$ ) y, por lo tanto, obtener la potencia traspasada por el intercambiador de calor ( $Q_{hx}$ ).

## 9.8 Anexo H: Código programa estanques acumuladores

```

implicit double precision (a-z)
real dtdt(100),Tinit(100),par(300),simtime,time
real time0,tfinal,delt,dt1,dt2,dt3,dt4,timesum,dt
real minstep,dt6,dt_crit
double precision a(100,100),q_hx(3,100),Ac_up(100),Ac_dwn(100)
double precision M(100),H(100),geom(3,10)
double precision d(100),U(100),T(100),m1out(100),Tdum(100)
double precision mT(100),mB(100),m1in(100),m2in(100)
double precision m2out(100),xin(22),Ttemp(100),Q(20),x(101)
double precision mTup(100),mTdown(100),mBup(100),mBdwn(100)
double precision out(100),store(800),As(100),hx_corr(3,100)
double precision Tavg(100),Tnew(100),AvgTemp(100),storeT(1300)
double precision UAhx(3),lmtD(3),T_o(3)
double precision gly(3),d_i(3),d_o(3),d_f(3),A_o(3),fpm(3)
double precision L(3),k_w(3),k_hx(3),Hhxin(3),Hhxout(3)
double precision C_hx(3),n_hx(3),T_i(3),m_h(3),lmtD_DELTA(3)
integer n,i,j,mode1,mode2,mode3,statN1
integer mode4,mode5,exit(20),hxNin(3),hxNout(3)
integer statN2,htrN1,htrN2,AuxMode,yy(3,100)
integer gamma1,gamma2,info(15),trip1,hx_iter
integer outN1,outN2,trip2,trip3,ni,np,nd
integer trip8,node1,node2,storeloop(2),hx_fluid(3)
integer lur,luw,iform,luk,trip9,icntl,iwarn
logical trip
common/sim/time0,tfinal,delt,iwarn
common/lunits/lur,luw,iform,luk
common/type_60int/yy,n,
& trip8,htrN1,htrN2,outN1,outN2,mode2
common/type_60real/Cp,k,Keff,rho,M,
& per,Ac_up,Ac_dwn,Htank,H,As,
& UAflue,U,Qaux1,Qaux2,
& Tenv,Tflue,T1,T2,Tboil,
& mTup,mTdown,mBup,mBdwn,m1in,m1out,m2in,m2out,
& pi,g,store,storeT
data T1/0./,T2/0./,exit/20*0/,Q/20*0./,As/100*0./,U/100*0./,
& M/100*0./,d/100*0./,mB/100*0./,mT/100*0./,m1in/100*0./,
& m1out/100*0./,m2in/100*0./,m2out/100*0./,statN1/0/,statN2/0/,
& outN1/0/,outN2/0/,htrN1/0/,htrN2/0/,e1/0./,
& e2/0./,hx_iter/0/,pi/3.14100926535/g/9.81/,
& store/800*0./,yy/300*0/,trip9/0/,storeT/1300*0./
c
c PRIMERA LLAMADA A LA SIMULACIÓN
c SETEAR TEMPERATURA INICIAL DEL TANQUE LEER PARÁMETROS
c
Htank=par(3) ! TANK HEIGHT (m)
per=par(4) ! TANK PERIMETER (m)
Hin1=par(5) ! HEIGHT OF INLET 1 (m)
Hout1=par(6) ! HEIGHT OF OUTLET 1 (m)
Hin2=par(7) ! ALTURA ENTRADA 2 (m)
Hout2=par(8) ! ALTURA SALIDA 2 (m)
Cp=par(9)*1000. ! CALOR ESPECIFICO FLUIDO DEL TANQUE (J/kg-C)
rho=par(10) ! DENSIDAD FLUIDO TANQUE (kg/m^3)
Utank=par(11)/3.6 ! COEFICIENTE DE PERDIDA DE CALOR TANQUE (W/m^2-C)
k=par(12)/3.6 ! CONDUCTIVIDAD FLUIDO TANQUE (W/m-C)
kdelta=par(13)/3.6 ! CONDUCTIVIDAD DEBIDO A PARED (W/m-C)
Tboil=par(14) ! TEMPERATURA DE EBULLICIÓN (deg C)
AuxMode=par(15) ! MODO DE RESISTENCIA (1=M/S)
Haux1=par(16) ! ALTURA RESISTENCIA (m)
Hstat1=par(17) ! ALTURA TERMOSTATO RESISTENCIA (m)
Tset1=par(18) ! TEMPERATURA DE SETEO TERMOSTATO (deg C)
Tdb1=par(19) ! RANGO DE TEMPERATURA ENCENDIDO TERMOSTATO (deg C)
Qaux1=par(20)/3.6 ! POTENCIA RESISTENCIA (W)
CritFrac=par(28) ! FRACCION DE PASO TEMPORAL
mode3=int(par(31)+.001) ! ALTURA NODOS

```

```

mode4=int(par(32)+.001) ! PERDIDAS ADICIONALES
if((mode2.ne.1.and.mode2.ne.0).or.(mode3.ne.1.and.mode3.ne.0)
& .or.(mode4.ne.1.and.mode4.ne.0)) then
stop
endif
if(mode5.ne.2.and.mode5.ne.1.and.mode5.ne.0.
& and.mode5.ne.3) then
stop
endif
if(mode5.gt.0) then
hx_fluid(1)=(par(33)) ! HX FLUID (1=water 2=p.g. 3=e.g.)
gly(1)=par(34) ! % DE GLYCOL(DECIMAL, NOT %)
d_i(1)=par(35) ! DIAMETRO INTERNO INTERCAMBIADOR (m)
d_o(1)=par(36) ! DIAMETRO EXTERNO INTERCAMBIADOR (m)
A_o(1)=par(38) ! AREA DE INTERCAMBIO (m^2)
L(1)=par(40) ! LARGO INTERCAMBIADOR (m)
k_w(1)=par(41)/3.6 ! CONDUCTIVIDAD TERMICA PARED INTERCAMBIADOR (W/m-C)
k_hx(1)=par(42)/3.6 ! CONDUCTIVIDAD TERMICA MATERIAL INTERCAMBIADOR (W/m-C)
Hhxin(1)=par(43) ! ALTURA ENTRADA INTERCAMBIADOR (m)
Hhxout(1)=par(44) ! ALTURA SALIDA INTERCAMBIADOR (m)
endif
do 30 i=1,n
c
c DETERMINAR CONTANTES DEL ESTANQUE
c
Keff=k+kdelta
x(1)=Htank
x(n+1)=0
r=Htank/2.
do 60 i=n,2,-1
x1=x(i+1)
x2=Htank/n*(n-i+1)
err1=A1(x1,x2,r)-(pi*r*r)/n
err2=A1(x1,x2+.001,r)-(pi*r*r)/n
dx=.001
xold=x2+.001
do 50 while(abs(err2).gt..0000001)
x2=-err2*dx/(err2-err1)+xold
err1=err2
err2=A1(x1,x2,r)-(pi*r*r)/n
dx=x2-xold
xold=x2
50 continue
x(i)=x2
60 continue
c
c CALCULAR MASAS DE LOS NODOS, AREA DE SECCIÓN TRANSVERSAL Y AREA DEL MANTO
c
b=4*Vtank/(Htank*Htank*pi) ! TANK AXIAL LENGTH
do 70 i=1,n
H(i)=x(i)-x(i+1)
M(i)=rho*A1(x(i+1),x(i),r)*b
Ac_up(i)=b*(2.*sqrt(-(x(i)*x(i))+2.*r*x(i)))
Ac_dwn(i)=b*(2.*sqrt(-(x(i+1)*x(i+1))+2.*r*x(i+1)))
As(i)=2.*(acos(1.-x(i)/r)-acos(1.-x(i+1)/r))*r*b
& +2.*A1(x(i+1),x(i),r)
70 continue
elseif(int(per).eq.-2.and.n.gt.1.and.mode3.eq.1) then ! HORIZONTAL
r=Htank/2.
x(1)=Htank
x(n+1)=0.
b=4*Vtank/(Htank*Htank*pi) ! ALTURA DEL TANQUE
do 80 i=n,2,-1
x(i)=H(i)+x(i+1)
80 continue
do 90 i=1,n
M(i)=rho*A1(x(i+1),x(i),r)*b
Ac_up(i)=b*(2.*sqrt(-(x(i)*x(i))+2.*r*x(i)))

```

```

Ac_dwn(i)=b*(2.*sqrt(-(x(i+1)*x(i+1))+2.*r*x(i+1)))
As(i)=2.*(acos(1.-x(i)/r)-acos(1.-x(i+1)/r))*r*b
& +2.*A1(x(i+1),x(i),r)
90 continue
else ! if(int(per).eq.-2.and.n.eq.1) then
H(1)=Htank
b=4*Vtank/(Htank*Htank*pi)
As(1)=2*pi*Htank*Htank/4.+pi*Htank*b
M(1)=pi*Htank*Htank/4.*b*rho
goto 120
endif
if(int(per).eq.-1) per=(4.*(Vtank/Htank)*pi)**.5
if(n.eq.1) then
As(1)=2*(Vtank/Htank)+per*H(1)
Ac_up(1)=Vtank/Htank
else
Ac_up(1)=Vtank/Htank
Ac_dwn(1)=Vtank/Htank
Ac_up(n)=Vtank/Htank
Ac_dwn(n)=Vtank/Htank
As(1)=Ac_up(1)+per*H(1)
As(n)=Ac_up(n)+per*H(n)
do 100 i=2,n-1
Ac_up(i)=Vtank/Htank
Ac_dwn(i)=Vtank/Htank
As(i)=per*H(i)
100 continue
endif
do 110 i=1,n
M(i)=Ac_up(i)*H(i)*rho
110 continue
endif
c
c CONVERTIR ALTURAS A LOS NODOS
c
dum=.0001
do 115 i=n,1,-1
dum=dum+H(i)
if(Hstat1.le.dum.and.Hstat1.ge.0..and.exit(5).ne.1) then
statN1=i
exit(5)=1
endif
if(Hstat2.le.dum.and.Hstat2.ge.0..and.exit(6).ne.1) then
statN2=i
exit(6)=1
endif
if(Haux1.le.dum.and.Haux1.ge.0..and.exit(7).ne.1) then
htrN1=i
exit(7)=1
endif
if(Haux2.le.dum.and.Haux2.ge.0..and.exit(8).ne.1) then
htrN2=i
exit(8)=1
endif
if(Hhxin(1).le.dum.and.Hhxin(1).ge.0..and.exit(9)
& .ne.1) then
hxNin(1)=i
exit(9)=1
endif
if(Hhxout(1).le.dum.and.Hhxout(1).ge.0..and.exit(10)
& .ne.1) then
hxNout(1)=i
exit(10)=1
endif
if(Hhxin(2).le.dum.and.Hhxin(2).ge.0..and.exit(11)
& .ne.1) then
hxNin(2)=i
exit(11)=1

```



```

endif
if(Hhxout(2).le.dum.and.Hhxout(2).ge.0..and.exit(12)
& .ne.1) then
hxNout(2)=i
exit(12)=1
endif
if(Hhxin(3).le.dum.and.Hhxin(3).ge.0..and.exit(13)
& .ne.1) then
hxNin(3)=i
exit(13)=1
endif
if(Hhxout(3).le.dum.and.Hhxout(3).ge.0..and.exit(14)
& .ne.1) then
hxNout(3)=i
exit(14)=1
endif
115 continue
120 if(info(7).eq.-1) then
do 130 i=1,n
e0=e0+M(i)*Cp*T(i)
130 continue
store(trip8+42)=e0 ! ENERGIA INTERNA DEL TANQUE
e0=0.
endif
endif

if(info(1).ne.int(store(1)+.001)) then ! DIFFERENT TANK
if(info(1).eq.int(store(141)+.001)) trip8=100
if(info(1).eq.int(store(241)+.001)) trip8=200
if(info(1).eq.int(store(341)+.001)) trip8=300
if(info(1).eq.int(store(441)+.001)) trip8=400
if(info(1).eq.int(store(541)+.001)) trip8=500
if(info(1).eq.int(store(641)+.001)) trip8=600
store(2)=1.001
store(1)=info(1)
goto 20
else
store(2)=0.0
endif
if(info(7).eq.-1) goto 160
if(info(7).eq.0) then ! CAMBIO DE TIEMPO
do 140 i=1,n
T(i)=storeT(trip8+i)
storeT(trip8+600+i)=T(i)
140 continue
htrN1=int(store(trip8+31)+.001)
yy(1,htrN1)=int(store(trip8+32)+.001)
htrN2=int(store(trip8+33)+.001)
yy(2,htrN2)=int(store(trip8+34)+.001)
store(trip8+35)=htrN1
store(trip8+36)=yy(1,htrN1)
store(trip8+37)=htrN2
store(trip8+38)=yy(2,htrN2)
oldtime=store(trip8+39)
store(trip8+40)=oldtime
else ! SIN CAMBIO DE TIEMPO
do 150 i=1,n
T(i)=storeT(trip8+600+i)
150 continue
htrN1=store(trip8+35)
yy(1,htrN1)=store(trip8+36)
htrN2=store(trip8+37)
yy(2,htrN2)=store(trip8+38)
oldtime=store(trip8+40)
endif
160 time=int((simtime-oldtime)*3600+.0001) ! UTILIZAR TIEMPO DE TRNSYS
c

```

```

c LEER DATOS DE ENTRADA (SE USA PARAMETROS COPIADOS DE TRNSYS
c POR LO QUE SE ENCUENTRAN EN INGLÉS PARA COMPATIBILIZAR CON LOS OTROS EQUIPOS)
c
m_in1=xin(1)/3600. ! MASS FLOW RATE OF ENTERING FLUID 1 (kg/s)
m_out1=xin(2)/3600. ! MASS FLOW RATE OF LEAVING FLUID 1 (kg/s)
m_in2=xin(3)/3600. ! MASS FLOW RATE OF ENTERING FLUID 2 (kg/s)
m_out2=xin(4)/3600. ! MASS FLOW RATE OF LEAVING FLUID 2 (kg/s)
T1=xin(5) ! TEMPERATURE OF ENTERING FLUID 1 (deg C)
T2=xin(6) ! TEMPERATURE OF ENTERING FLUID 2 (deg C)
Tenv=xin(7) ! TEMPERATURE OF ENVIRONMENT (deg C)
gamma1=xin(8) ! ENABLE SIGNAL FOR FIRST HEATING ELEMENT
gamma2=xin(9) ! ENABLE SIGNAL FOR SECOND HEATING ELEMENT
if(mode5.gt.2) then
m_h(3)=xin(18)/3600. ! MASS FLOW RATE OF FLUID ENTERING HX (kg/s)
T_i(3)=xin(19) ! TEMPERATURE OF FLUID ENTERING HX (deg C)
C_hx(3)=xin(20) ! NUSSELT NUMBER CONSTANT
n_hx(3)=xin(21) ! NUSSELT NUMBER EXPONENT
endif
if(mode5.gt.1) then
m_h(2)=xin(14)/3600. ! MASS FLOW RATE OF FLUID ENTERING HX (kg/s)
T_i(2)=xin(15) ! TEMPERATURE OF FLUID ENTERING HX (deg C)
C_hx(2)=xin(16) ! NUSSELT NUMBER CONSTANT
n_hx(2)=xin(17) ! NUSSELT NUMBER EXPONENT
endif
if(mode5.gt.0) then
m_h(1)=xin(10)/3600. ! MASS FLOW RATE OF FLUID ENTERING HX (kg/s)
T_i(1)=xin(11) ! TEMPERATURE OF FLUID ENTERING HX (deg C)
C_hx(1)=xin(12) ! NUSSELT NUMBER CONSTANT
n_hx(1)=xin(13) ! NUSSELT NUMBER EXPONENT
endif
c
c GEOMETRÍA INTERCAMBIADOR
c
if((mode5.eq.1.or.mode5.eq.2.or.mode5.eq.3).and.
& info(7).eq.-1) then
do 230 i=1,mode5
if(d_f(i).eq.d_o(i)) then
A_b=A_o(i)
A_f=0.
goto 220
endif
stop
endif
if(spacing-delta.lt.0.) then
write(luw,*) '
write(luw,*)'### TYPE60 ERROR: INTERNAL HEAT EXCHANGER'
write(luw,*)'PARAMETERS ARE NOT VALID. PROGRAM'
write(luw,*)'CALCULATED A NEGATIVE GAP BETWEEN FINS ###'
stop
endif
A_f=(0.5*(d_f(i)*d_f(i)-d_o(i)*d_o(i))+d_f(i)*delta)
& *Nfins*pi ! FIN SURFACE AREA
A_b=pi*d_o(i)*(Spacing-delta)*Nfins ! REST OF TUBE SURFACE AREA
if(A_f.gt.A_o(i).or.A_f.lt.0..or.A_b.gt.A_o(i).or
& .A_b.lt.0.) then
write(luw,*) '
write(luw,*)'### TYPE60 ERROR: INTERNAL HEAT EXCHANGER'
write(luw,*)'PARAMETERS ARE NOT VALID. '
write(luw,*)'(REMEMBER A_o IS THE TOTAL OUTSIDE SURFACE'
write(luw,*)'AREA, FINS INCLUDED.) ###'
stop
endif
220 continue
geom(i,1)=k_hx(i)
geom(i,2)=d_i(i)
geom(i,3)=d_o(i)
geom(i,4)=d_f(i)
geom(i,5)=gly(i)

```

```

geom(i,6)=L(i)
geom(i,7)=delta
geom(i,8)=A_f
geom(i,9)=A_b
geom(i,10)=k_w(i)
230 continue
endif
c
c CALCULAR FLUJO ITERACIÓN
c
mT(1)=0.
mB(1)=m1out(1)+m2out(1)-m1in(1)-m2in(1)
do 250 i=2,n-1
mT(i)=-mB(i-1)
mB(i)=m1out(i)+m2out(i)-m1in(i)-m2in(i)-mT(i)
250 continue
mT(n)=-mB(n-1)
mB(n)=0.
c
c VERIFICAR DIRECCION FLUJO
c
do 260 i=1,n
if(mT(i).gt.0.) then
mTup(i)=0.
mTdown(i)=mT(i)
elseif(mT(i).le.0.) then
mTup(i)=-mT(i)
mTdown(i)=0.
endif
if(mB(i).gt.0.) then
mBup(i)=mB(i)
mBdown(i)=0.
elseif(mB(i).le.0.) then
mBup(i)=0.
mBdown(i)=-mB(i)
endif
260 continue
c
c DETERMINAR ENCENDIDO APAGADO RESITENCIA
c
if(AuxMode.eq.2) then !
if(((T(statN1).lt.(Tset1-Tdb1)).or.(T(statN1).lt.
& Tset1.and.yy(1,htrN1).eq.1)).and.gamma1.ne.0) then
yy(1,htrN1)=1
else
yy(1,htrN1)=0
endif
if(((T(statN2).lt.(Tset2-Tdb2)).or.(T(statN2).lt.
& Tset2.and.yy(2,htrN2).eq.1)).and.gamma2.ne.0) then
yy(2,htrN2)=1
else
yy(2,htrN2)=0
endif
else ! AUXMODE=1 (MASTER-SLAVE MODE)
if(statN1.eq.statN2) then
stop
elseif(statN1.lt.statN2)then
if((T(statN1).lt.(Tset1-Tdb1).or.T(statN1).lt.
& Tset1.and.yy(1,htrN1).eq.1).and.gamma1.ne.0) then
yy(1,htrN1)=1
else
yy(1,htrN1)=0
endif
if((T(statN2).lt.(Tset2-Tdb2).or.T(statN2).lt.
& Tset2.and.yy(2,htrN2).eq.1).and.yy(1,htrN1).eq.
& 0.and.gamma2.ne.0) then
yy(2,htrN2)=1
else

```

```

yy(2,htrN2)=0
endif
else
if((T(statN2).lt.(Tset2-Tdb2).or.T(statN2).lt.
& Tset2.and.yy(2,htrN2).eq.1).and.gamma2.ne.0) then
yy(2,htrN2)=1
else
yy(2,htrN2)=0
endif
if((T(statN1).lt.(Tset1-Tdb1).or.T(statN1).lt.
& Tset1.and.yy(1,htrN1).eq.1).and.yy(2,htrN2).eq.
& 0.and.gamma1.ne.0) then
yy(1,htrN1)=1
else
yy(1,htrN1)=0
endif
endif
endif
c
c CALCULAR LMTD Y UAhx
c
do 270 i=1,mode5
if(m_h(i).gt.0.) then
call int_hx(T_i(i),m_h(i),C_hx(i),n_hx(i),geom,i,
& UAhx,h1_o,lmtd,q_hx,T_o,T,lmtd_DELTA,hxNin(i),hxNout(i),
& hx_corr,hx_fluid(i),simtime)
endif
270 continue
c
c ESTABLECER MATRIZ DE BALANCE ENERGETICO
c
call coeff(a,d,q_hx)
if(time.eq.0.) then
dt=1
goto 300
endif
dt_crit=1e10
do 290 i=1,n
if(a(i,i).eq.0.) then
min_dt=100000
goto 280
endif
min_dt=-1/(a(i,i)-hx_corr(1,i)-hx_corr(2,i)-hx_corr(3,i))
280 if(min_dt.lt.dt_crit) then
dt_crit=min_dt
endif
290 continue
c
c GUARDAR ENERGÍA INTERNA
c
300 do 310 i=1,n
e1=e1+M(i)*Cp*T(i)
310 continue
c
c CALCULAR NUEVAS TEMPERATURAS
c
26
timesum=0.
if(time.eq.0.) goto 320
dt=amin1((dt_crit/CritFrac),time)
do 450 while(timesum.lt.time)
320 storeloop(1)=yy(1,htrN1)
storeloop(2)=yy(2,htrN2)
if(time.eq.0) then
dt=0
timesum=time
goto 420
endif

```

```

if(dt+timesum-.001.gt.time) then
dt=time-timesum
endif
330 call newtemp(T,dt,a,d,Tnew,Tavg)
340 dt1=dt
dt2=dt
dt3=dt
dt4=dt
if(Tnew(statN1).gt.(Tset1+.1).and.yy(1,htrN1).eq.1) then
dt1=(dt*((Tset1-T(statN1))/(Tnew(statN1)-T(statN1))))
trip=.true.
endif
if(Tnew(statN1).lt.(Tset1-Tdb1-.1).and.gamma1.eq.1.and.
& yy(1,htrN1).eq.0) then ! ENCENDIDO RESISTENCIA
if(AuxMode.eq.1.and.statN2.lt.statN1.and.yy(2,htrN2).eq.1)
& goto 350 ! APAGADO RESISTENCIA
dt2=(dt*((T(statN1)-(Tset1-Tdb1-.01))/(T(statN1)-
& Tnew(statN1))))
trip=.true.
endif
350 if(Tnew(statN2).gt.(Tset2+.1).and.yy(2,htrN2).eq.1) then
dt3=(dt*((Tset2-T(statN2))/(Tnew(statN2)-T(statN2))))
trip=.true.
endif
27
360 minstep=amin1(dt1,dt2,dt3,dt4)
if(.not.trip) then ! EVERYTHING WAS OK
dt=minstep
if(dt+timesum-.001.gt.time) then
dt=time-timesum
call newtemp(T,dt,a,d,Tnew,Tavg)
endif
else
dt=minstep
call newtemp(T,dt,a,d,Tnew,Tavg)
if(minstep.eq.dt1) then
if(Tnew(statN1).lt.Tset1) then
do 370 i=1,n
Tdum(i)=Tnew(i)
370 continue
dt6=dt+1.
c CURVE TO OBTAIN AMOUNT OF TIME TO ADD ON.
call newtemp(Tdum,dt6,a,d,Ttemp,Tavg)
dt=dt+(Tset1-Tnew(statN1))/(Ttemp(statN1)-
& Tnew(statN1))
trip=.false.
goto 330
else
dt=minstep
trip=.false.
goto 340
endif
endif
if(minstep.eq.dt3) then
if(Tnew(statN2).lt.Tset2) then
do 380 i=1,n
Tdum(i)=Tnew(i)
380 continue
dt6=dt+1.
call newtemp(Tdum,dt6,a,d,Ttemp,Tavg)
dt=dt+(Tset2-Tnew(statN2))/(Ttemp(statN2)-
& Tnew(statN2))
28
trip=.false.
goto 330
else
dt=minstep
trip=.false.

```

```

goto 340
endif
endif
if(minstep.eq.dt2) then
if(Tnew(statN1).gt.(Tset1-Tdb1)) then
do 390 i=1,n
Tdum(i)=Tnew(i)
390 continue
dt6=dt+1.
call newtemp(Tdum,dt6,a,d,Ttemp,Tavg)
dt=dt+(Tnew(statN1)-(Tset1-Tdb1))/(Tnew(statN1)-
& Ttemp(statN1))
trip=.false.
goto 330
else
dt=minstep
trip=.false.
goto 340
endif
endif
if(minstep.eq.dt4) then ! COOLING BELOW THE DEAD BAND CAUSED
c THE TIME STEP CUT.
if(Tnew(statN2).gt.(Tset2-Tdb2)) then ! STRAIGHT LINE
c APPROXIMATION UNDERESTIMATED TIME. ADD ON MORE TIME.
do 400 i=1,n
Tdum(i)=Tnew(i)
400 continue
dt6=dt+1. ! NUMERICAL DERIVATIVE TO TAKE TANGENT TO
c CURVE TO OBTAIN AMOUNT OF TIME TO ADD ON.
call newtemp(Tdum,dt6,a,d,Ttemp,Tavg)
dt=dt+(Tnew(statN2)-(Tset2-Tdb2))/(Tnew(statN2)-
& Ttemp(statN2))
trip=.false.
goto 330
else
dt=minstep
trip=.false.
goto 340
endif
endif
endif
timesum=timesum+dt
do 410 i=1,n
29
T(i)=Tnew(i)
410 continue
420 continue
c
c FLUIDO ALCANZA EBULLICIÓN
c
qsum1=0.
qsum2=0.
qsum3=0.
do 430 i=1,n
if(T(i).gt.Tboil) then
Q(1)=Q(1)+M(i)*Cp*(T(i)-Tboil)
T(i)=Tboil
endif
if(mode2.eq.1) then
yy(3,i)=1-yy(2,htrN2)
else
yy(3,i)=1
endif
c
c CALCULAR FLUJO DE ENERGPIA ENTRE NODOS
c
Q(2)=Q(2)+(U(i)*As(i)*(Tavg(i)-Tenv))*dt
Q(3)=Q(3)+(yy(3,i)*UAflue*H(i)/Htank*(Tavg(i)-Tflue))*dt

```

```

AvgTemp(i)=AvgTemp(i)+Tavg(i)*dt
qsum1=qsum1+q_hx(1,i)
qsum2=qsum2+q_hx(2,i)
qsum3=qsum3+q_hx(3,i)
430 continue
Q(4)=Q(4)+m_in1*Cp*T1*dt
if(outN1.ne.0) Q(5)=Q(5)+m_out1*Cp*Tavg(outN1)*dt
Q(6)=Q(6)+m_in2*Cp*T2*dt
if(outN2.ne.0) Q(7)=Q(7)+m_out2*Cp*Tavg(outN2)*dt
Q(8)=Q(8)+Qaux1*yy(1,htrN1)*dt
Q(9)=Q(9)+Qaux2*yy(2,htrN2)*dt
Q(10)=Q(10)+qsum1*dt
Q(11)=Q(11)+qsum2*dt
Q(12)=Q(12)+qsum3*dt
c
c DETERMINAR ENCENDIDO APAGADO RESISTENCIA
c
if(AuxMode.eq.2) then
if((T(statN1).lt.(Tset1-Tdb1).or.T(statN1).lt.
& (Tset1).and.yy(1,htrN1).eq.1).and.gamma1.ne.0) then
30
yy(1,htrN1)=1
else
yy(1,htrN1)=0
endif
if((T(statN2).lt.(Tset2-Tdb2).or.T(statN2).lt.
& (Tset2).and.yy(2,htrN2).eq.1).and.gamma2.ne.0) then
yy(2,htrN2)=1
else
yy(2,htrN2)=0
endif
else ! AUXMODE=1 (MASTER-SLAVE MODE)
if(statN1.lt.statN2) then
if((T(statN1).lt.(Tset1-Tdb1).or.T(statN1).lt.
& Tset1.and.yy(1,htrN1).eq.1).and.gamma1.ne.0) then
yy(1,htrN1)=1
else
yy(1,htrN1)=0
endif
if((T(statN2).lt.(Tset2-Tdb2).or.T(statN2).lt.
& Tset2.and.yy(2,htrN2).eq.1).and.yy(1,htrN1).eq.
& 0.and.gamma2.ne.0) then
yy(2,htrN2)=1
else
yy(2,htrN2)=0
endif
else
if((T(statN2).lt.(Tset2-Tdb2).or.T(statN2).lt.
& Tset2.and.yy(2,htrN2).eq.1).and.gamma2.ne.0) then
yy(2,htrN2)=1
else
yy(2,htrN2)=0
endif
if((T(statN1).lt.(Tset1-Tdb1).or.T(statN1).lt.
& Tset1.and.yy(1,htrN1).eq.1).and.yy(2,htrN2).eq.
& 0.and.gamma1.ne.0) then
yy(1,htrN1)=1
else
yy(1,htrN1)=0
endif
endif
endif
c
c RECALCULAR PARAMETROS INERCAMBIADOR
c
31
do 440 i=1,mode5
if(m_h(i).gt.0.) then

```

```

call int_hx(T_i(i),m_h(i),C_hx(i),n_hx(i),geom,i,
& UAhx,h1_o,lmtd,q_hx,T_o,T,lmtd_DELTA,hxNin(i),hxNout(i)
& ,hx_corr,hx_fluid(i),simtime)
endif
440 continue
if(yy(1,htrN1).ne.storeloop(1).or.yy(2,htrN2).ne.
& storeloop(2).or.(mode5.gt.0.and.(m_h(1).ge.0..or.m_h(2)
& .ge.0..or.m_h(3).ge.0))) then
call coeff(a,d,q_hx)
endif
dt=amin1((dt_crit/CritFrac),(time-timesum))
450 continue
subroutine newtemp(T,dt,a,d,Tnew,Tavg)
implicit double precision (a-z)
real time0,tfinal,delt,dt
double precision T(100),Tnew(100),Tavg(100),d(100),a(100,100)
double precision M(100),TnewX(100)
double precision mTup(100),mBup(100),m1in(100),m1out(100)
double precision m2in(100),m2out(100),H(100),U(100)
double precision As(100),store(800),mTdown(100),mBdown(100)
double precision storeT(1300),Ac_up(100),Ac_dwn(100)
integer i,j,i2,n,yy(3,100)
integer trip8,iwarn,mode2,trip2,set
integer trip1,htrN1,htrN2,outN1,outN2
integer lur,luw,iform,luk
common/sim/time0,tfinal,delt,iwarn
common/lunits/lur,luw,iform,luk
common/type_60int/yy,n,
& trip8,htrN1,htrN2,outN1,outN2,mode2
common/type_60real/Cp,k,Keff,rho,M,
& per,Ac_up,Ac_dwn,Htank,H,As,
& UAflue,U,Qaux1,Qaux2,
& Tenv,Tflue,T1,T2,Tboil,
& mTup,mTdown,mBup,mBdown,m1in,m1out,m2in,m2out,
& pi,g,store,storeT
do 10 i=1,n
Tnew(i)=T(i)
10 continue
35
err=10.
do 110 while(abs(err).gt..001)
c
c CALCULAR TEMPERATURAS EN CADA NODO
c
Told1=Tnew(1)
Toldn=Tnew(n)
if(n.eq.1) then
TnewX(1)=dt*(a(1,1)*(T(1)+Tnew(1))/2.+d(1))+T(1)
else
TnewX(1)=dt*(a(1,1)*(T(1)+Tnew(1))/2.+a(1,2)*(T(2)+Tnew(2)
& )/2.+d(1))+T(1)
TnewX(n)=dt*(a(n,n-1)*(T(n-1)+Tnew(n-1))/2.+a(n,n)*(T(n)+
& Tnew(n))/2.+d(n))+T(n)
do 20 i=2,n-1
TnewX(i)=dt*(a(i,i-1)*(T(i-1)+Tnew(i-1))/2.+a(i,i)*
& (T(i)+Tnew(i))/2.+a(i,i+1)*(T(i+1)+Tnew(i+1))
& /2.+d(i))+T(i)
20 continue
endif
do 25 i=1,n
Tnew(i)=TnewX(i)
25 continue
c
c SI INVERSIÓN DE TEMPERATURA ES MAYOR QUE 0.001 GRADO SE MEXZCLAN NODOS
c
30 trip1=0
do 60 i=n-1,1,-1
if((Tnew(i)+.001).ge.Tnew(i+1).and.trip1.ne.0) trip1=0

```



```

if((Tnew(i)+.001).lt.Tnew(i+1)) then ! MIX
if(trip1.eq.0) trip1=i+1
dum2=0.
dum3=0.
do 40 i2=trip1,i,-1
dum2=dum2+M(i2)*Tnew(i2)
dum3=dum3+M(i2)
40 continue
do 50 i2=trip1,i,-1
Tnew(i2)=dum2/dum3
50 continue
36
endif
60 continue
c
c TOP --> DOWN
c
trip1=0
set=0
do 90 i=2,n
if(abs(Tnew(i)-Tnew(i-1)).le..001) set=set+1
if(Tnew(i).le.(Tnew(i-1)+.001).and.trip1.ne.0) trip1=0
if(Tnew(i).gt.(Tnew(i-1)+.001)) then ! MIX
if(trip1.eq.0) trip1=i-1-set
dum2=0.
dum3=0.
do 70 i2=trip1,i
dum2=dum2+M(i2)*Tnew(i2)
dum3=dum3+M(i2)
70 continue
do 80 i2=trip1,i
Tnew(i2)=dum2/dum3
80 continue
endif
90 continue
trip2=0
do 100 i=2,n
if((Tnew(i-1)+.0015).lt.Tnew(i)) trip2=1
100 continue
if(trip2.eq.1) goto 30
err=dmax1(abs(Tnew(1)-Told1),abs(Tnew(n)-Toldn))
110 continue
do 120 i=1,n
if(Tnew(i).gt.Tboil) then
Tavg(i)=.5*(T(i)+Tboil)
else
Tavg(i)=.5*(Tnew(i)+T(i))
endif
120 continue
return
end

subroutine int_hx(T_i,m_h,C_hx,n_hx,geom,
& hx,UAhx,h_avg,lmtd,q_hx,T_o,T,lmtd_DELTA,hxNin,
& hxNout,hx_corr,hx_fluid,simtime)
implicit double precision (a-z)
37
real time0,tfinal,delt,simtime
double precision mTup(100),mBup(100),m1in(100),m1out(100)
double precision m2in(100),m2out(100),H(100),U(100),T(100)
double precision M(100),As(100),store(800),mTdown(100),mBdown(100)
double precision hx_corr(3,100),q_hx(3,100),storeT(1300)
double precision Ac_up(100),Ac_dwn(100),UAhx(3)
double precision lmtd(3),lmtd_DELTA(3),T_o(3),geom(3,10)
integer i,j,n,yy(3,100),hx,hx_fluid,step
integer trip8,iwarn,mode2,hxNin,hxNout,loops
integer lur,luw,iform,luk,htrN2,num_iter,dir,htrN1,outN1,outN2
common/sim/time0,tfinal,delt,iwarn

```

```

common/lunits/lur,luw,iform,luk
common/type_60int/yy,n,
& trip8,htrN1,htrN2,outN1,outN2,mode2
common/type_60real/Cp,k,Keff,rho,M,
& per,Ac_up,Ac_dwn,Htank,H,As,
& UAflue,U,Qaux1,Qaux2,
& Tenv,Tflue,T1,T2,Tboil,
& mTup,mTdown,mBup,mBdwn,m1in,m1out,m2in,m2out,
& pi,g,store,storeT
k_hx=geom(hx,1)
d_i=geom(hx,2)
d_o=geom(hx,3)
d_f=geom(hx,4)
gly=geom(hx,5)
L=geom(hx,6)
delta=geom(hx,7)
A_f=geom(hx,8)
A_b=geom(hx,9)
k_w=geom(hx,10)
dum4=0.
h_avg=0.
T_n_avg=0.
qsum=0.
cut=1.
Hcoil=store(trip8+48+hx)
FinEff=store(trip8+42+hx)
loops=1
do 10 i=1,n
q_hx(hx,i)=0.
10 continue
if(hxNout.eq.hxNin) then ! DIRECCIÓN DEL FLUJO
step=1
else
step=int((hxNout-hxNin)/(abs(hxNout-hxNin)))
endif
if(int(store(trip8+48+hx)*1000).eq.0) then
dum2=0.
do 20 i=hxNin,hxNout,step
dum2=dum2+H(i)
38
20 continue
Hcoil=dum2
store(trip8+48+hx)=Hcoil
loops=2
FinEff=1.
endif
do 90 j=1,loops
T_in=T_i
do 70 i=hxNin,
T_out=T_in-.9*(T_in-T(i))
else
T_out=T_in+.9*(T(i)-T_in)
endif
lmtD_Delta=0.
T_n=T(i)
T_n_avg=T_n_avg+T(i)*(H(i)/Hcoil)
R_w=log(d_o/d_i)/(2*pi*(L*(H(i)/Hcoil))*k_w)
if(mTup(i).gt.0.and.mBup(i).gt.0.) U_oo=(max(mTup(i)
& ,mBup(i)))/(rho*.5*(Ac_up(i)+Ac_dwn(i))) !TOP AND BOTTOM FLOW UPWARD
if(mTdown(i).gt.0.and.mBdwn(i).gt.0.) U_oo=(-max(mTdown(i)
& ,mBdwn(i)))/(rho*.5*(Ac_up(i)+Ac_dwn(i))) !TOP AND BOTTOM FLOW DOWNWARD
if(mTdown(i).gt.0.and.mBup(i).gt.0.) U_oo=(mBup(i)-
& mTdown(i))/(rho*.5*(Ac_up(i)+Ac_dwn(i))) !BOTH FLOW OUT OF NODE
if(mTup(i).gt.0.and.mBdwn(i).gt.0.) U_oo=(mTup(i)-
& mBdwn(i))/(rho*.5*(Ac_up(i)+Ac_dwn(i))) !BOTH FLOW INTO NODE
if(U_oo.ge.0.) then
dir=1.
else

```

```

dir=-1.
endif
c
c DETERMINAR ITERATIVAMENTE UAhx
c
err1=1.
30 do 50 while(err1.gt..0001 )
T_old=T_out
if(hx_fluid.eq.1) then
mu_h=mu_w(.5*(T_in+T_out))
k_h=k_water(.5*(T_in+T_out))
Cp_h=Cp_w(.5*(T_in+T_out))
elseif(hx_fluid.eq.2) then
mu_h=mu_pg(.5*(T_in+T_out),gly*100.)
k_h=k_pg(.5*(T_in+T_out),gly*100.)
Cp_h=Cp_pg(.5*(T_in+T_out),gly*100)
elseif(hx_fluid.eq.3) then
mu_h=mu_eg(.5*(T_in+T_out),gly*100.)
k_h=k_eg(.5*(T_in+T_out),gly*100.)
39
Cp_h=Cp_eg(.5*(T_in+T_out),gly*100.)
endif
c
c GIVEN T_out, COMPUTE lmtd
c
lmtd_i=(T_in-T_n)-(T_out-T_n)/log(abs((T_in-T_n)/
& (T_out-T_n)))
if(abs(lmtd_Delta).gt.abs(lmtd_i)) lmtd_Delta=
& lmtd_i-lmtd_i*0.01
T_film=.5*(.5*(T_out+T_in)+T_n)
c
c CONVECCION INTERNA
c
ReD_i=4.*m_h/(pi*d_i*mu_h)
Pr_i=Cp_h*mu_h/k_h
if(ReD_i.ge.2200) then ! FLUJO TURBULENTO
f=(1.82*log10(ReD_i)-1.64)**(-2.)
K1=1.+3.4*f
K2=11.7+1.8/Pr_i**(0.33333333)
NuD_i=((f/8.)*ReD_i*Pr_i)/(K1+K2*((f/8.)*.5*
& (Pr_i**(0.6666667)-1.)))
else ! FLUJO LAMINAR
a=(-1.741935d-04)*(Pr_i-0.7)+.00398
b=(-5.838710d-04)*(Pr_i-0.7)+.01140
nn=1.125
mm=1.666
NuD_i=4.4+((a*(ReD_i*Pr_i*d_i*Hcoil/(H(i)*L))**mm)/
& (1+b*(ReD_i*Pr_i*d_i*Hcoil/(H(i)*L))**nn))
endif
A_i=pi*d_i*L*(H(i)/Hcoil)
h1_i=k_h*NuD_i/d_i
c
c COEF. EXTERNOS CONVECCIÓN NATURAL
c
Ra=(rho_w(T_film)**2*Beta_w(T_film)*Cp_w(T_film)*g*
& d_o**3.)/(mu_w(T_film)*k_water(T_film))*abs((lmtd_i-
& lmtd_Delta))
NuD_N=(C_hx*Ra**n_hx)*(abs(lmtd_i)/lmtd_i)
c
c COEF. EXTERNOS CONVECCIÓN FORZADA
c
A_F2=1.08
f_FPr=(1.+(.412/Pr_o)**(0.6666667))**(-.25)
Pr_o=Cp_w(T_film)*mu_w(T_film)/k_water(T_film)
ReD_o=(rho_w(T_film)*abs(U_oo)*d_o)/mu_w(T_film)
NuD_F=(A_F2*ReD_o**.5*Pr_o**(0.33333333)*f_FPr)*dir
c
c CONVECCIÓN COMBINADA

```

```

c
NuD_o=(abs(NuD_F**3+NuD_N**3))**(.33333333)
h1_o=NuD_o*k_water(T_film)/(d_o)
UAhx_i=1./(1./(h1_i*A_i)+R_w+1./(h1_o
40
& *(A_b*(H(i)/Hcoil))+h1_o*A_f*FinEff*
& (H(i)/Hcoil)))
c
c GIVEN UAhx, COMPUTE q_hx
c
q_hx(hx,i)=UAhx_i*lmtd_i
c
c GIVEN q_hx, COMPUTE T_out
c
dum4=T_in-(q_hx(hx,i)/(m_h*Cp_h))
40 dum5=T_out
T_out=T_out-cut*(T_out-dum4)
if((T_in.gt.T_n.and.(T_out.gt.T_in.or.T_out.lt.T_n)).or.
& (T_in.lt.T_n.and.(T_out.lt.T_in.or.T_out.gt.T_n))) then
cut=cut*.75
if(cut.lt.1e-6) then
if(T_in.gt.T_n) then
T_out=T_in-.9*(T_in-T_n)
else
T_out=T_in+.9*(T_n-T_in)
endif
cut=1.
lmtd_Delta=0.
goto 30
endif
T_out=dum5
goto 40
endif
lmtd_Delta=q_hx(hx,i)*(1/(A_i*h1_i)+R_w)
err1=abs(T_out-T_old)
num_iter=num_iter+1
if(num_iter.eq.50) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.75) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.100) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.125) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.150) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.175) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.200) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.225) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.250) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.275) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.300) cut=cut*.75
if(num_iter.eq.500) then
iwarn=iwarn+1
goto 60
endif
41
50 continue
c CONVERGENCIA
60 num_iter=0
hx_corr(hx,i)=UAhx_i*abs(lmtd_i)/(M(i)*
& Cp*abs((T_in-T(i))))
h_avg=h_avg+h1_o*(H(i)/Hcoil)
T_in=T_out
T_o_final=T_out
qsum=qsum+q_hx(hx,i)
70 continue
R_w=log(d_o/d_i)/(2*pi*L*k_w)
lmtd(hx)=((T_i-T_n_avg)-(T_o_final-T_n_avg))/
& log(abs((T_i-T_n_avg)/(T_o_final-T_n_avg)))
UAhx(hx)=abs(qsum)/abs(lmtd(hx))
lmtd_Delta(hx)=qsum*(1/(pi*d_i*L*h1_i)+R_w)

```

```

T_o(hx)=T_o_final
c PROPIEDADES AGUA SE USAN PARAMETROS DE TRNSYS
FUNCTION Beta_w(T_celsius)
double precision T,T_celsius,Beta_w
T=T_celsius+273.15
Beta_w=-.025588+.00021725*T-6.173d-7*T*T+
& 6.0171d-10*T**3
return
end
FUNCTION Cp_w(T_celsius)
double precision T,Cp_w,T_celsius
T=T_celsius+273.15
Cp_w=45359-491.6*T+2.2005*T*T-.0043807*T**3+
& 3.276d-6*T**4
44
return
end
FUNCTION k_water(T_celsius)
double precision T,k_water,T_celsius
T=T_celsius+273.15
k_water=-.48064+.0058471*T-7.3317d-6*T*T
return
end
FUNCTION mu_w(T_celsius)
implicit double precision (a-z)
T=T_celsius+273.15
mu_w=0.23873d0-0.26422d-02*T+1.1062d-05*T**2
& -2.0705d-08*T**3+1.4593d-11*T**4
return
end
FUNCTION rho_w(T_celsius)
double precision T,rho_w,T_celsius
T=T_celsius+273.15
rho_w=-3452.2+53.065*T-.23596*T*T+4.666d-4*T**3-
& 3.4963d-7*T**4
return
end
c PROPLYENE GLYCOL PROPERTIES
FUNCTION Cp_pg(T_celsius,percent)
double precision T_celsius,percent,Cp_pg,Tem
Tem=T_celsius+273.15
Cp_pg=((3.8649883866 - 0.023691954902*percent -
& 0.00011278222908*percent**2) + (0.001023655712 +
& 5.6633876714d-5*percent)*Tem)*1000
return
end
FUNCTION k_pg(T_celsius,percent)
double precision T_celsius,percent,k_pg,Tem
Tem=T_celsius+273.15
k_pg= (-0.78595253278 + 0.015561899561*percent -
& 4.8933521576d-5*percent**2) + (0.0076866167254 -
& 0.0001155974176*percent + 3.660336083d-7*percent**2)*Tem
& + (-9.9976810237d-6 + 1.4560615474d-7*percent -
& 4.5879383578d-10*percent**2)*Tem**2
return
end
FUNCTION mu_pg(T_celsius,percent)
double precision T_celsius,percent,mu_pg,Tem
Tem=T_celsius+273.15
mu_pg=exp((71.639163222 - 0.66981698459*Tem +
& 0.0019150513174*Tem**2 - 1.8587687783d-6*Tem**3) +
& (0.27019804611 - 0.0012299975866*Tem +
45
& 1.5045427918d-6*Tem**2)*percent)
return
end
c ETHYLENE GLYCOL PROPERTIES

```

```

FUNCTION Cp_eg(T_celsius,pct)
double precision T,T_celsius,pct,Cp_eg
T=T_celsius+273.15
Cp_eg=(3.9189-.035267*pct+(.0014555+4.8423d-5*pct)*T)*1000.
return
end
FUNCTION k_eg(T_celsius,pct)
double precision T,T_celsius,pct,k_eg,B,C,D
T=T_celsius+273.15
B=-.84402+.016948*pct-6.99691d-5*pct*pct
C=.0079877-.00012444*pct+5.00412d-7*pct*pct
D=-1.0647d-5+1.708955d-7*pct-7.065844d-10*pct*pct
k_eg=B+C*T+D*T*T
return
end
FUNCTION mu_eg(T_celsius,pct)
double precision T,T_celsius,pct,mu_eg,B,C,D
T=T_celsius+273.15
B=970.43146598-10.001392253*T+.034056662648*T*T
& -3.8613683343d-5*T**3
C=-27.036068044+.27995557712*T-.00096062280174*T*T
& +1.0941819338d-6*T**3
D=.19624504556-.0020225892738*T+6.9220560583d-6*T*T
& -7.8710335530d-9*T**3
mu_eg=exp(B+C*pct+D*pct*pct)
return
end
FUNCTION I_0(x)
implicit double precision (a-z)
t=x/3.75
I_0=1.+3.5156229*t*t+3.0899424*t**4+1.2067492*t**6
& +.2659732*t**8+.0360768*t**10+.0045813*t**12
return
end
FUNCTION I_1(x)
implicit double precision (a-z)
t=x/3.75
I_1=x*(.5+.8789059*t*t+.51498869*t**4+.15084934*t**6
& +.02658733*t**8+.00301532*t**10+.00032411*t**12)
return
46
end
FUNCTION K_0(x)
implicit double precision (a-z)
K_0=-log(x/2.)*I_0(x)-.57721566+.42278420*(x/2.)**2+
& .23069756*(x/2.)**4+.03488590*(x/2.)**6+.00262689*
& (x/2.)**8+.00010750*(x/2.)**10+.00000740*(x/2.)**12
return
end
FUNCTION K_1(x)
implicit double precision (a-z)
K_1=(1/x)*(x*log(x/2.)*I_1(x)+1+.15443144*(x/2.)**2
& -.67278579*(x/2.)**4-.18156897*(x/2.)**6-.01919402*
& (x/2.)**8-.00110404*(x/2.)**10-.00004686*(x/2.)**12)
return
end
FUNCTION A1(x1,x2,r)
implicit double precision (a-z)
A1=2.*((-2.*x2+2.*r)*sqrt(-x2*x2+2*r*x2))/4.-cmplx(0.d0,1.d0)*
& r*r*log(cmplx(0.d0,1.d0)*(x2-r)+sqrt(-x2*x2+2*r*x2))/2.)
& -((-2.*x1+2.*r)*sqrt(-x1*x1+2*r*x1))/4.-cmplx(0.d0,1.d0)*
& r*r*log(cmplx(0.d0,1.d0)*(x1-r)+sqrt(-x1*x1+2*r*x1))/2.)
return
end
c*****

```