UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2017

SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN SISTEMA SOLAR TÉRMICO PARA SUMINISTRO DE AGUA CALIENTE.

LÓPEZ GONZÁLEZ, GASPAR ALEJANDRO

http://hdl.handle.net/11673/23329

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE

"SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN SISTEMA SOLAR TÉRMICO PARA SUMINISTRO DE AGUA CALIENTE"

GASPAR ALEJANDRO LÓPEZ GONZÁLEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO CON MENCIÓN EN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA : **PHD. RODRIGO BARRAZA VICENCIO**

PROFESOR CORREFERENTE : **PHD. MAURICIO OSSES ALVARADO**

AGOSTO – 2017

Agradecimientos

Mis sinceros agradecimientos a la Dirección de Mantenimiento de Infraestructura, al Defider y al Casino del Campus de la Universidad Técnica Federico Santa María por la información brindada para el desarrollo de este estudio. Agradezco también al señor Rodrigo Barraza V. por su guía y orientación para el desarrollo de este trabajo.

Además, quiero agradecer a mi tía Chichi, por su apoyo, confianza y amor incondicional durante todos los años que estuve estudiando en la universidad. A mis amigos, por el apoyo y cariño que siempre me entregaron.

Resumen

El presente estudio tiene por finalidad analizar la factibilidad técnico económica de instalar un sistema solar térmico con colectores planos en el campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María en Santiago de Chile, para suministrar agua caliente sanitaria a los servicios de duchas y lavaplatos del Campus. Actualmente la producción de agua caliente presenta fallas que se manifiestan en un servicio inadecuado, donde tres termos a gas se encuentran fuera de servicio.

Previamente a esta evaluación de factibilidad se presentan las características del sistema actual de calentamiento de agua, donde se realizan mediciones de los servicios para determinar su estado y estimar la demanda de agua caliente sanitaria del campus. La demanda diaria de todos los servicios del campus es de 9752 [L], a una temperatura de 60 [°C] que corresponde a la temperatura de almacenamiento de los termos.

La factibilidad técnica se realiza a través de simulaciones con el software Trnsys 17, esta herramienta permite realizar balances de masa y energía entre distintos equipos, esto permite verificar si la instalación satisface la demanda de agua caliente sanitaria a las temperaturas requeridas por los servicios. Además de determinar el consumo de energía de los termos eléctricos.

En este estudio se simulan tres instalaciones de producción de agua caliente sanitaria. El primer caso corresponde a la instalación actual, donde se verifica que no se satisfacen las temperaturas requeridas por los servicios. El segundo caso corresponde a una instalación que satisface las temperaturas de los servicios, para lograr esto se agregan termos eléctricos nuevos, se reutilizan los termos a gas y se agregan válvulas mezcladoras, el costo de implementar esta solución es de $4.324.665 [CLP]. El tercer caso corresponde a una instalación solar térmica centralizada con colectores planos, la cual es dimensionada de acuerdo a guías de diseño elaboradas por el Ministerio de Energía.

El estudio económico de la instalación solar térmica dimensionada, indica que es rentable realizar este proyecto, a 20 años, donde la inversión se recupera en un plazo de 15,24 años. Sin embargo realizando variaciones en el diseño se logra disminuir el tiempo de recuperación de la inversión a 12,83 años, la cual es de $20.774.688 [CLP]. Finalmente los índices económicos del proyecto, arroja un VAN de $ 5.179.855 [CLP] y un TIR de 11 [%].

Abstract

The object of the following study is the analysis of the technical and economic feasibility of a thermic solar system, installed with flat plate solar collectors on the university campus San Joaquín "Universidad Técnica Federico Santa María" in Santiago de Chile. The system supplies hot water to the sanitary facilities (showers) and to the dishwashers to the whole university campus. The current hot water process is defective, due to three storage water heater run by gas which are out of service. This leads to an inadequately condition of the hot water supply in the University.

First of all the evaluation of the realisability shows the characteristics of the current water heating system. These characteristics where established through the measuring of the services, to determine the present status and to estimate the hot water consumption within the University. The daily water consumption on the San Joaquín campus, including all facilities, is 9752 [L] with a temperature of 60[°C] which accords to the storage temperature in the water heaters.

The technical feasibility is revealed by simulations made with the Trnsys 17 software. This tool allows to realize an off-set of mass and energy between different thermic elements. This permits to verify if the installation satisfies the sanitary hot water consumption with the necessary temperatures. It also allows to define the energy consumption of the electric storage water heaters.

This study simulates three hot water producing sanitary instalations. The first case refers to the current installation, verifying that the necessary temperatures for the facility standard are not accomplished. The second case corresponds to an installation which achieves the temperatures in all facilities. To realize this new storage water heaters and a mixing thermostatic water valve have to be installed, the old storage water heaters run by gas are being reused. To implement this solution an amount of $4.324.665 [CLP] has to be invested. The last simulation shows a centralized solar thermic instalation consisting of flat plate solar collectors. This system is used in the design manuals, processed by the Chilean ministry of energy.

The economic analyse of the solar thermic insallation indicates that it is worth to realize this project after a duration of 20 years, because the investment is successful after 15,24 years. Of course this time period, until the investment has paid off, can be reduced with design variations down to 12,83 years and a total cost of $ 20.774.688 [CLP]. Finally the economic indexes of the project calculate a NPV of $ 5.179.855 [CLP] and an IRR of 11 [%].

Glosario

ACS	:	Agua Caliente Sanitaria
F0DDd	:	Edifico F, Nivel 0, Duchas, Defider, Damas
F0DDv	:	Edifico F, Nivel 0, Duchas, Defider, Varones
F0DDdv	:	Edifico F, Nivel 0, Duchas, Defider, Damas y Varones
F0LC	:	Edifico F, Nivel 0, Lavaplatos, Casino
F1LC	:	Edifico F, Nivel 1, Lavaplatos, Casino
F2LC	:	Edifico F, Nivel 2, Lavaplatos, Casino
B0DDve	:	Edifico B, Nivel 0, Duchas, Defider, Varones Exterior
B0DDd	:	Edifico B, Nivel 0, Duchas, Defider, Damas
B0DDvi	:	Edifico B, Nivel 0, Duchas, Defider, Varones Interior
B1DD	:	Edifico B, Nivel 0, Duchas, Defider, Damas
B1DF	:	Edifico B, Nivel 0, Duchas, Funcionarios
E0DFdvl	:	Edifico B, Nivel 0, Duchas, Funcionarios, , Damas y Varones Laboratorio
E0DFdva	:	Edifico B, Nivel 0, Duchas, Funcionarios, Damas y Varones Aseo
VAN	:	Valor actual neto
TIR	:	Tasa interna de retorno
Payback	:	Periodo de tiempo requerido para recuperar el capital inicial de una inversión.

Glosario

D	:	Demanda de Agua Caliente Sanitaria
N_{per}	:	Número de Personas
C	:	Consumo Per Cápita
U	:	Razón de Utilización
$\dot{Q}$	:	Potencia
Q	:	Energía
$\dot{m}$	:	Caudal Másico
m	:	Masa
Cp	:	Calor Especifico
T	:	Temperatura
U	:	Coeficiente de Pérdida Térmicas Promedio
A	:	Área
N	:	Número de Nodo
V	:	Volumen
h	:	Altura
ρ	:	Densidad
P	:	Potencia Eléctrica
c	:	Coeficiente Bomba
γ	:	Señal de Control
C_{min}	:	Capacidad Mínima
C_{max}	:	Capacidad Máxima
I_T	:	Irradiación Solar Total en el Plano del Colector
Fr	:	Factor de remoción
r	:	Factor de corrección
$a_0\|_{normal}$	:	Rendimiento Óptico
a	:	Coeficiente Global de Perdidas Térmicas del Colector
η	:	Eficiencia
F	:	Fracción Solar

Índice

1 Antecedentes Generales 1

1.1 Descripción Del Problema 2

2 Objetivos Propuestos 3

2.1 Objetivo General 3

2.2 Objetivos Específicos 3

3 Análisis De Situación Actual 3

3.1 Características Del Sistema De Calentamiento De Agua 4

3.1.1 Producción De Agua Caliente Sanitaria 4

3.1.2 Utilización de Agua Caliente Sanitaria 5

3.1.3 Estado Del Servicio De Agua Caliente 7

3.1.4 Comportamiento en la Utilización de Agua Caliente 11

3.2 Características Combustible Utilizado 15

4 Determinación y Validación de la Demanda de Agua Caliente Sanitaria 15

4.1 Estimación de la Demanda de Diaria de Agua Caliente Sanitaria 15

4.2 Validación del Método para Determinar la Demanda 18

5 Condiciones Ambientales del Proyecto 19

5.1 Radiación Solar 19

5.2 Temperatura Agua De La Red 20

6 Modelo 21

6.1 Modelo de los Equipos Simulados 22

6.1.1 Termo Eléctrico 22

6.1.2 Válvula Mezcladora Termostática 25

6.1.3 Estanque Central 26

6.1.4 Bomba de Circulación 29

6.1.5 Intercambiador de Calor 31
6.1.6 Colector Solar Plano 33
6.2 Control de los equipos 37
6.2.1 Control del Calentador Eléctrico de los Termos 37
6.2.2 Control de la Válvula Mezcladora Termostática 38
6.2.3 Control de la Bomba de Circulación 38
7 Dimensionamiento y Costo de los Equipos 39
7.1 Instalación Distribuida Auxiliar de Respaldo 40
7.2 Instalación Centralizada Solar Térmica 40
7.2.1 Circuito de Consumo 41
7.2.2 Circuito Primario 41
7.2.3 Intercambiador de Calor 42
7.2.4 Circuito Secundario 43
7.2.5 Sistema de Impulsión 43
7.2.6 Sistema de Seguridad 43
7.2.7 Costos Totales 44
8 Simulación 44
8.1 Instalación Distribuida Actual 45
8.2 Instalación Distribuida Auxiliar de Respaldo 47
8.2.1 Adición y Reagrupación de Termos Eléctricos 48
8.2.2 Aumento de la Temperatura de Acumulación 48
8.2.3 Reutilización de Termos en Fuera de Servicio 49
8.3 Instalación Centralizada Solar Térmica 50
9 Análisis y Evaluación Económica 52
9.1 Análisis Instalación Distribuida Actual 53
9.2 Análisis Instalación Distribuida Auxiliar de Respaldo 53
9.2.1 Análisis Adición y Reagrupación de Termos Eléctricos 54

9.2.2 Análisis Aumento de la Temperatura de Acumulación 54
9.2.3 Reutilización de Termos Fuera de Servicio 55
9.3 Análisis Instalación Centralizada Solar Térmica 55
9.3.1 Análisis Variación Volumen de Estanque Central 56
9.3.2 Análisis Variación Número de Colectores 57
9.3.3 Análisis Variación Ángulo de Inclinación de Colectores 59
9.3.4 Análisis Variación Conexión de los Colectores 60
9.4 Instalación Centralizada Solar Térmica Final 62
10 Conclusiones 63
11 Referencias 66
Anexo 67
Anexo A 67
Anexo B 70
Anexo C 71
Anexo D 72
Anexo E 76

Figura 1.1: Plano de las instalaciones de la Universidad Técnica Federico Santa María campus San Joaquín (Fuente: Dirección de Mantenimiento de Infraestructura Campus San Joaquín) 1
Figura 3.1: Diagrama de Caja-Bigotes para la temperatura de las duchas 8
Figura 3.2: Diagrama de Caja-Bigotes para el caudal de las duchas 8
Figura 3.3: Diagrama de Caja-Bigotes para el tiempo de apertura de las duchas 9
Figura 3.4: Diagrama de Caja-Bigotes para la temperatura de los lavaplatos 10
Figura 3.5: Diagrama de Caja-Bigotes para el caudal de los lavaplatos 10
Figura 3.6: Número de alumnos que utilizan las duchas del Defider 12
Figura 3.7: Número de almuerzos elaborados y personal del casino que utiliza las duchas 12
Figura 3.8: Número de funcionarios de aceo y laboratorio que utilizan las duchas 13
Figura 3.9: Comportamiento diario del consumo de agua caliente sanitaria 13
Figura 3.10: Comportamiento anual del consumo de agua caliente sanitaria 14

Figura 4.1: Perfil diario de demanda de ACS del Defider 16
Figura 4.2: Perfil diario de demanda de ACS del Casino 17
Figura 4.3: Perfil diario de demanda de ACS de los Funcionarios 17
Figura 4.4: Comparación de la demanda de agua caliente sanitaria de los departamentos 18
Figura 5.1: Perfil diario de radiación global horizontal para Santiago (Fuente: Meteonorm) 20
Figura 5.2: Perfil anual de radiación global horizontal para Santiago (Fuente: Meteonorm) 20
Figura 5.3: Perfil anual de temperatura de la red para San Joaquín (Fuente: SST II) 21
Figura 6.1: Esquema básico de una instalación termos solar centralizada (Fuente: Adaptación SSTII) 21
Figura 6.2: Balance energia del estanque con calentador eléctrico (Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference) 24
Figura 6.3: Balance energía del nodo i del termo eléctrico (Fuente: Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference) 24
Figura 6.4: Balance energia de la valvula termostática 26
Figura 6.5: Balance energia del estanque central (Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference) 28
Figura 6.6: Balance energia del nodo i del estanque central (Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference) 29
Figura 6.7: Balance energia del intercambiador de calor (Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference) 33
Figura 6.8: Balance energia colector plano (Fuente:Adaptación Solar District Heating Guidelines) 35
Figura 8.1: Esquema de simulación de un termo eléctrico distribuido (Fuente: Trnsys 17) 46
Figura 8.2: Esquema general de simulación de producción de ACS distribuida actual (Fuente: Trnsys 17) 46
Figura 8.3: Temperatura de suministro de los servicios 47
Figura 8.4: Esquema general de simulación de producción de ACS distribuida propuesta (Fuente: Trnsys 17) 48
Figura 8.5: Temperatura de suministro de los servicios 48
Figura 8.6: Temperatura de suministro de los servicios 49
Figura 8.7: Temperatura de suministro de los servicios 50
Figura 8.8: Esquema de simulación del sistema solar térmico centralizado (Fuente: Trnsys 17) 51
Figura 8.9: Temperatura de suministro de los servicios 52
Figura 9.1: Resultado del análisis de variación volumen de estanque central 57
Figura 9.2: Resultado del análisis de variación número de colectores. 58

Figura 9.3: Fracción solar para una istalación con 44 colectores 59
Figura 9.4: Resultado del análisis de variación ángulo de inclinación 60
Figura 9.5: Resultado del análisis de variación conexión de los colectores 61
Figura 9.6: Ejemplo conexión serie paralelo de los colectores (Fuente: Sistemas Solares Térmicos II.) 61

Tabla 3.1: Clasificación de los equipos que producen ACS 4
Tabla 3.2: Características de los equipos disponibles que producen ACS 5
Tabla 3.3: Clasificación de las duchas del campus 6
Tabla 3.4: Clasificación de los lavaplatos del campus 6
Tabla 3.5: Parámetros optimos del servicio de agua caliente sanitaria 6
Tabla 3.6: Estado del servicio de agua caliente en el campus 11
Tabla 3.7: Comportamiento en la utilización de los servicios de ACS 14
Tabla 4.1: Comparación de estimación de la demanda de ACS 19
Tabla 7.1: Tabla de costos de la instalación distribuida auxiliar de respaldo 40
Tabla 7.2: Tabla de costos de la instalación termo solar centralizada inicial 44
Tabla 9.1: Resultados económicos de la instalación distribuida actual 53
Tabla 9.2: Resultados económicos de la instalación distribuida propuesta 54
Tabla 9.3: Resultados económicos de la instalación distribuida propuesta 54
Tabla 9.4: Resultados económicos de la instalación distribuida propuesta. (Fuente: Elaboración propia) 55
Tabla 9.5: Resultados económicos de la instalación base 56
Tabla 9.6: Resultados económicos de la instalación con estanque de 1000 [l] 57
Tabla 9.7: Resultados económicos de la instalación con 44 colectores 59
Tabla 9.8: Resultados económicos de la instalación termosolar centralizada Final 62
Tabla 9.9: Tabla de costos de la instalación termosolar centralizada Final 62

Introducción

Un mayor uso de la energía solar es un ingrediente clave para forjar ciudades resilientes. Esto reconoce la importancia de que el tejido urbano pueda utilizar fuentes de energía renovables para ser cada vez más sostenibles. En este sentido, la integración de los sistemas activos de energía solar en el entorno permitirá a las ciudades alcanzar un alto nivel de sustentabilidad [1]. De esta manera asegurar su consumo y reducir la dependencia de combustibles fósiles, ya que a nivel mundial, el 66% del consumo de calor es generado por combustibles fósiles y el 45% es utilizado en las industrias para satisfacer sus consumos térmicos [2].

A nivel residencial la producción de agua caliente sanitaria (ACS) de Chile está en desarrollo. Según estudios del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), de los más de 4,2 millones de hogares que había en 2002, solo unos 2,4 millones disponen de sistemas de producción de ACS; donde se estima que, actualmente, un 90% corresponde a calefones que usan como combustible gas y el porcentaje restante son termos eléctricos [3].

Actualmente la tecnología solar térmica puede cubrir un amplio rango de temperaturas: bajas ($T<100$ °C), medias (100 °C $< T < 250$ °C) y altas ($T > 250$ °C). Sin embargo el nivel de temperaturas bajas, rango requerido para la producción de ACS es el que tiene más variedad de tecnologías y proveedores. En Chile existen 39 proveedores de colectores solares autorizados por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, para acceder al Beneficio Tributario y al Subsidio Directo que permite financiar la instalación de Sistemas Solares Térmicos en viviendas nuevas. Dentro de los sistemas solares térmicos los colectores planos, son una de las tecnologias de baja temperatura mas utilizadas a nivel residencial e industrial, estos colectores utilizan la radiación directa y difusa, no requieren de dispositivo de seguimiento solar, necesitan baja mantención, son económicos y mecánicamente simples.

Debido a lo anteriormente expuesto se hace necesario evaluar la factibilidad técnico económica de instalar un sistema solar térmico con colectores planos en el campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María en Santiago de Chile, para suministrar agua caliente sanitaria a los servicios de duchas y lavaplatos del Campus. Actualmente la producción de agua caliente presenta una calidad de servicio deficiente, específicamente en las duchas del campus, incluso en las nuevas instalaciones.

En este trabajo se determina la línea base (Situación Actual) y en base a esta se propone mejoras al sistema actual con termos eléctricos, que suministren las temperaturas requeridas por los servicios. Además de proponer un sistema solar térmico, con el objetivo de mejorar la calidad y confiabilidad del servicio, así como también disminuir los costos por uso de energía eléctrica que conlleva el actual sistema. Donde a través de simulaciones se debe evalúa y optimiza el diseño de manera de minimizar el tiempo de recuperación de la inversión.

1 Antecedentes Generales

El campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María está ubicado dentro de la zona urbana de Santiago de Chile, con altos índices de suciedad del aire, específicamente en la dirección Av. Vicuña Mackenna 3939 en la comuna de San Joaquín, en la latitud -33.4906 y longitud del -70.6195 hemisferio sur, a una altitud de 562 [m] sobre el nivel del mar.

Actualmente el campus tiene dos tipos de servicios que consumen agua caliente (ACS) los lavaplatos del casino y las duchas para alumnos y funcionarios. Esta demanda está repartida en tres áreas del campus, específicamente en los edificios E, F y B como se observa en la Figura 1.1. El edificio F tiene cinco pisos sin considerar la azotea, donde solo se consume agua caliente en sus 3 niveles inferiores. El edificio B tiene dos niveles donde solo se consume agua caliente en el nivel inferior. El edificio E tiene tres niveles donde solo se consume agua caliente en su nivel inferior. Además para estos tres edificios coincide que su nivel inferior es subterráneo, el cual se denomina nivel 0.

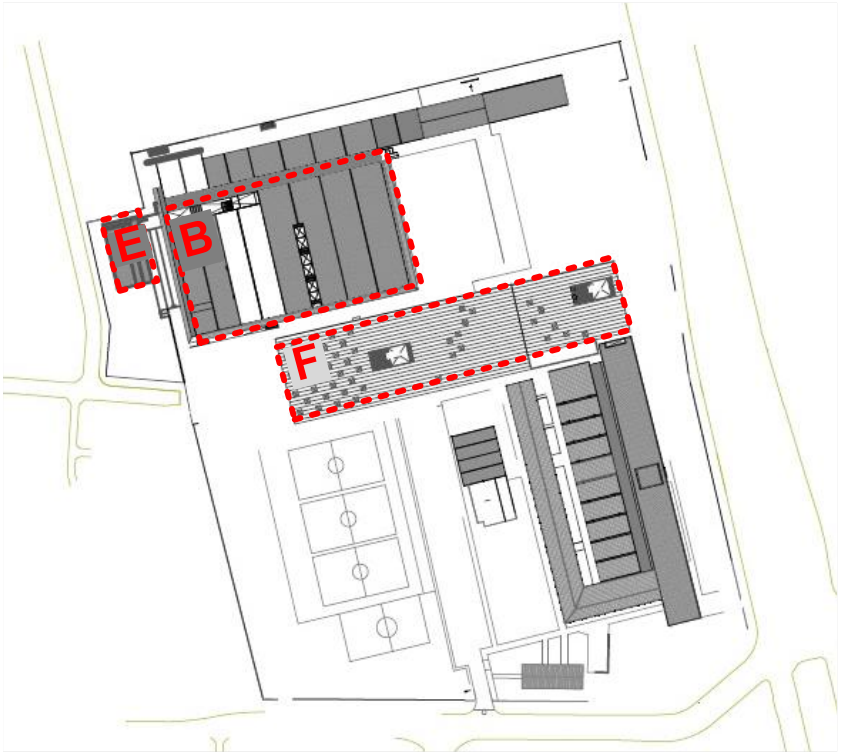


Figura 1.1: Plano de las instalaciones de la Universidad Técnica Federico Santa María campus San Joaquín (Fuente: Dirección de Mantenimiento de Infraestructura Campus San Joaquín)

Entre los tres edificios identificados se realizan en promedio 724 duchas diarias y por su parte el casino elabora alrededor de 877 almuerzos diarios, ambos servicios concentran su demanda de agua (ACS) al medio día, con un funcionamiento similar para los días de la semana con baja variabilidad, sin embargo los fines de semana su demanda es nula, al igual que los días feriados y vacaciones de funcionarios. Otra característica considerable de la utilización es la baja demanda de agua caliente (ACS) cuando no se realizan actividades académicas, como las vacaciones de los alumnos, fiestas patrias, semana de aniversario y semana mechona, donde las más extensas son las vacaciones de verano que comienzan en diciembre y terminan en marzo.

1.1 Descripción Del Problema

Los problemas que presentan los servicios de ACS dependen tanto de las instalaciones como de los equipos de producción de ACS, para evaluar el estado de los servicios se realizan mediciones y se definen parámetros adecuados de funcionamiento, como resultado de este estudio se obtuvo que de la totalidad de las duchas solo 23 [%] entrega temperaturas dentro de los parámetros óptimos, donde se identifica que los termos a gas no suministran agua caliente a 22 duchas del edifico B, el 32 [%] entrega un caudal adecuado y el 23 [%] entrega un tiempo de apertura adecuada, se estudia el tiempo de apertura ya que las duchas utilizan un temporizador que controla la duración de las duchas. De la totalidad de los lavaplatos solo un 56 [%] entrega una temperatura óptima y un 94 [%] entrega un caudal óptimo, en el Capítulo 3.1.3 se especifican los detalles de este estudio.

Los problemas de caudal y tiempo de apertura de las duchas se deben principalmente a la falta de mantenimiento de las instalaciones, por lo tanto se debe realizar una remodelación, además de definir un mantenimiento, con el objetivo que las instalaciones funcionen bajo los parámetros óptimos y no vuelva a ocurrir lo mismo. Respecto a los problemas de temperatura se deben principalmente al mal estado de los termos a gas, lo que provoca una concentración de usuarios en las duchas con termos eléctricos, en los capítulos siguientes se estudia esta hipótesis, además de estudiar distintas soluciones como la reagrupación y adición de termos eléctricos o la regulación de su temperatura de almacenamiento. También se propone la integración de un sistema solar térmico con el objetivo cubrir una fracción de la demanda de ACS de los termos del campus, con una alta confiabilidad del servicio, también se logra una reducción directa de costo de la electricidad asociado al calentamiento de agua, donde la inversión se amortiza con este ahorro energético. Desde el punto de vista medioambiental se logra reducir las emisiones de CO_2, además de proporcionan un valor agregado a la Universidad por utilizar tecnologías amigables con el medio ambiente.

2 Objetivos Propuestos

Los objetivos definidos para este trabajo de título son los siguientes:

2.1 Objetivo General

Diseñar un sistema solar térmico y evaluar su factibilidad técnica y económica a través de una simulación dinámica.

2.2 Objetivos Específicos

•Determinar la situación actual incluyendo el diagnóstico del sistema, requerimientos de agua caliente real del campus, evaluar la infraestructura y sistemas existentes.

•Diseñar y dimensionar el sistema solar térmico capaz de suministrar el agua caliente requerido en el campus.

•Estudiar distintas alternativas solares (Angulo de colectores, almacenamiento) y analizar la pertinencia de un sistema híbrido incluyendo parámetros económicos

•Especificar el sistema solar térmico recomendado a nivel de ingeniería conceptual, para poder ser utilizado en las bases de licitación del proyecto

3 Análisis De Situación Actual

Para estudiar las hipótesis de la fallas, proponer soluciones y crear el diseño de un sistema solar térmico es fundamental realizar un estudio consistente de la situación actual del suministro de ACS, ya que es la base de todos los cálculos posteriores, en este estudio se determinan las características de la producción y la utilización de agua caliente. También se debe determinar las características del combustible utilizado, que junto con lo anterior permite realizar un dimensionamiento y una evaluación económica del sistema solar térmico.

3.1 Características Del Sistema De Calentamiento De Agua

Las principales características de un sistema de ACS son los equipos de producción, los servicios de utilización y el comportamiento de los usuarios, los usuarios de la universidad son principalmente los alumnos y los funcionarios de casino, sin embargo los funcionarios de los laboratorios y aseo también los utilizan.

3.1.1 Producción De Agua Caliente Sanitaria

Los equipos que utiliza el campus para producir ACS son únicamente termos con un calentador integrado (eléctrico o gas), que son básicamente un estanque aislado que mantiene el agua caliente hasta su utilización, luego se reemplaza el agua utilizada y baja su temperatura, esto enciende el calentador comandado por un termostato hasta alcanzar la temperatura de almacenamiento, estos termos no tienen una válvula mezcladora, por lo tanto la temperatura del termostato debe ajustarse a la temperatura de utilización de los servicios. Este calentador puede ser eléctrico o de combustión de gas, sin embargo los tres termos a gas de 700 [L] se encuentran fuera de servicio, ya que su calentador está en mal estado, por lo tanto los únicos equipos disponibles para la producción de ACS son los termos eléctricos, 8 equipos de la marca Winter con una capacidad de 700 [L] y 2 equipos de la marca Albin Trotter de capacidad 600 [L] y 250 [L].

La ubicación de los termos está distribuida en los tres edificios representados en la Figura 1.1, todos los termos de la marca Winter se encuentran en el edificio F, que corresponde a la última construcción del campus, el año 2014, los termos de la marca Albin Trotter se encuentran separados, uno se ubica en el edificio B y el otro en el edificio E, el equipo de menor capacidad se ubica en el edificio E y el de mayor en el B. El detalle de la ubicación de cada termo se observa en las figuras del Anexo A, donde se determina su localización especifica dentro de un plano, sin embargo en la Tabla 3.1 se entrega un resumen de la ubicación general, usuario y cantidad de termos por sector, además se define una nomenclatura, donde las letras minúsculas representan el sexo de los usuarios, estos son damas (d) , varones (v) o ambos (dv), para el edificio B se diferencia entre una instalación con acceso desde el interior (i) y exterior (e) del edificio, para el edificio E se diferencian los baños de los funcionarios del aseo (a) y funcionarios del laboratorio (l).

Tabla 3.1: Clasificación de los equipos que producen ACS

Nomenclatura	Edificio	Nivel	Servicios	Usuario	Calentador	Marca	Total [-]
F0DDd	F	0	Ducha	Defider	Eléctrico	Winter	1
F0DDv	F	0	Ducha	Defider	Eléctrico	Winter	1
F0DCdv	F	0	Ducha	Casino	Eléctrico	Winter	1
F0LC	F	0	Lavaplatos	Casino	Eléctrico	Winter	1
F2LC	F	2	Lavaplatos	Casino	Eléctrico	Winter	4
B0DDve	B	0	Ducha	Defider	Eléctrico	Albin Trotter	1
B1DD	B	1	Ducha	Defider	Gas		2
B1DF	B	1	Ducha	Funcionarios	Gas		1
E0DFdva	E	0	Ducha	Funcionarios	Eléctrico	Albin Trotter	1
							13

En la Tabla 3.2 se detallan las principales características de los 3 modelos de termos eléctricos utilizados. Los termos a gas no se consideran dentro del registro de equipos disponibles debido a su mal estado, además se encuentran fuera del edificio B, ya que no se pueden ubicar dentro del edificio por la emisión de gases contaminantes.

Tabla 3.2: Características de los equipos disponibles que producen ACS

Equipo	Marca	Modelo	Potencia [kW]	Capacidad [L]	Voltaje [V]	Numero [-]
Termo eléctrico	Winter	T9*700 AC/T	9	700	380	8
Termo eléctrico	Albin Trotter	TER-600-380-9	9	600	380	1
Termo eléctrico	Albin Trotter	Prima	3	250	380	1

3.1.2 Utilización de Agua Caliente Sanitaria

Los servicios que consumen ACS son 62 duchas y 16 lavaplatos. Estos servicios son utilizados por distintos usuarios, 48 duchas son utilizadas por los alumnos y están a cargo del Defider, que es el Departamento de Deporte del campus, 10 duchas son utilizadas por los funcionarios de aseo y de los laboratorios de la universidad y 4 duchas utilizadas por el personal del casino. El total de los lavaplatos son utilizados por el casino de la universidad.

La ubicación en detalle de estos servicios se observa en las figuras del Anexo A, sin embargo en la Tabla 3.3 y Tabla 3.4, se entrega un resumen de la ubicación general, usuario y cantidad de servicios para las duchas y lavaplatos, donde se entrega la misma nomenclatura utilizada para la producción de

agua, sin embargo se debe considerar que los termos del casino del edificio F del nivel 2 suministra ACS a los lavaplatos del nivel 1 y 2.

Tabla 3.3: Clasificación de las duchas del campus

Nomenclatura	Edificio	Nivel	Servicios	Usuario	Calentador	Cantidad [-]
F0DDd	F	0	Ducha	Defider	Eléctrico	7
F0DDv	F	0	Ducha	Defider	Eléctrico	7
F0DCdv	F	0	Ducha	Casino	Eléctrico	4
B0DDve	B	0	Ducha	Defider	Eléctrico	14
B0DDd	B	0	Ducha	Defider	Gas	10
B0DDvi	B	0	Ducha	Defider	Gas	10
E0DFdvl	E	0	Ducha	Funcionarios	Gas	8
E0DFdva	E	0	Ducha	Funcionarios	Eléctrico	2
						62

Tabla 3.4: Clasificación de los lavaplatos del campus

Nomenclatura	Edificio	Nivel	Servicios	Usuario	Calentador	Cantidad [-]
F0LC	F	0	Lavaplatos	Casino	Eléctrico	3
F1LC	F	1	Lavaplatos	Casino	Eléctrico	10
F2LC	F	2	Lavaplatos	Casino	Eléctrico	3
						16

Estos servicios tienen distintas características, principalmente en su activación, las duchas tienen un botón con temporizador y los lavaplatos una válvula de bola manual, esta característica determina los parámetros del servicio, que son fundamentales para el diseño de una instalación, estos parámetros son el caudal, el tiempo de apertura y la temperatura para las duchas, para los lavaplatos solo se tiene caudal y temperatura, en la Tabla 3.5 se detallan los valores adecuados de estos parámetros [3].

Tabla 3.5: Parámetros optimos del servicio de agua caliente sanitaria

Servicio	Caudal [L/min]	Temperatura [°C]	Tiempo de apertura [s]
Ducha	8	37	30
Lavaplatos	7-15	45	-

Estos parámetros son ideales, ya que todos los servicios tienen cierta variabilidad entre cada instalación sanitaria, para determinar estos parámetros se encuestó a los usuarios realizando mediciones en los servicios donde manifestaron su aprobación. En las duchas el caudal es bajo en comparación con una ducha convencional, esto se debe a que al inicio y al final de la apertura disminuye el flujo, para la temperatura se define su valor optimo en 37 [°C], que es la temperatura de confort del cuerpo humano [3], en los lavaplatos a diferencia de las duchas tienen distintos tamaños de llaves por lo tanto distintos caudales y una temperatura mayor para mejorar la acción del detergente, sin embargo se deben utilizar guantes, ya que al superar los 40 [°C] se pueden producir quemaduras en la piel por exposición prolongada [4].

3.1.3 Estado Del Servicio De Agua Caliente

Una vez definidos los parámetros óptimos de funcionamiento en la Tabla 3.5, además de identificar las características, el número y la ubicación de estos servicios, es fundamental conocer el estado en que se encuentran, con el objetivo de encontrar el problema específico que afecta al campus. Para evaluar el estado de los servicios se realizaron mediciones de temperatura, caudal y tiempo de apertura, para 60 de las 62 duchas, ya que las dos duchas ubicadas en el camarín de los funcionarios de aseo del edifico E (E0DFdva) tiene llave manual y no botón, para estas duchas solo se midió temperatura y caudal, al igual que los 16 lavaplatos del campus.

Con los datos recopilados se construyen diagramas de Caja-Bigotes (Boxplots), que es una presentación visual que describe la dispersión y simetría de las variables. Gráficamente se representan los tres cuartiles y los valores mínimo y máximo de los datos, sobre un rectángulo, alineado verticalmente. Estos Diagramas se elaboran para cada parámetro de los servicios, donde se agrupan los datos por ubicación y por tipos de calentador del termo, además se observa el estado de los servicios, a través de la línea roja que representa el valor ideal para cada parámetro.

Para estudiar el estado de los termos se ordenan los datos de temperatura de las duchas en la Figura 3.1, donde se logra comprobar que los termos a gas no suministran agua caliente a 22 duchas del edifico B en el nivel 0, además se observa que la duchas de los otros edificios no están suministrando agua a la temperatura optima establecida anteriormente, la cual es identificada con la línea roja.

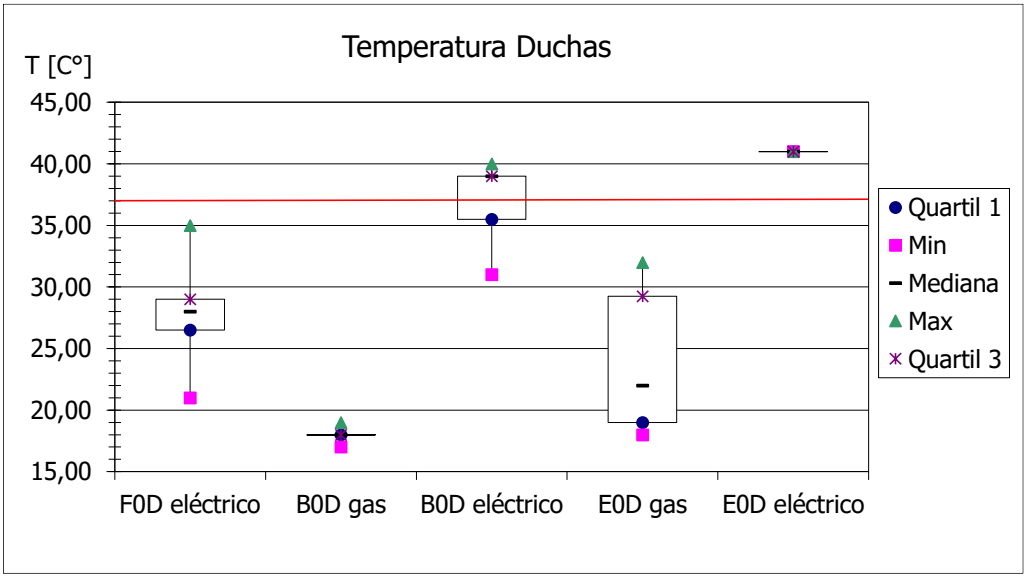


Figura 3.1: Diagrama de Caja-Bigotes para la temperatura de las duchas

Para estudiar el estado de las instalaciones sanitarias en las duchas se ordenan los datos de caudal en la Figura 3.2, donde se logra comprobar la variabilidad en el caudal de las duchas, las cuales se alejan del caudal óptimo.

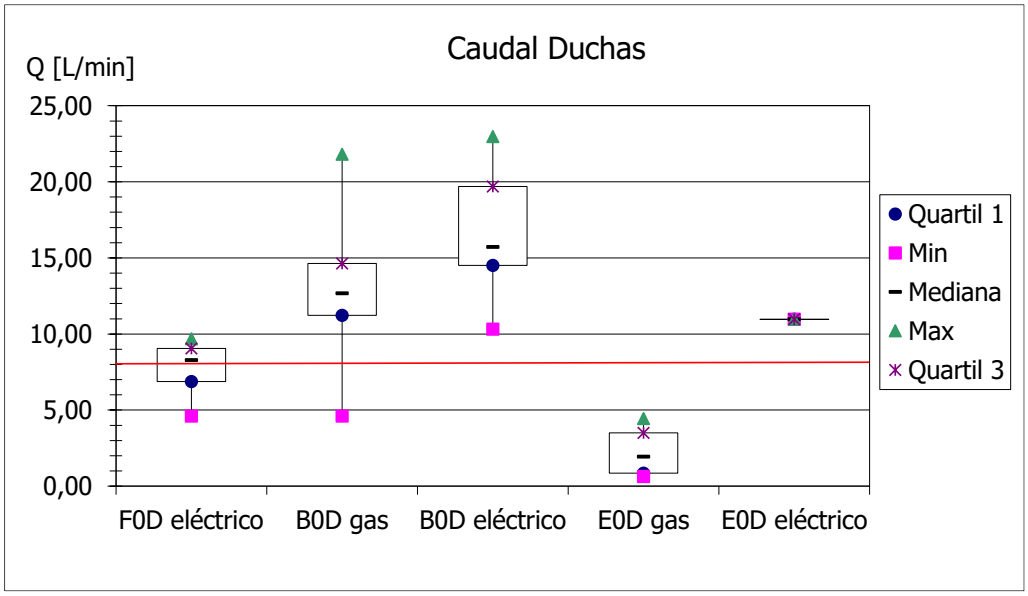


Figura 3.2: Diagrama de Caja-Bigotes para el caudal de las duchas

Para estudiar el estado del botón de activación se mide el tiempo y se ordenan los datos en la Figura 3.2, excluyendo las duchas del camarín de auxiliares de aseo, ya que tienen ajuste manual.

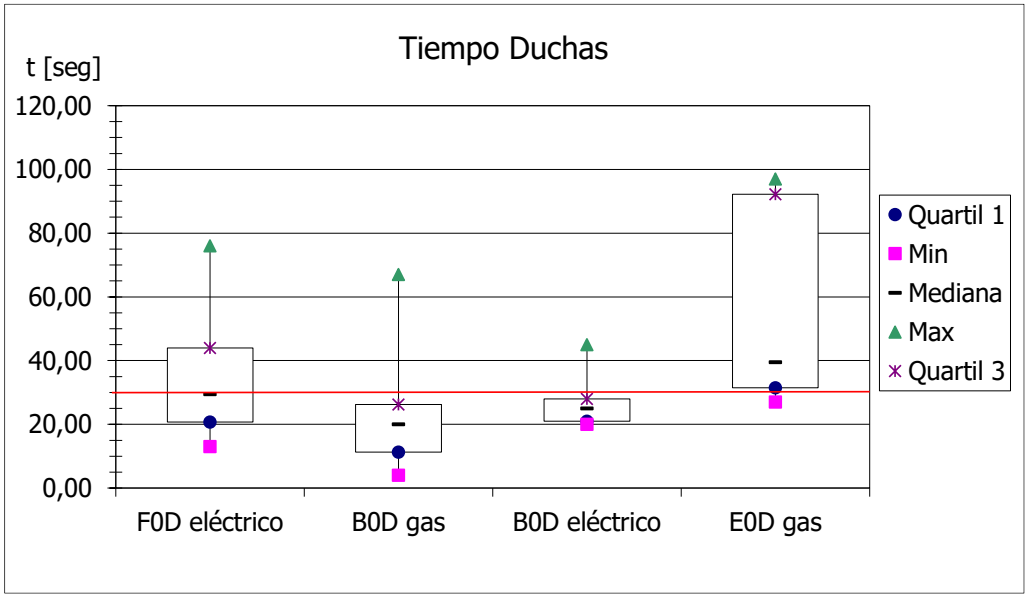


Figura 3.3: Diagrama de Caja-Bigotes para el tiempo de apertura de las duchas

Al observar la Figura 3.2 y la Figura 3.3 se puede determinar que las duchas del edificio B entregan gran cantidad de agua en poco tiempo, lo que corresponde a duchas intensas pero poco eficientes, ya que los usuarios deben apretar el botón una mayor cantidad de veces, disminuyendo la satisfacción del usuario y aumentando el consumo de agua caliente.

Para los lavaplatos se ordenan los datos por ubicación, donde todos los servicios están en el edificio F y sólo se produce agua caliente con termos eléctricos. Al observar la Figura 3.4 se determina una menor variabilidad entre los servicios de un mismo nivel en comparación con las duchas. Sin embargo, se observa una gran diferencia entre las temperaturas de cada nivel, esta diferencia corresponde a la temperatura que se encontraba regulado el termostato al momento de realizar la medición, donde en el nivel 0 se encontraba regulada a la temperatura de 59 [°C].

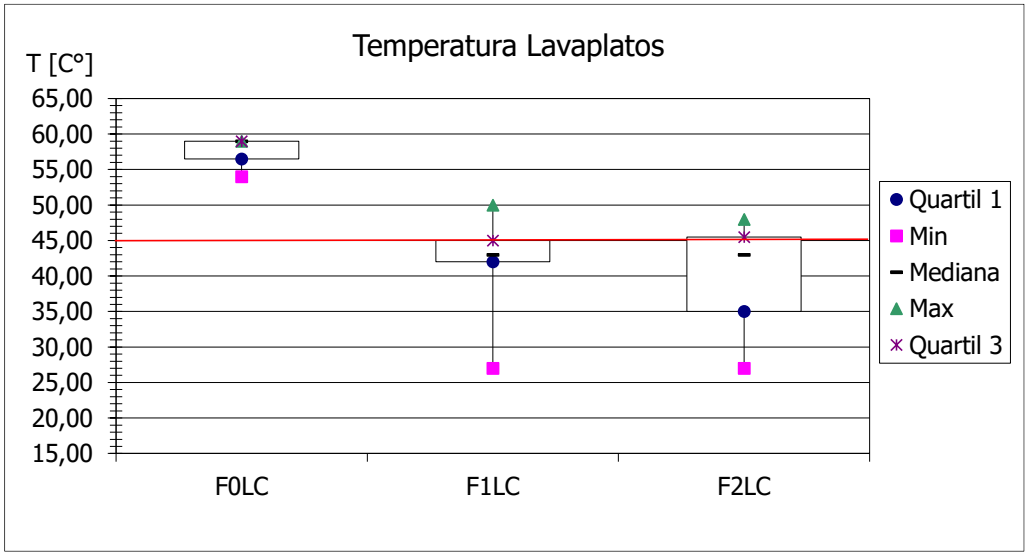


Figura 3.4: Diagrama de Caja-Bigotes para la temperatura de los lavaplatos

En la Figura 3.5, que estudia el caudal de los lavaplatos, se observan dos líneas que especifican el caudal ideal, ya que existen distintos tipos de llaves en el servicio, lo cual dificulta un estudio más detallado, sin embargo sus caudales se encuentran dentro de este rango optimo y con variaciones similares entre los niveles de edificio.

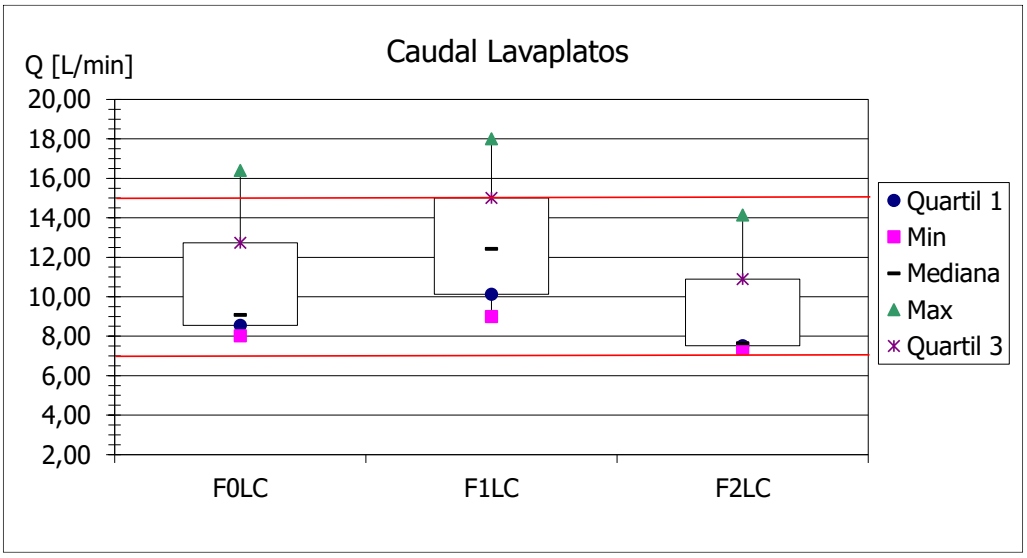


Figura 3.5: Diagrama de Caja-Bigotes para el caudal de los lavaplatos

Para evaluar las instalaciones se definen un rango en que los servicios se consideran adecuados para su uso, este rango se obtiene sumando y restando los siguientes valores propuestos, para la temperatura se propone ±3 [°C], para el caudal ±2 [l/min] y para el tiempo de apertura es ±5 [seg].

Con estos criterios y la información recopilada se elabora la Tabla 3.6, la cual representa el estado de las instalaciones sanitarias y equipos de producción en los servicios de agua caliente.

Tabla 3.6: Estado del servicio de agua caliente en el campus

Servicio	Parámetro	Optimo [-]	Deficiente [-]	Sin Servicio [-]	Estado [%]	Total [-]
Ducha	Temperatura	14	45	3	23	62
Ducha	Caudal	20	39	3	32	62
Ducha	Tiempo	14	43	3	23	60
Lavaplatos	Temperatura	9	6	1	56	16
Lavaplatos	Caudal	15	0	1	94	16

Este estudio demuestra el mal estado de los servicios, donde las duchas son las más afectadas, Sin embargo, para mejorar los parámetros de caudal y tiempo de apertura solo se deben realizar mantenciones a las instalaciones y ajustar a los parámetros óptimos, para los problemas de temperatura es necesario reemplazar los equipos a gas para suministrar agua caliente en el edificio B y E, lo primero ya está considerado por parte de la universidad, donde se está gestionando una remodelación de las instalaciones sanitarias y producción de ACS del edificio B. Sin embargo los termos eléctricos tampoco funcionan de acuerdo a lo planteado, donde existen tres hipótesis sobre el problema, la primera es que los termos no están regulados a la temperatura de consumo, la segunda hipótesis es que los termos requieren una válvula mezcladora de agua fría, que les permita acumular agua a una mayor temperatura para poder cubrir las horas de máxima demanda, la tercera hipótesis es que aun considerando la regulación y la adición de una válvula mezcladora los termos eléctricos no dan abasto a la demanda y se debe aumentar la capacidad de producción de agua caliente. En el capítulo 8 se realizaran simulaciones para determinar las causas de este problema, donde se estudiara la factibilidad de redistribuir los termos eléctricos e integrar un sistema termo solar para la producción de agua caliente, con el objetivo de disminuir los costos de electricidad y cubrir los periodos de máxima demanda.

3.1.4 Comportamiento en la Utilización de Agua Caliente

Con el objetivo de entender los problemas y proponer una solución eficiente a través de simulaciones, se estudia el comportamiento de los usuarios, estos son alumnos, funcionarios del casino, del laboratorio y del aseo, este comportamiento es diario, semanal y anual. Para determinar el perfil horario de la utilización promedio de usuarios, se recopila información con los departamentos

involucrados, en las duchas del Defider se consideran los horarios y el número de alumnos de las clases de educación física, deporte, sala de musculación y las selecciones de los deportes, lo que permite obtener que en promedio 621 alumnos diarios utilizan las duchas, principalmente dentro de las 11:00 y las 15:00 horas, esto se observa en la Figura 3.6. Además se determina el porcentaje de utilización, ya que no todos los alumnos asisten a las clases o se bañan, este porcentaje es de un 80%.

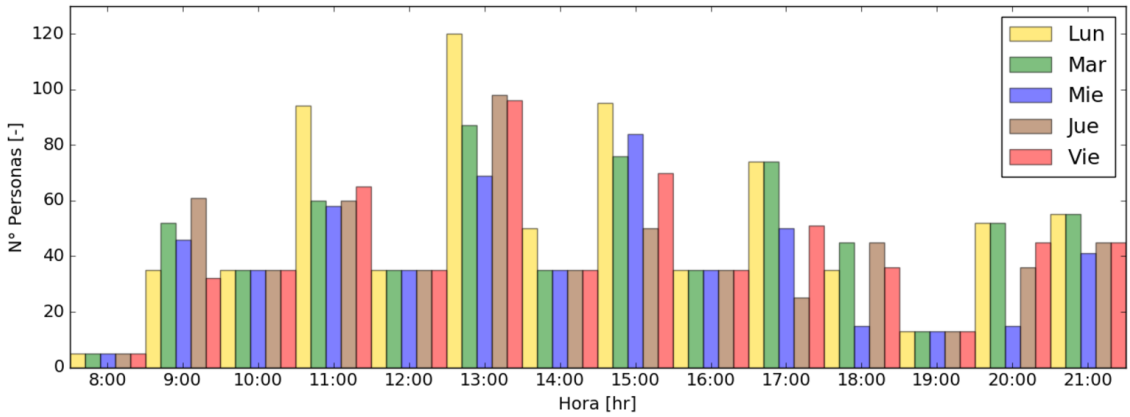


Figura 3.6: Número de alumnos que utilizan las duchas del Defider

Las duchas del casino tienen un comportamiento regular donde existen dos horarios de utilización con 22 usuarios, para los lavaplatos se estudia la elaboración de almuerzos de marzo a junio del año 2016, donde se logró determinar que en promedio almuerzan 877 personas diarias, estos platos se lavan desde las 13:00 hasta las 16:00 como se observa en la Figura 3.7, en los extremos se grafica el personal que utiliza las duchas y en el centro los almuerzos elaborados. Respecto al porcentaje de utilización de las duchas del casino, es menor que el de los alumnos, ya que un bajo número de los trabajadores del casino se baña en el campus, este porcentaje es de un 20%.

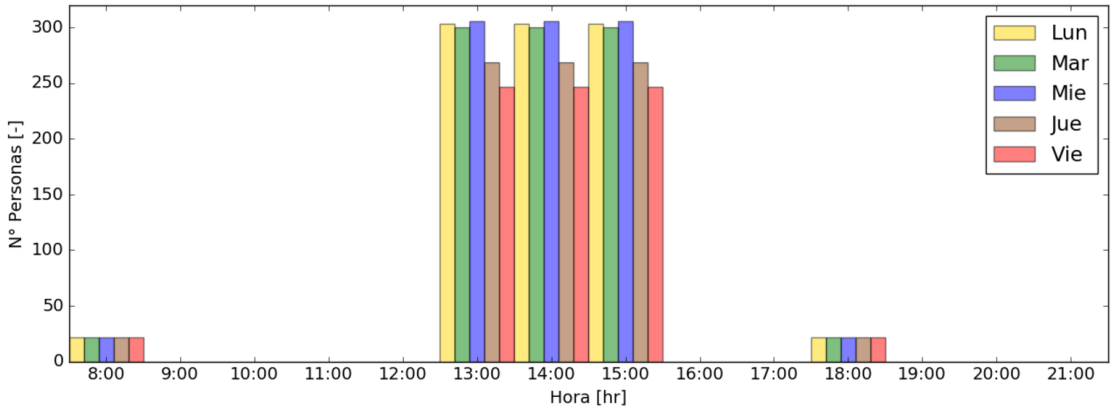


Figura 3.7: Número de almuerzos elaborados y personal del casino que utiliza las duchas

Las duchas de los auxiliares del aseo y los funcionarios de los laboratorios se utilizan en promedio 59 veces al día, principalmente en los horarios de entrada y de salida de los turnos, como se observa en la Figura 3.8, sin embargo el porcentaje de utilización es bajo al igual que el de los funcionarios del casino, este porcentaje es de 20 %.

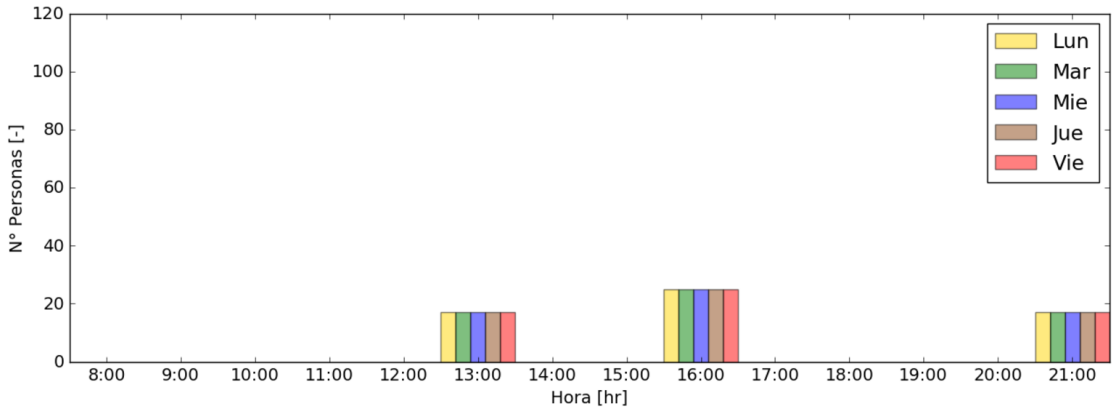


Figura 3.8: Número de funcionarios de aceo y laboratorio que utilizan las duchas

En los tres perfiles anteriores se grafica el comportamiento horario para los días de la semana laboral, de lunes a viernes, con estos datos se elabora un día promedio que determinara un perfil de demanda de ACS para los días de la semana, para el resto de la semana, de sábado a domingo, no existe utilización de los servicio, por los tanto el perfil de demanda será nulo, esta idea se observa en la Figura 3.9 que determina la asistencia de los usuarios.

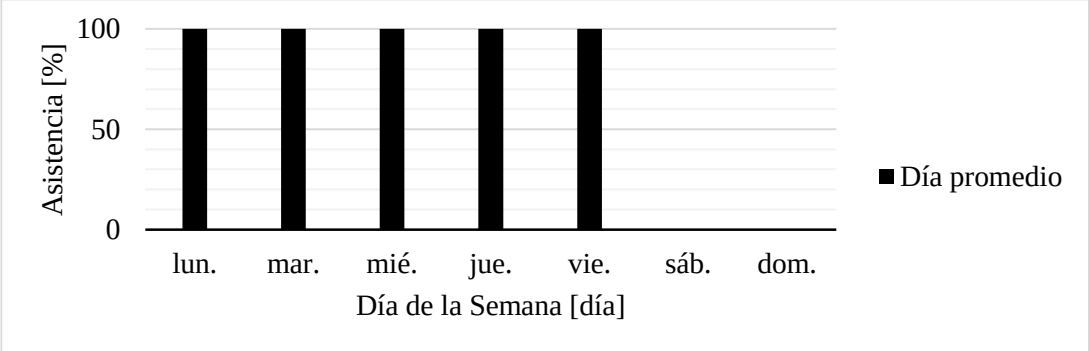


Figura 3.9: Comportamiento diario del consumo de agua caliente sanitaria

Continuando con la lógica anterior para determinar el perfil de demanda anual se considera los feriados del año, los periodos de vacaciones de los alumnos y de los funcionarios, obteniendo el perfil de la Figura 3.10, elaborado en base al calendario académico del año 2017, este grafico corresponde a la asistencia de los usuarios, donde para las vacaciones de los alumnos se mantiene la asistencia de

profesores funcionarios, alumnos memoristas y alumnos en clases de verano, lo que corresponde al 20% de la asistencia de un día regular.

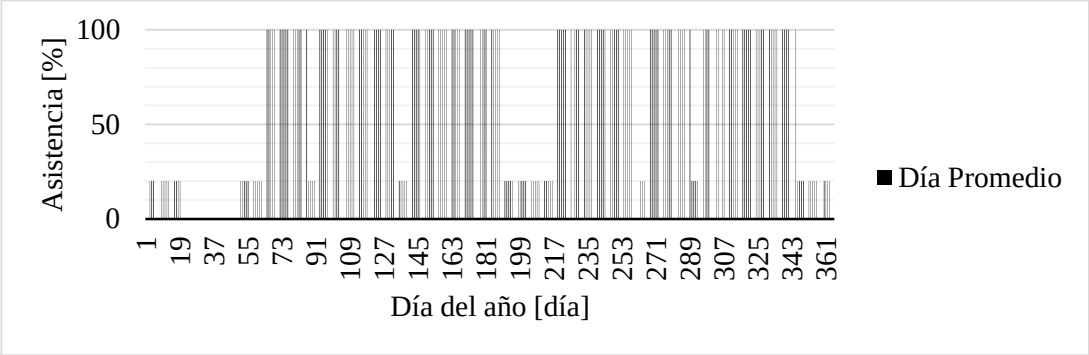


Figura 3.10: Comportamiento anual del consumo de agua caliente sanitaria

También se estudia el comportamiento de los usuarios al utilizar los servicios, en las duchas el parámetro que varía es el número de veces que acciona el botón de apertura, para determinar este valor se realizaron encuestas a variados grupos de usuarios y horarios, donde en promedio los usuarios presionan 6 veces el botón. En los lavaplatos el panorama es distinto, ya que dentro del periodo de lavado se tienen cuatro llaves abiertas de manera ininterrumpida y a un 70% de su caudal máximo, esto corresponde a tener un caudal de 28 [l/min] por 3 horas.

Para determinar el consumo de agua caliente por persona de las duchas, se consideran las veces que se acciona el botón de apertura por el tiempo óptimo de apertura, lo que nos entrega 3 [min], esto se multiplica por el caudal óptimo y se obtiene un consumo de 24 litros de agua caliente a 37 [°C]. Para obtener el consumo por persona de los lavaplatos se multiplica el caudal de las llaves abiertas por las 3 horas que permanecen abierta y se dividen por el número promedio de almuerzos elaborados, con esto se obtiene un consumo de 6 litros de agua caliente a 45 [°C], los resultados se resumen en la Tabla 3.7 que recopila las características del consumo de los servicios de ACS del campus.

Tabla 3.7: Comportamiento en la utilización de los servicios de ACS

Usuario	Servicios	Consumo [L/per]	Temperatura [°C]	Utilización [%]
Defider	Ducha	24	37	80
Casino	Ducha	24	37	20
Casino	Lavaplatos	6	45	100
Funcionarios	Ducha	24	37	20

3.2 Características Combustible Utilizado

Actualmente el campus solo utiliza energía eléctrica para producir ACS a través de 10 termos eléctricos, ya que los termos a gas están fuera de servicio, una ventaja de usar estos termos es que tienen una gran eficiencia y no emiten gases contaminantes, lo que permite ubicar los termos cerca de los servicios. La tarifa seleccionada es la AT-4.3 en un área 1 A, este contrato corresponde a una tarifa horaria opción 3 con una conexión en alta tensión de 1400 [kW] y una red aérea, los cargos efectuados por la distribuidora son el cargo fijo, el cargo único por uso del sistema troncal, el cargo por energía, el cargo por demanda máxima de potencia suministrada y el cargo por demanda máxima leída de potencia en horas punta. El cargo que nos interesa es el cargo por energía, que se obtiene multiplicando la energía [kWh] consumida por su precio unitario que corresponde a 74,5 [CLP/kWh], este es el cargo de mayor valor, que corresponde al 84,1 [%] del total de la boleta. También nos interesan los cargos por exceso de potencia, ya que si todos los termos están en funcionamiento consumen 84 [kW] de potencia, sin embargo para la evaluación económica solo se utiliza el cargo por energía. Los valores especificados son los datos promedios registrados en los meses de marzo abril mayo y junio de año 2016, donde está incluido el IVA.

4 Determinación y Validación de la Demanda de Agua Caliente Sanitaria

En este capítulo se determina el perfil de demanda diaria de agua caliente, donde se opta por utilizar un método estimativo, principalmente por el mal estado de los servicios, ya que al momento de realizar las mediciones se obtendrán datos de un servicio que no está funcionando de manera adecuada, donde muchos alumnos no utilizan las duchas por sus bajas temperaturas o por la espera de una ducha en buen funcionamiento (Edificio F). El detalle de los perfiles de demanda de ACS estimados en este capítulo se muestra en el Anexo B.

4.1 Estimación de la Demanda de Diaria de Agua Caliente Sanitaria

Esta estimación utiliza los resultados del análisis de situación actual, donde para determinar el perfil horario de demanda de agua caliente para los día de la semana laboral, se requiere el número de personas por hora que utilizan los servicios (N_{per}), el cual se determinan con los promedios de la Figura 3.6, Figura 3.7 y Figura 3.8, también se requieren los datos de consumo per cápita (C) y el

porcentaje de utilización de los usuarios (U) de la Tabla 3.7, luego se obtienen los siguientes perfiles de demanda para cada tipo de usuario, utilizando la Ecuación - 4.1.

$$D = N_{per} * C * U \ \left[\frac{L}{hr}\right] \qquad \text{- 4.1}$$

El perfil de demanda de la Figura 4.1 representa la demanda total de los servicios utilizados por el Defider, donde la temperatura de utilización es de 37 [°C], ya que es la adecuada para duchas.

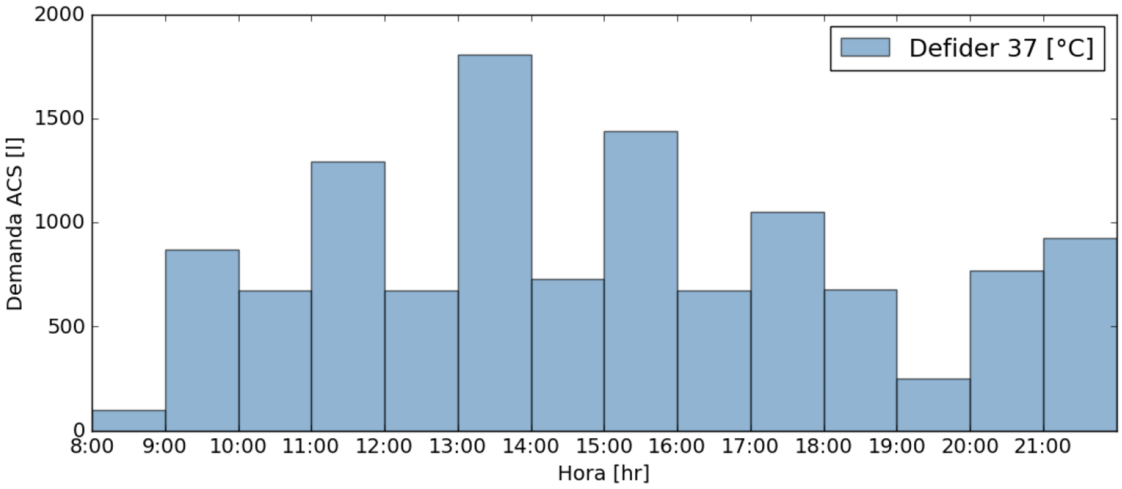


Figura 4.1: Perfil diario de demanda de ACS del Defider

El perfil de consumo de la Figura 4.2 representa la demanda total de los servicios utilizados por el Casino, donde la temperatura de utilización es de 37 [°C] para las duchas, esto se observa en los extremos del día, también se tiene la temperatura de utilización de 45 [°C] al medio día para los lavaplatos.

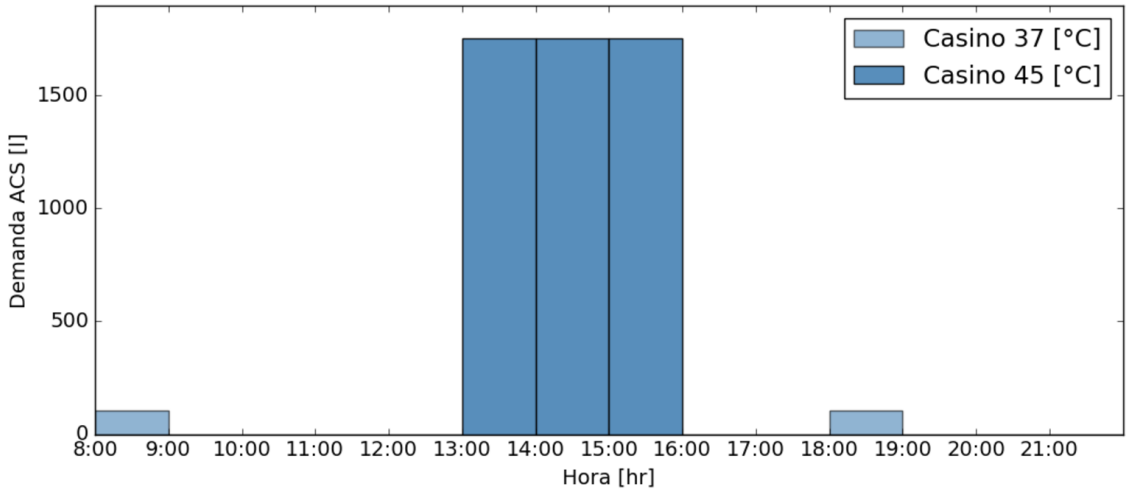


Figura 4.2: Perfil diario de demanda de ACS del Casino

El perfil de consumo de la Figura 4.3 representa la demanda total de los servicios utilizados por los Funcionarios, donde la temperatura de utilización es de 37 [°C].

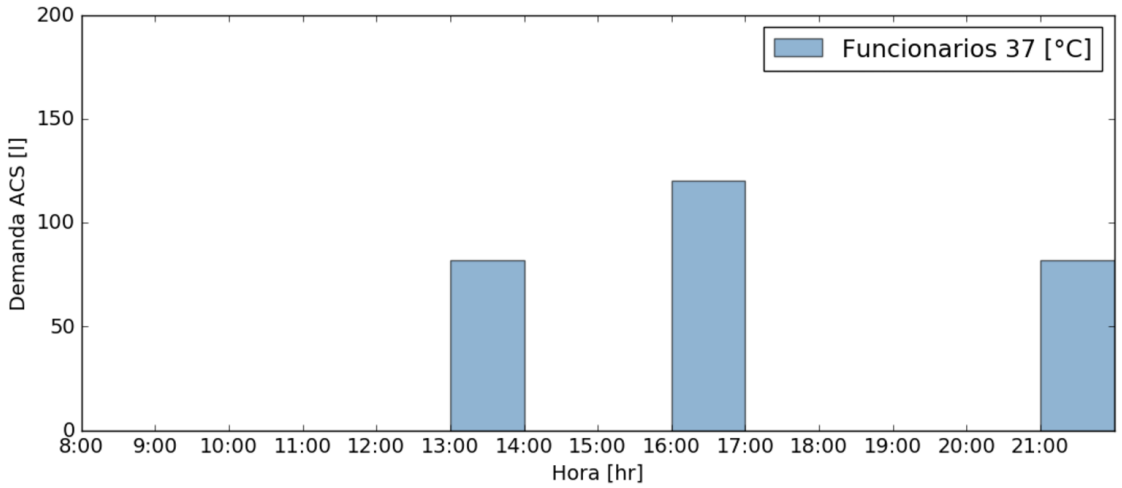


Figura 4.3: Perfil diario de demanda de ACS de los Funcionarios

Para comparar las demandas de los tres usuarios se considera un caudal de ACS a una temperatura de almacenamiento común, esta temperatura es de 60 [°C], este flujo se obtienen realizando un balance de energía entre las demandas a la temperatura de utilización ($\dot{Q}_{Utilización}$) y la demanda a la temperatura de almacenamiento ($\dot{Q}_{Almacenamiento}$), donde se considera la temperatura de la red (T_{Red})como el promedio anual que es 14 [°C] y el calor especifico del agua (Cp_{Agua}) constante, esto se observa en la Ecuación - 4.4.

$$\dot{Q}_{Utilización} = \dot{m}_{Utilización} * Cp_{Agua} * (T_{Utilización} - T_{Red}) \ [kW] \quad \text{- 4.2}$$

$$\dot{Q}_{Almacenamiento} = \dot{m}_{Almacenamiento} * Cp_{Agua} * (T_{Almacenamiento} - T_{red}) \ [kW] \quad \text{- 4.3}$$

$$\dot{m}_{Almacenamiento} = \frac{\dot{m}_{Utiliación} * (T_{utilizacion} - T_{Red})}{(T_{Almacenamiento} - T_{Red})} \ [L/hr] \quad \text{- 4.4}$$

Las ecuaciones anteriores permiten obtener la Figura 4.4, que es la comparación de la demanda de ACS de cada usuario a una temperatura de almacenamiento común, en la figura se logra observar la baja demanda de los funcionarios, además si se considera que el edificio E se encuentran alejado de los demás, se opta por proponer una solución individual para el edificio E, independiente del sistema centralizado de producción de agua caliente de los edificios F y B.

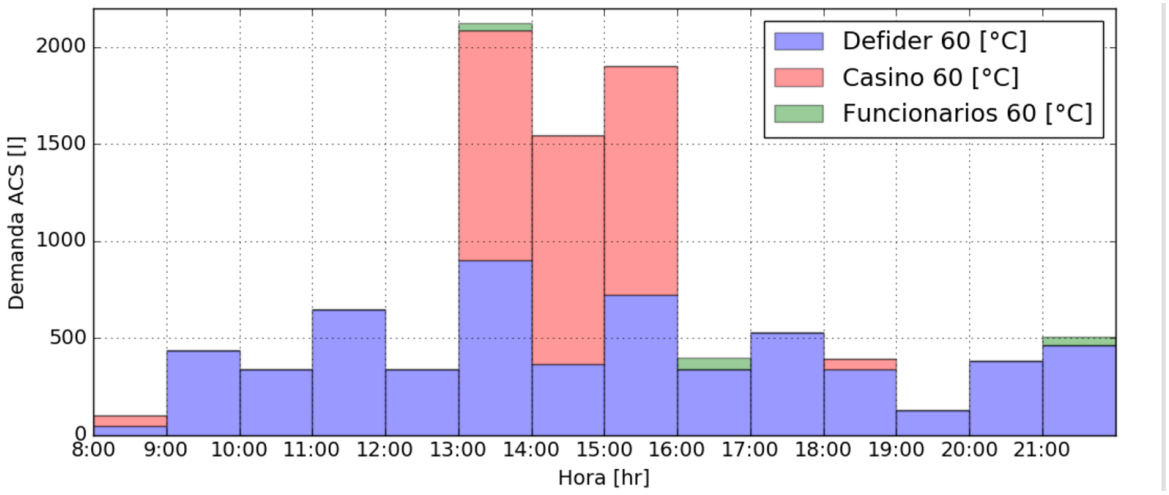


Figura 4.4: Comparación de la demanda de agua caliente sanitaria de los departamentos

La demanda total del campus utilizada para dimensionar un sistema centralizado de producción de agua caliente se obtiene de la Figura 4.4, la cual no considera las duchas de los funcionarios de edificio E representadas con color verde.

4.2 Validación del Método para Determinar la Demanda

Luego de determinar el perfil de demanda de la Figura 4.4 se valida la estimación realizada comparando con dos estudios, el primero es el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los edificios (RITE) [5] elaborado por Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración, el segundo es la guía de Sistemas Solares Térmicos II (SSTII) [3] , elaborado por la Asociación Solar de la

Industria Térmica (ASIT), para comparar estos estudios se calcula la demanda anual de la instalación centralizada de ACS a la temperatura de almacenamiento de 60 [°C], donde se utiliza la Ecuación -4.1 con los consumos unitarios definidos por cada estudio, estos resultados se muestran en la Tabla 4.1 donde se aprecia que la estimación realizada con el estudio de situación actual es el más bajo, ya que es el menos conservador, lo que es de esperar, ya que los demás estudios son generales para un gran número de casos, desde viviendas familiares hasta edificios educacionales.

Tabla 4.1: Comparación de estimación de la demanda de ACS

Estimación	Demanda [l/día]
Reglamento de Instalaciones Térmicas en los edificios	11969
Sistemas solares térmicos II	17314
Análisis de situación actual	9752

5 Condiciones Ambientales del Proyecto

5.1 Radiación Solar

Los datos de la radiación son generados por Meteonorm [6], con un formato idéntico al formulario estándar del Año Meteorológico Típico para la ciudad de Santiago, donde se observa la radiación diaria en el Figura 5.1 y la radiación anual en la Figura 5.2. Con estos dos gráficos se determina el día crítico que se especifica en el Capítulo 8.

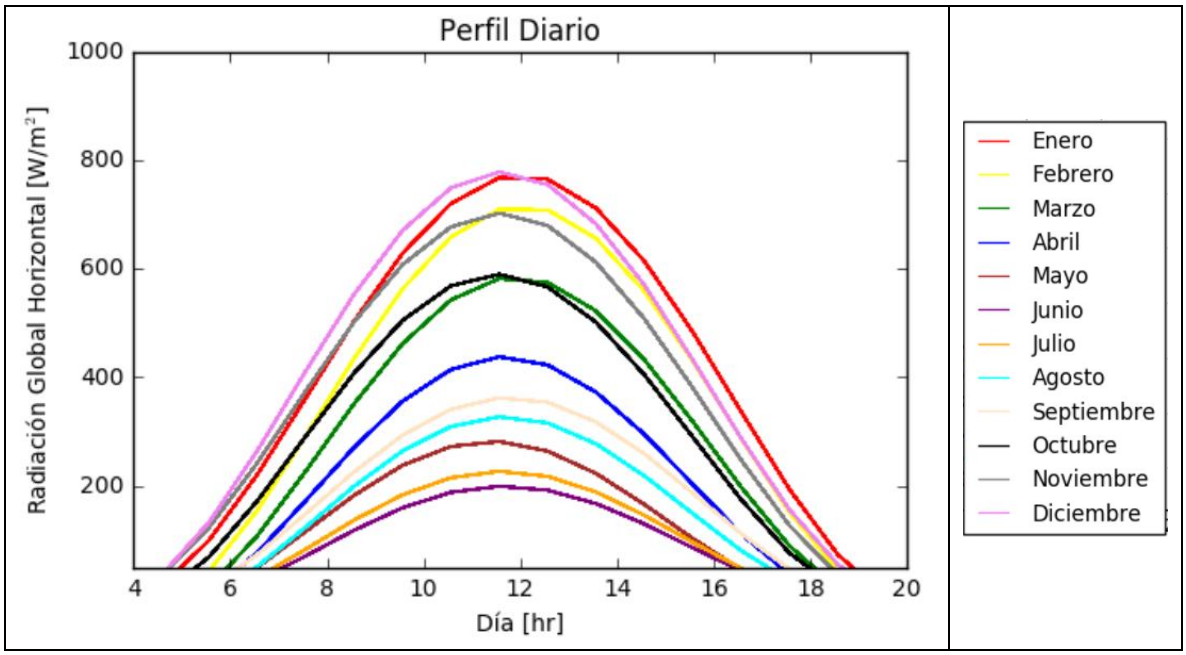


Figura 5.1: Perfil diario de radiación global horizontal para Santiago (Fuente: Meteonorm)

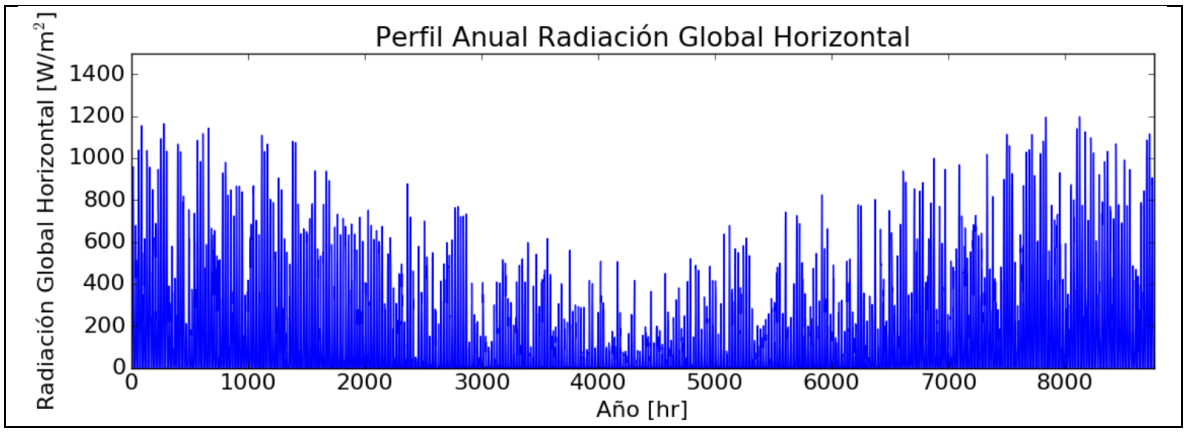


Figura 5.2: Perfil anual de radiación global horizontal para Santiago (Fuente: Meteonorm)

5.2 Temperatura Agua De La Red

La temperatura diaria media mensual de agua fría de red que se muestra en Figura 5.3, se encuentra en el Anexo VI de la Norma Técnica aprobada en la ResEx N° 502, del 30 de septiembre de 2010, del Ministerio de Energía, la cual se adjunta en el anexo 3 de la Guía Sistemas Solares Térmicos II [3]. San Joaquín

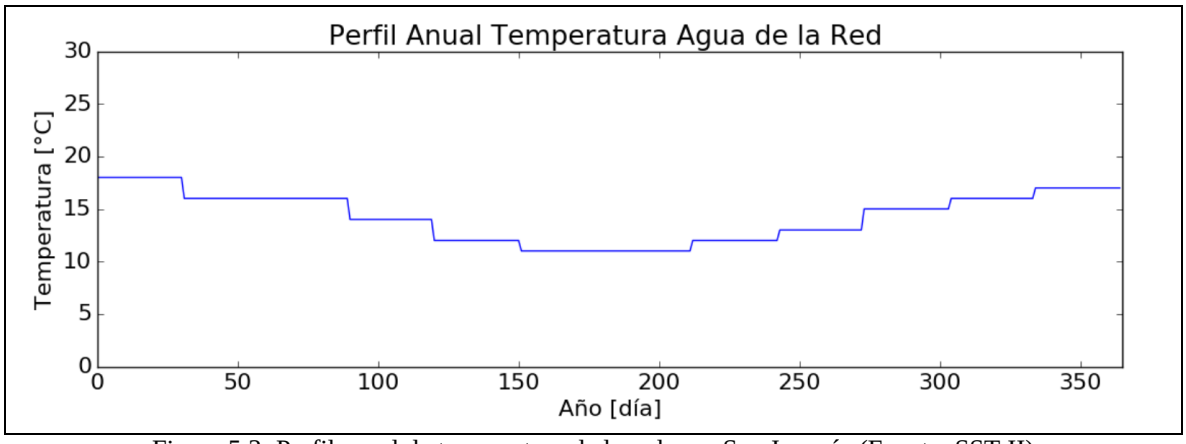


Figura 5.3: Perfil anual de temperatura de la red para San Joaquín (Fuente: SST II)

6 Modelo

A continuación se detalla el modelo matemático y el control de los equipos de las instalaciones propuestas para producir ACS, las cuales son simuladas con el programa Trnsys 17 según los modelos descritos a continuación [7]. Primero, se muestra una descripción de cada uno de los equipos, donde se presentan sus parámetros, entradas y salidas. Además se realiza un balance de energía con la modelación matemática de los equipos. Se define el control en la interacción de estos equipos, el cual determina el funcionamiento transiente del sistema.

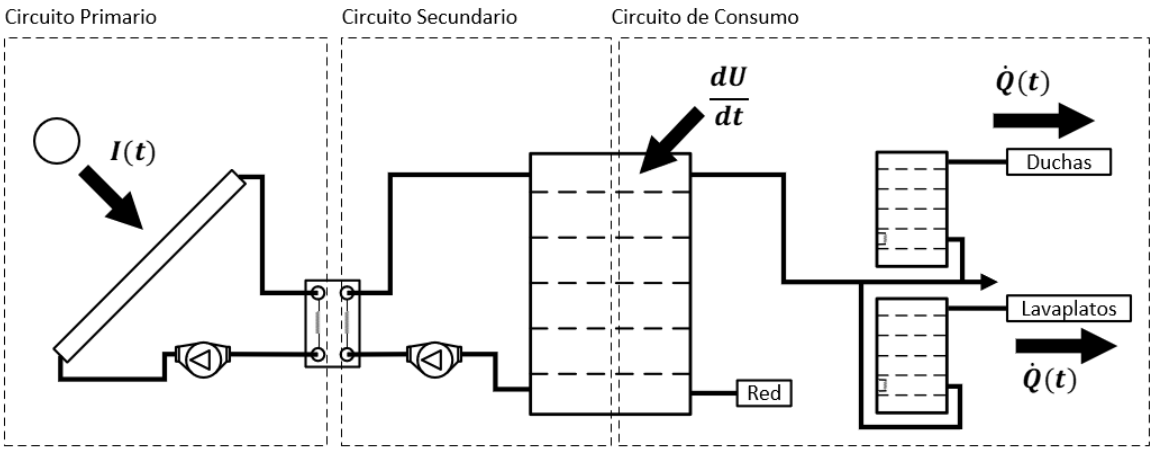


Figura 6.1: Esquema básico de una instalación termos solar centralizada (Fuente: Adaptación SSTII)

La instalación mostrada en la Figura 6.1 representa un sistema termo solar centralizado, donde existen tres circuitos hidráulicos el circuito primario, el secundario y el de consumo. En el circuito primario se extrae la energía del sol, donde circula un flujo de anticongelante (20 % propilenglicol) por los colectores elevando su temperatura para aportar esta energía al intercambiador de calor, este es el

equipo que une dos circuitos con diferentes fluidos. En el circuito secundario, se almacena la energía aportada por el sol, donde circula un flujo de agua que extrae la energía del intercambiador de calor para almacenarla en el estanque central, ambos circuitos requieren su propia bomba de circulación, las cuales son controladas por la diferencia de temperatura entre el colector y el estanque central. En el circuito de consumo se distribuye ACS a los servicios, desde el estanque central a los termos eléctricos distribuidos, donde se utiliza agua que proviene de la red para reemplazar el agua utilizada, la cual se mueve en una dirección gracias a la diferencia de altura entre el estanque central y los termos eléctricos, por lo tanto no existe una circulación forzada.

6.1 Modelo de los Equipos Simulados

A continuación se detallan las variables de cada equipo, estas variables pueden ser parámetros, entradas y salidas, los parámetros son variables conocidas que dimensionan el equipo y permanecen constantes dentro de la simulación, las entradas son variables dinámicas conocidas y las salidas son variables dinámicas desconocidas, las variables dinámicas son recalculadas en cada paso de tiempo.

6.1.1 Termo Eléctrico

El termo eléctrico se usa para producir y almacenar agua caliente, este equipo tiene una salida de agua caliente y una entrada de agua de reemplazo, el agua caliente se produce a través de un calentador eléctrico, el agua de reemplazo dependiendo del tipo de instalación puede venir fría desde la red o precalentada por un sistema termo solar como en la Figura 6.1. Este estanque experimenta una estratificación térmica, ya que cuando se calienta el agua disminuye su densidad y tiende a subir, mientras el agua fría, más pesada tiende a bajar, para replicar este fenómeno se divide el volumen del estanque en nodos con distinta temperatura.

Los parámetros para modelar un termo con calentador eléctrico son principalmente las características de la forma del estanque, del fluido almacenado, el modelo que determina las perdidas y del calentador. Los parámetros de forma son el volumen agua que almacena el estanque (V_{termo}), donde se considera un cilindro posicionado de forma vertical, el número de nodos (N_{nodos}), en este caso se consideran una estratificación de 6 nodos, donde el nodo 1 es el nodo superior y la altura de cada nodo (h_{nodo}), donde la altura total del estanque es la suma la altura de los nodos. Los parámetros del fluido contenido en el termo que en este caso es agua, son el calor específico (Cp_f) y la densidad

(ρ_f). El coeficiente de pérdida promedio del estanque por unidad de área (U_{termo}), este modelo supone que el coeficiente de pérdidas son iguales para cada nodo, donde no se consideran los efectos de las entradas y las salidas. Los parámetros del calentador eléctrico son el número del nodo que contiene el calentador y el nodo que contiene el termostato, también se debe especificar la potencia máxima del calentador y la temperatura de almacenamiento (T_{set}) que activa el termostato.

Las variables de entrada que tiene este elemento son la temperatura ($T_{reemplazo}$) y el flujo másico ($\dot{m}_{reemplazo}$) del flujo de reemplazo, el cual se introduce en la parte inferior del termo (nodo 5). Las variables de salida son la temperatura ($T_{caliente}$) y flujo másico ($\dot{m}_{caliente}$) del fluido que satisface la demanda de agua caliente, este flujo sale desde la parte superior del estanque de almacenamiento hacia la carga, donde el flujo másico de reemplazo que entra es igual al flujo másico caliente que sale.

Un análisis general del termo de la Figura 6.2 permite realizar un balance de energía en cada paso de tiempo, donde cada flujo de energía se representa con las siguientes ecuaciones matemáticas:

$$\dot{Q}_{caliente} = \dot{m}_{caliente} * Cp_f * T_{caliente} \quad [kW] \qquad \text{- 6.1}$$

$$\dot{Q}_{reemplazo} = \dot{m}_{reemplazo} * Cp_f * T_{reemplazo} \quad [kW] \qquad \text{- 6.2}$$

$$\dot{Q}_{pérdidas} = \sum_{i=1}^{6} U_{termo} * A * (T_i - T_{ambiente}) \quad [kW] \qquad \text{- 6.3}$$

$$\dot{Q}_{calentador} = \min\left(\mathrm{Q_{Max}}, \frac{\mathrm{m_i} * Cp_f * (T_{set} - T_i)}{dt} \right) \quad [kW] \qquad \text{- 6.4}$$

Dentro del balance de energía se consideran la energía que entra ($\dot{Q}_{reemplazo}$), la energía que sale ($\dot{Q}_{caliente}$), la energía generada por el calentador ($\dot{Q}_{calentador}$) y las perdidas térmicas disipadas por las paredes ($\dot{Q}_{pérdidas}$).

$$\dot{Q}_{caliente} = \dot{Q}_{calentador} + \dot{Q}_{reemplazo} - \dot{Q}_{pérdidas} \quad [kW] \qquad \text{- 6.5}$$

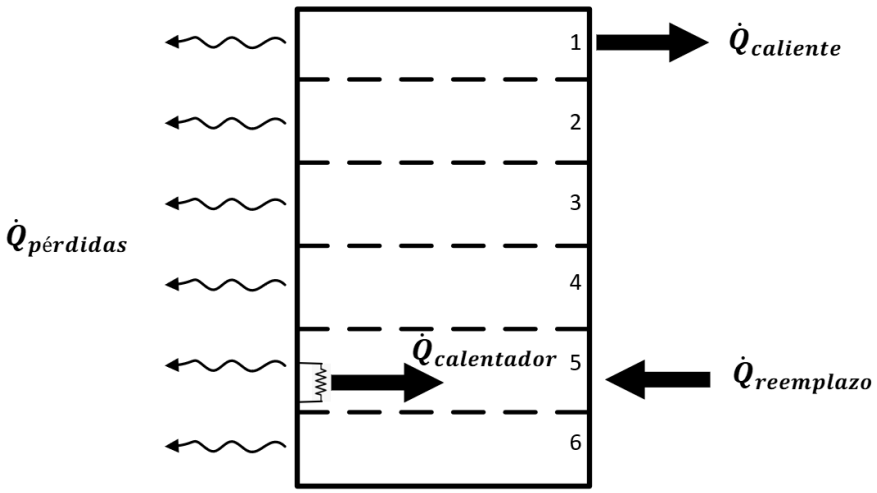


Figura 6.2: Balance energia del estanque con calentador eléctrico (Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference)

Sin embargo para considerar los efectos de la estratificación se realiza un balance de energía similar al de la Ecuación - 6.5 , pero para cada nodo, como se muestra en la Figura 6.3.

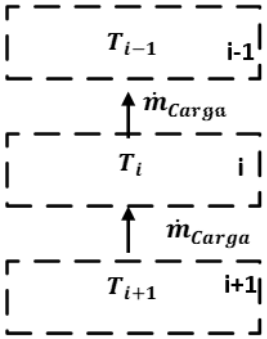


Figura 6.3: Balance energía del nodo i del termo eléctrico (Fuente: Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference)

Para identificar los nodos en que se ubica el calentador y el nodo donde ingresa en agua de reemplazo se utiliza la Ecuación - 6.6 y la Ecuación - 6.7.

$$\gamma_i = \dot{m}_{carga} \sum_{j=i+1}^{N_{nodos}} \beta_i \quad ; \beta_i(i) = \begin{cases} 1 \ si \ i = N_{nodos} \\ 0 \ si \ i \neq N_{nodos} \end{cases} \qquad \text{- 6.6}$$

$$Q_i(i) = \begin{cases} Q_{calentador} & i = N_{calentador} \\ 0 & i \neq N_{calentador} \end{cases} \qquad \text{- 6.7}$$

Además, este balance de energía permite determinar la temperatura de cada nodo del estaque para el siguiente paso de tiempo (dt) al resolver la ecuación diferencial de la Ecuación - 6.8.

$$m_i * Cp_f * \frac{dT_i}{dt} = \gamma_i * (Ti - T_{i+1}) - U * A_i(T_i - T_{amb}) + \beta_i * m_{carga} * (T_{reemplazo} - T_i) + Q_i \quad \text{- 6.8}$$

Para modelar un estanque con calentador eléctrico se utiliza el equipo Type4e del programa Trnsys, este equipo tiene dos lados cada uno con una entrada y una salida, sin embargo en este caso solo se utiliza la entrada y la salida del lado de la carga, esto se logra al considerar nulo el caudal del lado de la fuente caliente.

6.1.2 Válvula Mezcladora Termostática

Una válvula mezcladora termostática se usa para mezclar flujos de agua a temperaturas diferentes, permitiendo regular la temperatura de salida, esta válvula se instala después de cada termo eléctrico, donde el agua caliente se obtiene de la parte superior del estanque y la fría de la red, esto permite entregar una temperatura estable y maximizar el volumen del estanque.

El parámetro para modelar la válvula mezcladora termostática es la temperatura de ajuste del termostato ($T_{óptima}$), esta temperatura dependerá de los parámetros óptimos de los servicios. Las variables de entrada que tiene este elemento son la temperatura de la red (T_{red}) y la temperatura de agua caliente suministrada por el nodo superior del termo ($T_{caliente}$), con estas temperaturas se determina la proporción de caudal que deben mezclarse, para satisfacer el caudal de demanda de agua caliente sanitaria ($\dot{m}_{demanda}$), que es otra variable de entrada. Las variables de salida de este equipo son el caudal de agua caliente ($\dot{m}_{caliente}$) y el caudal de agua de la red ($\dot{m}_{red}$) que son mezclados para obtener el caudal de ACS demandado por los servicios, también se considera como variable de salida el caudal de reemplazo que es el mismo que el caudal de agua caliente, para conservar el volumen del estanque. Otro parámetro de salida es la temperatura de salida después de mezclar los flujos ($T_{demanda}$).

Un balance de energía como el observado en la Figura 6.4 permite determinar los flujos másicos que se mezclan, donde los flujos de energía están representados según las Ecuaciones - 6.9,- 6.10 y - 6.11, donde no se consideran pérdidas de carga ni pérdidas térmicas.

$$\dot{Q}_{caliente} = \dot{m}_{caliente} * Cp_f * T_{caliente} \ \ [kW]$$ - 6.9

$$\dot{Q}_{red} = \dot{m}_{red} * Cp_f * T_{red} \ \ [kW]$$ - 6.10

$$\dot{Q}_{demanda} = \dot{m}_{demanda} * Cp_f * T_{demanda} \ \ [kW]$$ - 6.11

Los balances de energía y de masa están representados por la Ecuación - 6.12 y la Ecuación - 6.13 respectivamente, con estas dos ecuaciones se determina $\dot{m}_{caliente}$ y $\dot{m}_{red}$.

$$\dot{Q}_{demanda} = \dot{Q}_{caliente} + \dot{Q}_{red} \ \ [kW]$$ - 6.12

$$\dot{m}_{demanda} = \dot{m}_{caliente} + \dot{m}_{red} = \text{Y} \ \ [kg/hr]$$ - 6.13

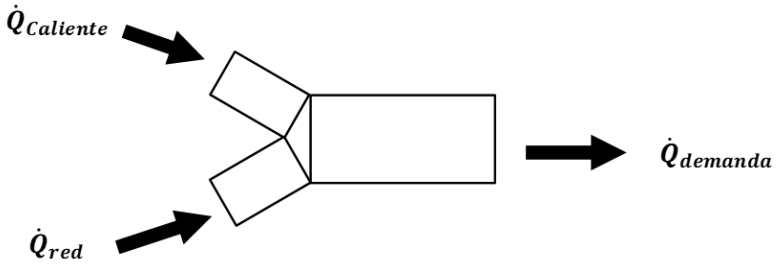


Figura 6.4: Balance energia de la valvula termostática

Para modelar esta válvula termostática se utilizan dos elementos, una válvula divisora termostática con el equipo Type 11b que determina la cantidad de agua caliente necesaria para satisfacer la demanda a la temperatura adecuada, además de reponer el flujo en el estanque y una válvula T con el equipo Type 11h que permite mezclar los flujos.

6.1.3 Estanque Central

El estanque central se usa para almacenar ACS y distribuirla a cada uno de los termos eléctricos, donde el ACS se produce a través del sistema solar térmico de colectores planos con circulación forzada. Este estanque también experimenta una estratificación térmica similar a la indicada para el termo eléctrico. Sin embargo, este equipo tiene dos salida y dos entradas de agua.

Los parámetros para modelar un estanque central son similares a los utilizados para modelar el termo eléctrico de la sección 6.1.1, pero sin el calentador eléctrico, por lo tanto sus parámetros son principalmente: Los parámetros de forma, estos son: el volumen agua que almacena el estanque

($V_{estanque}$), este volumen es de un cilindro posicionado de forma vertical; el número de nodos (N_{nodos}) y la altura de cada nodo del depósito (h_{nodo}), la altura total del estanque se determina sumando las alturas de los nodos, donde el nodo 1 es el nodo superior del estanque. Los parámetros del fluido contenido en el estanque de almacenamiento en este caso agua, estos son: el calor específico (Cp_f) y la densidad (ρ_f). Los parámetros de pérdidas con el coeficiente de pérdida promedio del estanque por unidad de área ($U_{estanque}$), esto supone que el coeficiente de pérdidas de cada nodo es igual.

Antes de determinar las entradas y las salidas del equipo se debe mencionar que tiene dos lados y cada lado tiene una entrada y una salida, donde en cada lado se conserva su flujo másico, el de carga corresponde al lado donde sale agua caliente para abastecer la demanda de agua caliente y entra el agua de reemplazo, en el otro lado entra agua caliente proveniente del sistema solar térmico y sale agua de la parte inferior del estanque que retorna al colector, esto se observa en la Figura 6.5. Las variables de entrada del lado de la carga son la temperatura ($T_{reemplazo}$) y el caudal del flujo de reemplazo ($\dot{m}_{reemplazo}$), que se introduce en el nodo inferior (Nodo 6). Las variables de entrada del lado de la fuente son la temperatura ($T_{solar\ caliente}$) y caudal ($\dot{m}_{solar\ caliente}$) del flujo que viene desde sistema solar hacia el estanque, este flujo se introduce en el nodo superior (nodo 1). Las variables de salida del lado de la carga son la temperatura ($T_{caliente}$) y caudal ($\dot{m}_{caliente}$) del flujo que satisface la demanda de agua caliente, este flujo sale desde la parte superior del estanque (nodo 1) a la carga, para satisfacer la demanda de agua caliente. Las variables de salida del lado de la fuente son la temperatura ($T_{solar\ frío}$) y flujo másico ($\dot{m}_{solar\ frío}$) que fluyen hacia el sistema solar, este flujo sale desde la parte inferior del estanque (nodo 6).

Un análisis general del estanque en la Figura 6.5, permite realizar un balance de energía en cada paso de tiempo igual que el termo eléctrico de la sección 6.1.1. Sin embargo, ahora no hay generación de energía, ya que no hay un calentador y se agrega el aporte solar, estos flujos se representan en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_{caliente} = \dot{m}_{carga} * Cp_f * T_{caliente} \quad [kW] \qquad \text{- 6.14}$$

$$\dot{Q}_{reemplazo} = \dot{m}_{carga} * Cp_f * T_{reemplazo} \quad [kW] \qquad \text{- 6.15}$$

$$\dot{Q}_{solar\ caliente} = \dot{m}_{fuente} * Cp_f * T_{solar\ caliente} \quad [kW] \qquad \text{- 6.16}$$

$$\dot{Q}_{solar\ frío} = \dot{m}_{fuente} * Cp_f * T_{solar\ frío}\ \ [kW] \qquad \text{- 6.17}$$

$$\dot{Q}_{pérdidas} = \sum_{i=1}^{6} U_{estanque} * A_i * (T_i - T_{ambiente})\ \ [kW] \qquad \text{- 6.18}$$

Dentro del balance se consideran la energía que entra ($\dot{Q}_{reemplazo}$, $\dot{Q}_{solar\ caliente}$), la energía que sale ($\dot{Q}_{Caliente}$, $\dot{Q}_{solar\ frío}$) y las pérdidas térmicas de las paredes ($\dot{Q}_{pérdidas}$).

$$\dot{Q}_{caliente} = \dot{Q}_{solar\ caliente} + \dot{Q}_{reemplazo} - \dot{Q}_{solar\ frío} - \dot{Q}_{pérdidas}\ \ [kW] \qquad \text{- 6.19}$$

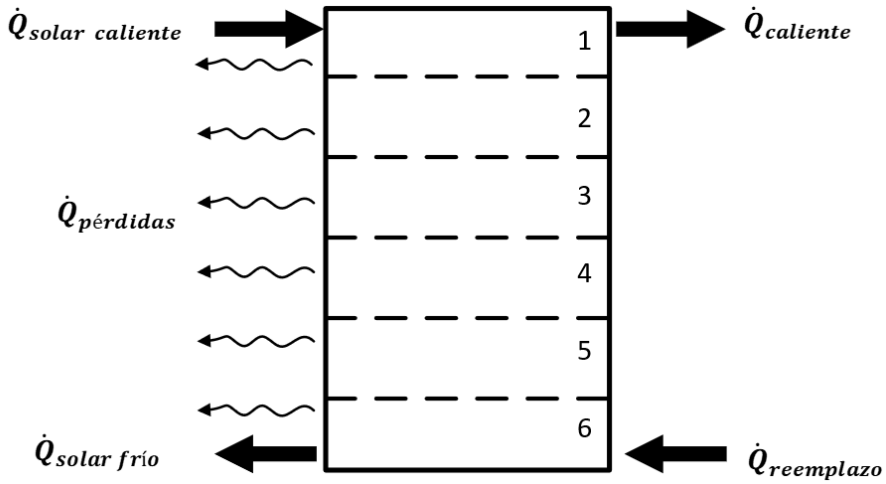


Figura 6.5: Balance energia del estanque central (Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference)

Sin embargo para considerar los efectos de la estratificación se realiza un balance de energía similar al indicado en la Ecuación - 6.19, pero para cada nodo, donde interactúan cuatro flujos de agua, como se muestra en la Figura 6.6.

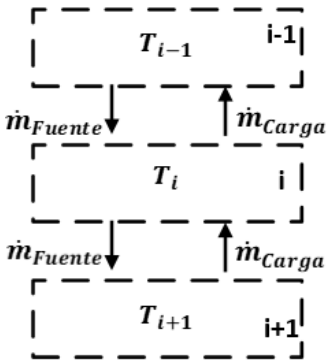


Figura 6.6: Balance energia del nodo i del estanque central (Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference)

Para identificar los nodos donde ingresa en agua de reemplazo y el agua caliente del colector se utiliza la Ecuación - 6.20.

$$\gamma_i = \dot{m}_{\text{fuente}} \sum_{j=i}^{i-1} \alpha_i - \dot{m}_{\text{carga}} \sum_{j=i+1}^{N_{nodos}} \beta_i \quad ; \qquad \beta_i(i) = \begin{cases} 1 & i = N_{nodos} \\ 0 & i \neq N_{nodos} \end{cases} \qquad \text{- 6.20}$$

$$\alpha_i(i) = \begin{cases} 1 & i = 1 \\ 0 & i \neq 1 \end{cases}$$

Además, este balance de energía permite determinar el temperatura de cada nodo del estaque para el siguiente paso de tiempo (dt) al resolver la Ecuación Diferencial - 6.21.

$$m_i * Cp_f * \frac{dT_i}{dt} = \alpha_i * \dot{m}_{fuente} * Cp_f * (T_{solar\ caliente} - T_i) \qquad \text{- 6.21}$$

$$+\beta_i * m_{carga} * Cp_f * \left(T_{reemplazo} - T_i\right)$$

$$-U_{termo} * A_i * (T_i - T_{amb})$$

$$+\gamma_i * (T_i - T_{i+1}) \qquad si\ \gamma_i < 0$$

$$+\gamma_i * (T_{i-1} - T_1) \qquad si\ \gamma_i > 0$$

Para modelar un estanque central se utiliza el equipo Type4e del programa Trnsys, este equipo es el mismo que se utiliza para modelar un termo eléctrico, pero en este caso se utilizan las cuatro entradas del estanque, las del lado de la fuente caliente y las del lado de la carga. Además, no se utiliza el calentador eléctrico.

6.1.4 Bomba de Circulación

Las bombas de circulación se usan para mover el fluido en el circuito primario (Colector – Intercambiador de calor) y en el circuito secundario (Intercambiador de calor - Estanque), este movimiento genera una circulación forzada entre los equipos que favorece la transferencia de calor. Estas bombas son accionadas por un motor eléctrico con velocidad constante que mantiene el caudal a su valor nominal máximo, con una señal de control 1.

Los parámetros del sistema son los valores nominales de la bomba, estos son el flujo máximo de salida de la bomba ($\dot{m}_{max}$) y la potencia máxima de la bomba (P_{max}), donde el valor real de la potencia está en función del caudal, para representar esta función se deben ingresar los parámetros correspondientes a los coeficientes del polinomio (c_0, c_1, c_2, c_3) que representa esta curva en función de la señal de control. En términos de energía se considera un aporte térmico que se representa como una porción de la potencia eléctrica de la bomba que se convierte en energía térmica del fluido ($f_{disipación}$).

Las variables de entrada son las condiciones en las que entra el fluido, la temperatura ($T_{entrada}$) y el caudal másico ($\dot{m}_{entrada}$), además de la señal de control (γ) que determina el encendido y apagado de la bomba, esta señal es 1 para que el equipo se encienda y 0 para que el equipo se apague. Las variables de salida son las condiciones en las que sale el fluido, la temperatura (T_{salida}) y el caudal másico ($\dot{m}_{salida}$), además de la potencia consumida por la bomba(P_{real}).

El modelo para determinar el caudal de salida y la potencia consumida depende del valor de la señal de control, el flujo másico de salida varía linealmente con la señal de control según la Ecuación- 6.22 y la potencia consumida varía polinomialmente con la señal de control según la Ecuación- 6.23, sin embargo se debe considerar que el encendido y apagado no es inmediato y la señal de control cambia de su valor inicial hasta su valor final de manera lineal dentro del paso de tiempo que se enciende o apaga la bomba, por lo tanto solo en el paso de tiempo donde se enciende y apague la bomba se va a utilizar estas ecuaciones, para el resto de los pasos de tiempo donde la bomba se mantenga encendida o apagada la señal de control será 0 y 1, lo que se traduce un caudal y potencia nula o un caudal másico máximo y una potencia máxima.

$$\dot{m}_{salida} = \dot{m}_{max} * \gamma \quad [\, kg/hr \,] \qquad \text{- 6.22}$$

$$P_{real} = P_{max} * (c_0 + c_1 * \gamma + c_2 * \gamma^2 + c_3 * \gamma^3) \quad [\, kJ/hr \,] \qquad \text{- 6.23}$$

Un análisis energético en la bomba considera la disipación térmica representada como una porción de la potencia de la bomba que se convierte en energía térmica del fluido ($f_{disipación}$) en cada paso de tiempo, sin embargo en este caso este aporte no es significativo por las potencias de la bomba que utilizamos, ya que las potencias de las bombas son menores al compararlas con la potencia térmica del sistema.

Para modelar una bomba de circulación se utiliza el equipo Type3b del programa Trnsys, donde se utiliza el elemento Type2b como control diferencial de la bomba.

6.1.5 Intercambiador de Calor

El intercambiador de calor se usa para separar circuitos con distintos fluidos y realizar una transferencia de calor entre ellos, esta transferencia comprende convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa. En este caso por el circuito primario circula anticongelante y por el circuito secundario circula agua. Existen muchos tipos de intercambiador de calor, aquí se modela un intercambiador de calor externo de placa plana y contraflujo, estos intercambiadores de calor son normalmente utilizados por su alta potencia específica de transmisión, su pequeño tamaño en relación a su área de transferencia de calor y bajo precio.

Los parámetros para modelar el intercambiador de calor son los calores específicos de cada circuito($Cp_{caliente}$, $Cp_{frío}$). El otro parámetro necesario es el coeficiente de transferencia de calor global (UA), con el cual es posible calcular la efectividad del intercambiador de calor.

Las variables de entrada del intercambiador de calor son los flujos que entran al equipo, en el circuito primario es la temperatura ($T_{caliente\ entrada}$) y flujo másico ($\dot{m}_{caliente}$) que vienen del colector, para el circuito secundario es la temperatura ($T_{frío\ entrada}$) y flujo másico ($\dot{m}_{frío}$) que vienen de la parte inferior del estanque. Las variables de salida del intercambiador de calor son los flujos que salen del equipo, en el circuito primario es la temperatura ($T_{caliente\ salida}$) y el flujo másico ($\dot{m}_{caliente}$) que entra al colector, para el circuito secundario es la temperatura ($T_{frío\ salida}$) y el flujo másico ($\dot{m}_{frío}$) de agua que entra a la parte superior del estanque. También se obtiene la efectividad (ε) y la trasferencia de calor ($Q_{transferencia}$).

Para determinar las temperaturas de los flujos de salida del intercambiador de calor se utiliza el método efectividad NTU [7], donde se calcula la efectividad del intercambiador de calor de flujo cruzado según la Ecuación - 6.28, donde se deben definir las capacidades mínimas y máximas entre la capacidad del lado frio y el lado caliente con las siguientes ecuaciones:

$$C_{frio} = \dot{m}_{frío} * Cp_{frio} \quad [kJ/K] \qquad \text{- 6.24}$$

$$\mathrm{C}_{caliente} = \dot{m}_{caliente} * Cp_{caliente} \quad [kJ/K] \qquad \text{- 6.25}$$

$$\mathrm{C}_{max} = \mathrm{Max}\left(\mathrm{C}_{frío}\,, \mathrm{C}_{caliente}\right) \quad [kJ/K] \qquad \text{- 6.26}$$

$$\mathrm{C}_{min} = \mathrm{Min}\left(\mathrm{C}_{frío}\,, \mathrm{C}_{caliente}\right) \quad [kJ/K] \qquad \text{- 6.27}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(-\frac{UA}{\mathrm{C}_{min}}\left(1 - \frac{\mathrm{C}_{min}}{\mathrm{C}_{max}}\right)\right)}{1 - \left(\frac{\mathrm{C}_{min}}{\mathrm{C}_{max}}\right)\exp\left(-\frac{UA}{\mathrm{C}_{min}}\left(1 - \frac{\mathrm{C}_{min}}{\mathrm{C}_{max}}\right)\right)} \quad [-] \qquad \text{- 6.28}$$

Una vez obtenida la efectividad se determina el flujo de calor tranfererido como la razon del flujo de calor maximo según la Ecuación - 6.30 , donde el flujo de calor máximo es un supuesto que considera un coeficiente de transferencia de calor global infinito, ya que la temperatura de salida del lado frio es igual a la temperatura caliente del intercambiador de calor como se observa en la Ecuación - 6.29.

$$\dot{Q}_{max} = \mathrm{C}_{min} * (T_{caliente\ entrada} - T_{frio\ salida}) \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.29}$$

$$\dot{Q}_{transferencia} = \varepsilon * \dot{Q}_{max} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.30}$$

Una vez determinado el flujo de energía trasferida y con los dos balances de energía de la Figura 6.7 se puede determinar las temperaturas de salida, según la Ecuación - 6.31 que corresponde al balance de energía del circuito primario y la Ecuación - 6.32 corresponde al balance de energía del circuito secundario.

$$\dot{Q}_{salida\ caliente} = \dot{Q}_{entrada\ caliente} - \dot{Q}_{transferencia} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.31}$$

$$\dot{Q}_{salida\ frío} = \dot{Q}_{entrada\ caliente} + \dot{Q}_{transferencia} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.32}$$

$$\dot{Q}_{salida\ caliente} = \dot{m}_{caliente} * Cp_{caliente} * T_{caliente\ salida} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.33}$$

$$\dot{Q}_{entrada\ caliente} = \dot{m}_{caliente} * Cp_{caliente} * T_{caliente\ entrada} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.34}$$

$$\dot{Q}_{salida\ frío} = \dot{m}_{frío} * Cp_{frío} * T_{frío\ salida} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.35}$$

$$\dot{Q}_{entrada\ frío} = \dot{m}_{frío} * Cp_{frío} * T_{frío\ entrada} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.36}$$

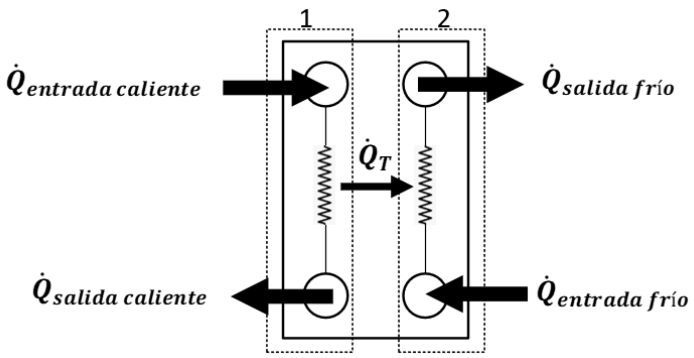


Figura 6.7: Balance energia del intercambiador de calor (Fuente: Adaptación Trnsys 17 Documentation, 4 Mathematical Reference)

6.1.6 Colector Solar Plano

Este equipo se usa para transformar la radiación solar en energía térmica y producir ACS. El funcionamiento del colector solar plano está basado en el efecto invernadero, que está determinado por las propiedades de transmisión de la cubierta, en la cubierta la radiación solar incide con una longitud de onda corta (0,3-3 [μm]), donde una parte es reflejada, otro pequeño porcentaje es absorbido y una gran parte la atraviesa e incide sobre el absorbedor, que la transforma en calor aumentando su temperatura y la del fluido de trabajo que circula a través de él. El absorbedor, al calentarse, también emite radiación en una longitud de onda larga (3-30 [μm]), que no puede salir al exterior debido a que la cubierta es opaca frente a esa radiación, por lo tanto se refleja al absorbedor nuevamente.

Los parámetros para modelar un conjunto de colectores planos dependen de la configuración de la instalación, las características del fluido calor portador y la curva de eficiencia, donde también se consideran los parámetros para corregir dicha curva de eficiencia. Los parámetros de configuración son: el número de colectores idénticos conectados en serie (N_{serie}), para tener en cuenta una disposición en serie, se multiplican los coeficientes de eficiencia por un factor de corrección, calculado en base a este número; el número de colectores en paralelo($N_{paralelo}$) que con su área de absorción ($A_{colector}$), determina el área de absorción total de la matriz de colectores (A); la pendiente de la superficie del colector, está pendiente se define como el ángulo entre la superficie y la horizontal (0° = Horizontal), positiva cuando la superficie está inclinada en la dirección de la superficie del azimut. El parámetro asociado al fluido es el calor específico (Cp_f), en este caso el fluido de trabajo del circuito primario es una mezcla de agua con anticongelante que permite proteger de las temperaturas bajo cero a los equipos exteriores. Los parámetros relacionados con el rendimiento del

colector son los coeficientes de la curva de eficiencia y las condiciones en que se realizan las pruebas para obtener la curva. Generalmente son tres los coeficientes: el primer coeficiente se denomina como rendimiento óptico ($a_0|_{normal}$); el segundo coeficiente es el coeficiente global de perdidas térmicas (a_1) y el tercero (a_2) representa la dependencia de la temperatura de las pérdidas térmicas. Si no se cuenta con este último coeficiente se establece un valor igual a 0 y se considera un gráfico de eficiencia como una línea recta, los coeficientes de una amplia gama de colectores se pueden encontrar en www.solarkeymark.org, este sitio web sólo contiene los colectores que han sido certificados bajo la norma europea UNE EN12975, la misma norma que deben cumplir todos los paneles solares importados y fabricados en Chile, para optar a subsidio. Estos se encuentran en la página web de la superintendencia de electricidad y combustible www.sec.cl.

Los parámetros para corregir curva de eficiencia son: el modelo utilizado para el cálculo de eficiencia del colector, este modelo dependerá de la norma de certificación del colector, donde la norma europea considera un cálculo de los coeficientes en función de la diferencia de temperatura media y la temperatura ambiental (ΔT_p); el segundo parámetro es el caudal másico por unidad de área en la que se ensayó el colector, el cual está determinado por norma; el tercer parámetro son los coeficientes ($b_0\ y\ b_2$) que determinan la curva del modificador del ángulo de incidencia (IAM) en función del ángulo de incidencia.

Las variables de entrada del colector son las condiciones iniciales del fluido, las características de la radiación solar y la temperatura ambiente del colector (T_a), útiles para determinar las pérdidas del colector. Las condiciones del fluido son la temperatura ($T_{entrada\ frío}$) y el flujo másico ($\dot{m}_{entrada\ frío}$) que viene del intercambiador de calor. La radiación solar que recibe el colector es la irradiación total incidente en el plano del colector por unidad de área (I_{total}), esta irradiación está compuesta por la irradiación directa y difusa descompuestas en el ángulo del colector. Las variables de salida del colector son las propiedades con que sale el fluido, la temperatura ($T_{salida\ caliente}$) y el flujo másico ($\dot{m}_{salida\ caliente}$), ambos flujos másicos son iguales y están definidos por la bomba circulación del circuito primario.

Un balance de energía del colector como el mostrado en la Figura 6.8 permite determinar en cada paso de tiempo la temperatura del flujo de salida del colector, donde los flujos de energía que interactúan son la irradiación solar total en el plano de los colectores ($A * I_T$), el flujo frío que entra ($\dot{Q}_{entrada\ frío}$), las pérdidas y el flujo calentado que sale, donde las pérdidas son ópticas

($\dot{Q}_{pérdidas\ opticas}$) y térmicas en la superficie superior e inferior del colector ($\dot{Q}_{pérdidas\ termicas}$). El flujo de calor útil es definido en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_{util} = \dot{Q}_{salida\ caliente} - \dot{Q}_{entrada\ frío} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.37}$$

$$\dot{Q}_{salida\ caliente} = \dot{m}_{salida\ caliente} * Cp_f * T_{salida\ salida} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.38}$$

$$\dot{Q}_{entrada\ frío} = \dot{m}_{entrada\ frío} * Cp_f * T_{entrada\ frío} \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.39}$$

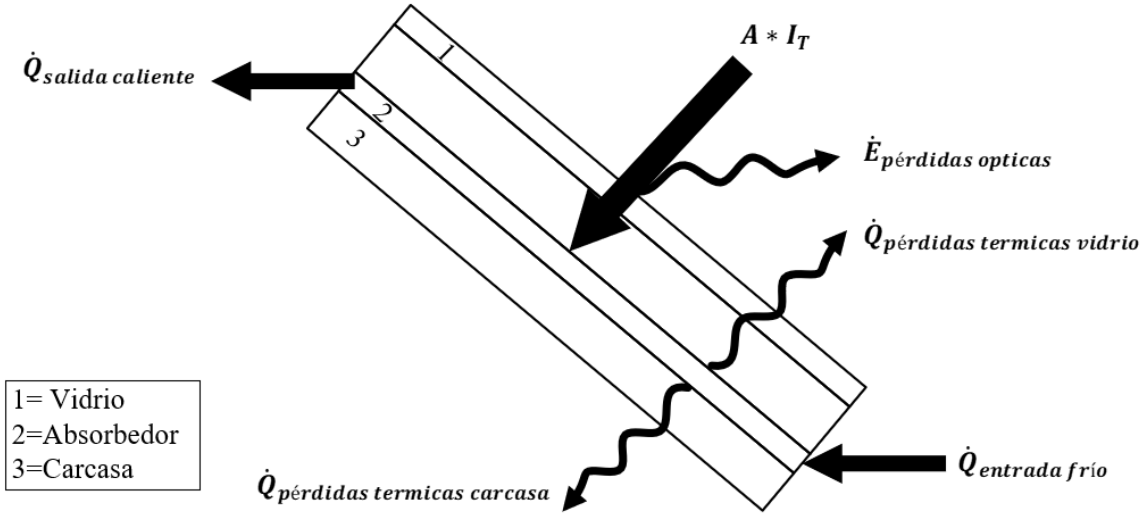


Figura 6.8: Balance energia colector plano (Fuente:Adaptación Solar District Heating Guidelines)

La influencia de las pérdidas ópticas y térmicas se determinan por medio de un ensayo en un ambiente controlado, donde se determina la eficiencia del colector conociendo el flujo de energía útil y la irradiancia solar total en el plano del colector según la Ecuación - 6.40, esto se repite para distintas diferencias de temperatura entre la entrada y el ambiente (ΔT_e), permitiendo determinar los coeficientes de la curva de eficiencia de la Ecuación - 6.41.

$$\dot{Q}_{util\ test} = \eta * A * I_T \quad [kJ/hr] \qquad \text{- 6.40}$$

$$\eta = a_0|_{normal} - a_1 * \frac{(\Delta T_e)}{I_T} - a_2 * \frac{(\Delta T_e)^2}{I_T} \quad [-] \qquad \text{- 6.41}$$

Donde: $\Delta T_e = T_{entrada\ frío} - T_{ambiente}$

$$a_0|_{normal} = \mathrm{Fr} * (\tau\alpha)_n \quad [-]$$

$$a_1 = Fr * U_L \qquad [kJ/(hr * m^2 * K)]$$

$$a_2 = Fr * U_{L/T} \quad [kJ/(hr * m^2 * K^2)]$$

Donde el rendimiento óptico del colector es la multiplicación entre el factor de remoción de calor del colector (Fr) y el producto de la transmitancia de la cubierta por absorción del absorbedor, los coeficientes de pérdidas térmicas que son la multiplicación del factor de remoción de calor y el coeficiente de pérdida térmica total del colector por unidad de área, que describen la variación lineal y la variación cuadrática de las pérdidas térmicas, donde las pérdidas térmicas aumentarán, y por tanto el rendimiento será menor, a medida que estos coeficientes sean mayores. La ecuación que representa la curva de eficiencia también se puede escribir de la siguiente manera:

$$\eta = a_0|_{normal} - a_1' * \frac{(\Delta T_e)}{I_T} \quad [-] \qquad \text{- 6.42}$$

Donde: $a_1' = a_1 + a_2 * \Delta T_e \quad [kJ/(hr * m^2 * K)]$

Como el modelo utilizado en la Ecuación - 6.41 o en la Ecuación - 6.42 usa la diferencia de temperatura de entrada, la que corresponde a la normativa de Estados Unidos, se deben corregir los coeficientes, ya que la curva de eficiencia del colector fue calculada con la norma Europea, esto se muestra en el Anexo C.

Para tener en cuenta un funcionamiento real, dado que las condiciones del ensayo son controladas se realizan tres correcciones, la primera corrección es considerar cuando el colector opera a un caudal distinto del valor en el que se realizaron las pruebas ($\dot{m}_{test}$), según la siguiente ecuación:

$$r_1 = \frac{a_0|_{real}}{a_0|_{test}} = \frac{a_1'|_{real}}{a_1'|_{test}} = \frac{\frac{\dot{m}_{real} * Cp_f}{A * a_1^*}(1 - \exp(-\frac{A * a_1^*}{\dot{m}_{real} * Cp_f}))}{\frac{\dot{m}_{test} * Cp_f}{A * a_1^*}(1 - \exp(-\frac{A * a_1^*}{\dot{m}_{test} * Cp_f}))} \quad [-] \qquad \text{- 6.43}$$

Donde: $a_1^* = \frac{\dot{m}_{real} * Cp_f}{A} * \ln\left(1 - \frac{a_1' * A}{\dot{m}_{real} * Cp_f}\right)$

La segunda corrección es el número de colectores idénticos conectados en serie (N_{serie}), ya que la entrada del segundo es la salida del primero, esto implica que la temperatura de ingreso del segundo aumenta, disminuyendo la eficiencia de este colector, para tener en cuenta una configuración en serie, se corrige con la siguiente ecuación:

$$r_2 = \frac{a_1'|_{N_s}}{a_1'|_1} = \frac{1 - \left(1 - \frac{A * a_1'}{\dot{m}_{real} * Cp_f}\right)^{N_s}}{N_s * \frac{A * a_1'}{\dot{m}_{real} * Cp_f}} \ [-] \quad \text{- 6.44}$$

La tercera corrección es la incidencia de la radicación solar en el colector, ya que las pruebas de rendimiento son tomadas con una irradiación perpendicular a la superficie del colector, cuando el sol incide en el colector con otro ángulo el rendimiento cambia, este cambio es lo que el valor de IAM nos aporta. El valor 1 se alcanza cuando el captador está perpendicular a los rayos solares, y por tanto recibe la máxima irradiación. Para los captadores planos el valor 1 es el máximo posible, reduciéndose este valor por las mañanas y por las tardes. En este caso solo se corrige la eficiencia de intercepción a_0 para la incidencia solar no normal mediante un factor modificador de la forma con la siguiente ecuación:

$$r_3 = \frac{a_0|_T}{a_0|_{normal}} = 1 - b_0 * S - b_1 * S^2 \ [-] \quad \text{- 6.45}$$
$$Donde: \ S = 1 / cos(\theta) - 1$$

$$\eta_{corregida} = a_0|_{normal} * r_1 * r_2 * r_3 - a_1' * r_1 * r_2 * \frac{(\Delta T)}{I_T} \ [-] \quad \text{- 6.46}$$

$$\dot{Q}_{util} = \eta_{corregida} * A * I_T \ [kJ/hr] \quad \text{- 6.47}$$

Para modelar un colector plano se utiliza el equipo Type1b del programa Trnsys, donde para determinar el área total de absorción en paralelo se multiplica el área individual del colector por el número de colectores en paralelo.

6.2 Control de los equipos

6.2.1 Control del Calentador Eléctrico de los Termos

El sistema de control del calentador eléctrico del estanque esta comandado por la temperatura de almacenamiento (T_{set}) que es regulada y una banda muerta de temperatura (T_{db}), donde el calentador se activará siempre y cuando la temperatura del fluido en el nodo que está el calentador (T_i) sea menor que la temperatura de almacenamiento menos la temperatura de banda muerta, hasta alcanzar la temperatura de almacenamiento, la temperatura de banda muerta es de 5 [°C].

6.2.2 Control de la Válvula Mezcladora Termostática

El sistema de control de la válvula mezcladora termostática está comandada por la temperatura requerida por el usuario $(T_{óptima})$ y las temperaturas de los flujos que se mezclan $(T_{red}, T_{caliente})$, donde la relación entre estos flujos está determinada por la variable *Y* según las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_{caliente} = \dot{m}_{demanda} * Y \quad [kg/hr] \qquad \text{- 6.48}$$

$$\dot{m}_{red} = \dot{m}_{demanda} * (1 - Y) \quad [kg/hr] \qquad \text{- 6.49}$$

La variable *Y* se calcula de dos maneras dependiendo del valor de la temperatura caliente $(T_{caliente})$, sí la temperatura caliente es superior a la temperatura adecuada de los servicios (T_{set}), la relación de los flujos se obtiene de acuerdo a la Ecuación - 6.50, donde la temperatura resultante $(T_{demanda})$ es igual a la temperatura adecuada, pero sí la temperatura caliente es menor que a la temperatura adecuada se utiliza la ecuación - 6.51, donde la temperatura resultante es igual a la temperatura caliente.

$$Y = (T_{set} - T_{red})/(T_{caliente} - T_{red}) \qquad si\ T_{caliente} > T_{set} \qquad \text{- 6.50}$$

$$Y = 1 \qquad si\ T_{caliente} \leq T_{set} \qquad \text{- 6.51}$$

6.2.3 Control de la Bomba de Circulación

El controlador diferencial de encendido y apagado de las bombas genera una función de control que puede tener un valor de 1 ó 0. El valor de la señal de control se elige en función de la diferencia de temperatura entre la salida del colector $(T_{salida\ caliente})$ y la del nodo inferior del estanque central que se envía al colector $(T_{solar\ frío})$. Estas temperaturas son comparadas con una de las dos temperaturas de banda muerta, la superior $(T_{db\ superior})$ si la bomba estaba apagada y la inferior $(T_{db\ inferior})$ si la bomba estaba encendida, esto se muestra a continuación, donde el nuevo valor de la función de control (γ_{i+1}) depende del valor de la función de control en el paso de tiempo actual (γ_i).

Si la bomba está apagada ($\gamma_i = 0$) se usa la Ecuación - 6.52 con una temperaturas de banda muerta superior de 10 [°C], donde la temperatura caliente del estanque debe superar a la temperatura de entrada del sistema solar en 10 [°C], para encender la bomba.

$$\gamma_{i+1}\begin{cases}1 & si \quad T_{solar\ frío} + T_{db\ superior} \leq T_{salida\ caliente} \\ 0 & si \quad T_{solar\ frío} + T_{db\ superior} > T_{salida\ caliente}\end{cases} \qquad \text{- 6.52}$$

Si la bomba está encendida ($\gamma_i = 1$) se usa la Ecuación - 6.53 con una temperaturas de banda muerta inferior de 2 [°C], esta condición es menos estricta que la anterior, ya que la temperatura caliente del estanque debe superar a la temperatura de entrada del sistema solar en 2 [°C], para encender la bomba. Permitiendo que la bomba este encendida por un periodo mayor evitando un bombeo intermitente, esto se denomina histéresis.

$$\gamma_{i+1}\begin{cases}1 & si \quad T_{solar\ frío} + T_{db\ inferior} \leq T_{salida\ caliente} \\ 0 & si \quad T_{solar\ frío} + T_{db\ inferior} > T_{salida\ caliente}\end{cases} \qquad \text{- 6.53}$$

Por razones de seguridad se apaga la bomba si se supera la condición de Temperatura máxima ($T_{ebullición}$) en el nodo superior del estanque central, donde independientemente de las condiciones de la banda muerta, la función de control será nula ($\gamma_{i+1} = 0$). Por su parte en el estanque se produce la ventilación del vapor a través de una válvula de seguridad, esta ventilación genera una pérdida de masa insignificante.

7 Dimensionamiento y Costo de los Equipos

En este capítulo se definen los parámetros y los costos de los equipos utilizados en los sistemas de producción de ACS, estos sistemas se dividen en dos tipos de instalaciones: una distribuida y una centralizada. Las principales diferencias son la ubicación y distribución de los equipos de producción de ACS. A continuación se muestra el valor bruto[1] de costo de los equipos, donde los costos de instalación e ingeniería son considerados como el 15% del costo total de los equipos de cada instalación. La información detallada de las características y costos equipos utilizados se adjunta en los Anexo D.

[1] Calculado con un impuesto de valor agregado de 19 %

7.1 Instalación Distribuida Auxiliar de Respaldo

La instalación distribuida tiene una producción de ACS con termos eléctricos ubicados cerca de los servicios que la utilizan. Los equipos que se deben adquirir para cubrir la demanda de ACS son 2 termos eléctricos para las duchas del edifico B y 7 válvulas mezcladoras termostáticas que se instalan en cada uno de los termos. Los termos eléctricos escogidos son de características similares a los que se ubican en el edifico F, el costo total de la instalación es de $4.324.665 [CLP], en la Tabla 7.1 se observa la distribución de estos costo.

Tabla 7.1: Tabla de costos de la instalación distribuida auxiliar de respaldo

Ítem	Costo [CLP]	Porcentaje [%]
Termos eléctricos	$3.449.758	80
Válvula mescladora Termostática	$ 310.821	7
Instalación	$ 564.087	13
	$4.324.665	100

7.2 Instalación Centralizada Solar Térmica

La instalación centralizada produce de agua caliente a través de un sistema termosolar, ubicado en el techo del edificio F, desde donde se suministra ACS a los termos eléctricos distribuidos cerca de los servicios. Estos termos eléctricos corresponden al sistema auxiliar de respaldo del sistema solar. A continuación se definen los parámetros de los equipos del sistema termosolar, este dimensionamiento se basa en dos manuales de diseño, la Ficha Técnica de Diseño e Instalación de Sistema Solar Térmico Centralizado Para Edificios Multivivienda [8] y Sistemas Solares Térmicos II [3]. El resultado de este dimensionamiento es utilizado como diseño base de la instalación termosolar, a la cual se le modifican los parámetros de los equipos relevantes, como volumen del estanque central o el área de absorción de los colectores, donde a través de simulaciones se evalúa la recuperación de la inversión en el capítulo 9.

Dentro de los sistemas termosolares se tienen dos tipos, los sistemas de termosifón y los sistemas de circulación forzada. Los sistemas de termosifón son sistemas prefabricado de fácil instalación y operación, ya que incorpora todos los elementos necesarios para su propio funcionamiento, además tienen bajo costo de adquisición y de operación. Este bajo costo es debido a la ausencia de equipos

de impulsión y elementos de control, lo que permite ahorrar consumo eléctrico y necesidades de mantenimiento de dichos equipos. Sin embargo para áreas de captación mayores las ventajas empiezan a ser menores respecto a una instalación forzada, donde no es recomendable para áreas superiores a 8 [m^2] [8], ya que los sistemas forzados tienen mejores eficiencias, las que se justifican para esta instalación, donde la demanda total[2] de ACS diaria es de 19220 [l/día] a una temperatura de 37 [°C][3]. Además, para cubrir esta demanda los sistemas de termosifón se deben conectar en paralelo, donde se obtienen un gran almacenamiento de agua caliente. Sin embargo, por la naturaleza del perfil de demanda de este proyecto, la cual se concentra al medio día, no se requiere un gran almacenamiento. Por estas razones se decide utilizar un sistema forzado con equipos de impulsión y elementos de control.

7.2.1 Circuito de Consumo

Primero se dimensiona el circuito de consumo, donde se utilizan tuberías aisladas, estas tuberías conectan el estanque central con los termos eléctricos distribuidos por el edificio, recorriendo un total de 141 [m]. Las tuberías seleccionadas son de cobre tipo L con un diámetro nominal de 20 [mm] o 3/4 [pul], el aislante es Armaflex de 9 [mm] de espesor, el costo total de este circuito es de $1.054.688 [CLP].

7.2.2 Circuito Primario

Lo segundo es el circuito primario que cuenta con colectores planos, su estructura de soporte, válvulas equilibradoras de caudal, tuberías aisladas, válvulas manuales, purgadores automáticos y válvulas de seguridad. El principal componente son los colectores, donde se seleccionan colectores planos en vez de colectores de tubo de vacío, principalmente por la mayor robustez de los primeros respecto de los segundos [8]. Además, las temperaturas máximas de los captadores planos son típicamente inferiores a las de los tubos de vacío, hecho que garantiza la fiabilidad de la instalación y permite reducir las exigencias en cuanto a calidad de materiales empleados.

Para determinar el número de colectores se utiliza como aproximación inicial el método simplificado F-Chart [3], que permite calcular la fracción solar de una instalación de producción de agua caliente.

[2] La demanda total de ACS sólo considera la demanda del Defider y del Casino.
[3] Considerando que la demanda total de ACS es 9610 [l/dia] a 60 [°C] y la temperatura promedio de la red es 14[°C]

Esto se realiza para distintas áreas de absorción con un tamaño del estanque de 75 [l/m^2] [3], luego se calculan indicadores económicos bajo los mismos criterios empleados en los capítulos siguientes, donde se utilizó un costo base de la instalación de $5.000.000 [CLP] y un costo dependiente del área de colección de $200.000 [CLP/$m^2$], además se considera el costo de mano de obra como el 15% del costo total. De este cálculo se obtiene que con un área de 54 [m^2] que representa una fracción solar de 0,4978 [-] se recupera la inversión en el menor tiempo posible, que es de 11 años. Por lo tanto utilizan un número de 28 colectores, el detalle de este procedimiento se muestra en el Anexo E.

La configuración de los colectores determina la cantidad de válvulas del circuito primario. La configuración escogida es de cuatro baterías independientes de su conexión (paralelo o serie), ya que la superficie disponible para ubicar los colectores, es un rectángulo con su lado menor de 14 [m]. Por lo tanto se utilizan 4 válvulas equilibradoras, 12 válvulas manuales, 4 válvulas de seguridad y 4 purgadores automáticos. Además, con esta configuración y el número de colectores se calculan el largo de las tuberías de circuito y el número de juntas de expansión térmicas, donde el largo del circuito primario es de 39 [m], las tuberías seleccionadas son de cobre tipo L con un diámetro nominal de 20 [mm] o 3/4 [pul]. También se definirá la inclinación de los colectores en 33°, ya que el rendimiento anual se optimizada cuando la inclinación del colector se fija a la latitud.

El fluido anticongelante que circula por el circuito primario es propilenglicol que es un líquido viscoso de origen orgánico, inodoro e incoloro (aunque por seguridad se le agrega un colorante). De densidad muy similar a la del agua, la proporción de volumen de anticongelante en la mezcla es de un 20%, la cual se seleccionó en base a su temperatura de congelamiento, que es de -7 [°C], donde la temperatura mínima historia registrada en Santiago es de -4.6 [°C] [3]. El costo total del circuito primario es de $9.136.440 [CLP].

7.2.3 Intercambiador de Calor

Lo tercero es dimensionar el intercambiador de calor, que es el equipo que une el circuito primario y el secundario. Para esto se necesita conocer las temperaturas y flujos de trabajo, los cuales se calculan en base a la Ficha Técnica de Diseño e Instalación de sistema solar térmico centralizado para edificios multivivienda [8]. Primero se calcula el flujo másico del circuito primario, el cual se determinó para una salto térmico del campo de 23 [°C], igual a la diferencia entre la temperatura de consumo de las duchas y la temperatura promedio de la red, donde se obtiene el flujo másico de 905 [kg/hr]. Luego para determinar el flujo másico del circuito secundario se igualan las capacidades caloríficas de ambos

circuitos. Las temperaturas de trabajo se calculan considerando una temperatura de entrada del circuito secundario de 25 [°C], donde se define un salto térmico entre circuito de 7 [°C], esto implica que la temperatura de salida del circuito primario es de 32 [°C]. Luego con el salto térmico del campo se obtiene la temperatura de entrada del circuito primario y se obtiene la potencia del intercambiador, la cual es de 23 [kW], también se utilizan 8 válvulas manuales. El costo total es de $ 312.799 [CLP].

7.2.4 Circuito Secundario

El cuarto paso es dimensionar el tamaño del estanque central, para esto se considera una relación con área absorción de 75 [l/m2] [8], por lo tanto se selecciona un estanque de 4000 [l], este valor dependerá principalmente del perfil de demanda diario. Además, se define un largo del circuito secundario de 6 [m], donde las tuberías seleccionadas son de cobre tipo L con un diámetro nominal de 20 [mm] o 3/4 [pul]. [3], cuatro válvulas manuales y un filtro. El costo total del circuito secundario es de $4.876.329 [CLP].

7.2.5 Sistema de Impulsión

Ahora que se cuenta con toda la información necesaria para dimensionar las bombas, donde la diferencia de altura son solo las pérdidas de carga lineal y singular del sistema. Las cuales son calculadas de acuerdo al manual de instalaciones solares térmicas 2 [3]. Para la bomba del circuito primario se tiene una altura de 4,75 [m] y un caudal de 1267 [kg/hr], para el circuito secundario 4,14 [m] y 1215 [kg/hr], en ambos casos se elige la misma bomba con una potencia de 69 [W], donde en cada circuito se utilizan 2 bombas, para tener una de respaldo, por lo tanto se instalan 4 bombas. Además, se considera un sistema de control, 8 válvulas antiretorno, 12 válvulas manuales y dos manometros. El costo total de este sistema es de $ 417.733 [CLP].

7.2.6 Sistema de Seguridad

Por último se dimensionan los equipos de seguridad para los aumentos de presión, donde se utiliza un vaso expansor independiente, en cada uno de los circuitos. En el circuito primario se selecciona un vaso expansor de 35 [l], en el secundario uno de 300 [l] y en el circuito de consumo uno de 600

[l]. Además, se consideran una válvula de seguridad y un manómetro para cada vaso expansor. El costo total de este sistema es de $ 774.268 [CLP].

7.2.7 Costos Totales

Los costos totales de la instalación solar térmica son de $ 19.058.096 [CLP], donde no se consideran los $4.324.665 [CLP] de la instalación distribuida auxiliar de respaldo de la instalación termosolar.

Tabla 7.2: Tabla de costos de la instalación termo solar centralizada inicial

Ítem	Costo [CLP]	Porcentaje [%]
Colectores Planos	$ 5.424.496	28
Estanque Central	$ 4.770.597	25
Estructura Colectores	$ 2.474.976	13
Tuberías	$ 1.517.701	8
Vaso Expansor	$ 712.120	4
Válvulas	$ 1.052.327	6
Intercambiador de Calor	$ 279.150	1
Bombas de Circulación	$ 271.163	1
Control y Medición	$ 69.729	0
Instalación	$ 2.485.839	13
	$19.058.096	100

8 Simulación

A continuación se simulan tres instalaciones de producción de ACS para satisfacer la demanda ACS del campus. Caso 1: representa la situación actual con el objetivo de determinar el problema en la calidad del suministro de ACS evidenciado en las mediciones realizadas. Caso 2: representa la instalación distribuida donde se solucionan los problemas en las instalaciones sanitarias, se reagrupan y agregan nuevos termos eléctricos. Caso 3: representa una instalación solar térmica centralizada con colectores planos y circulación forzada, con un sistema de control termostático.

Para identificar el problema se evalúa el estado de los servicio de agua caliente en cada caso a través de las simulaciones, donde se grafican las temperaturas que suministran para un día crítico. Este día es un viernes de la primera semana del mes de julio, ya que es el mes donde la radiación y la temperatura de la red es más baja. En estos gráficos se identifican dos temperaturas, la temperatura

del nodo superior del termo en las horas que no hay consumo y la temperatura suministrada para los servicios en las horas de consumo.

El software utilizado para realizar las simulaciones es Trnsys 17, el cual opera bajo el modelo numérico y sistema de control explicado en el capítulo 6, la herramienta utilizada de Trnsys es Simulation Studio, que es un completo paquete de simulación que contiene varias herramientas, desde equipos térmicos, hidráulicos, gráficos y plantillas, que interaccionan con conexiones gráficas como se observa en la Figura 8.1. Para todas las simulaciones se utiliza un paso de tiempo de 0,125 [hr] y un tiempo final de 8760 [hr].También se realizan tres supuestos generales para todos los casos simulados. El primero es no considerar los servicios del edificio E dentro del sistema centralizado de producción de ACS, principalmente por su baja demanda y la distancia ente los otros edificios. El segundo es no considerar el servicio de lavaplatos del nivel 0 del edificio F (F0LC), ya que se identifica que no se utilizan. El tercero es considerar los cuatro termos del casino ubicados en el nivel dos del edifico F (F2LC) como un solo termo con la suma de las potencias y los volúmenes individuales.

8.1 Instalación Distribuida Actual

Este caso representa la situación actual, que presenta problemas tanto en las instalaciones sanitarias como en la producción de agua caliente. Esto se presenta en detalle en el capítulo 3.1.3; donde se identifica el mal estado de los servicios, principalmente las duchas del edificio B y E; con instalaciones sanitarias deterioradas y termos a gas fuera de funcionamiento. Como consecuencia de estos problemas las duchas del edificio F se saturan y los termos no logran abastecer la cantidad de agua demanda a la temperatura adecuada. Para simular esta situación toda la demanda de agua caliente requerida por el Defider se distribuye solo en las duchas del edificio F, por lo tanto para las duchas del edificio B y las duchas de los funcionarios del laboratorio en edifico E se considera sin demanda, por lo que no se simulan.

El esquema de simulación representado en la Figura 8.1, es el utilizado para simular la producción de agua caliente de un termo, donde se ingresan tres tipos de demanda: para los días de la semana, fin de semana y vacaciones. Además, se identifica una válvula mezcladora termostática, la que en este caso no se utiliza, ya que el termostato del termo está ajustado a la temperatura de consumo, por lo tanto no se mezcla con agua fría y sólo se consume el agua del nodo superior del termo.

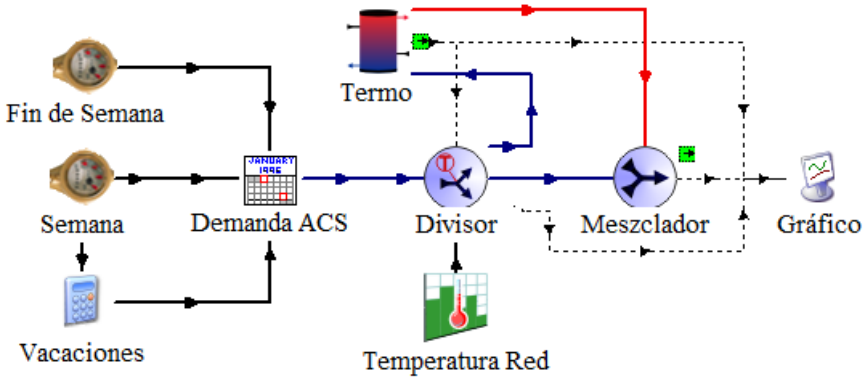


Figura 8.1: Esquema de simulación de un termo eléctrico distribuido (Fuente: Trnsys 17)

En este caso se simularon solo los termos del edificio F como se observa en la Figura 8.2, donde cada cuadrado verde representa la producción de agua caliente de la Figura 8.1, con su curva de demanda especifica.

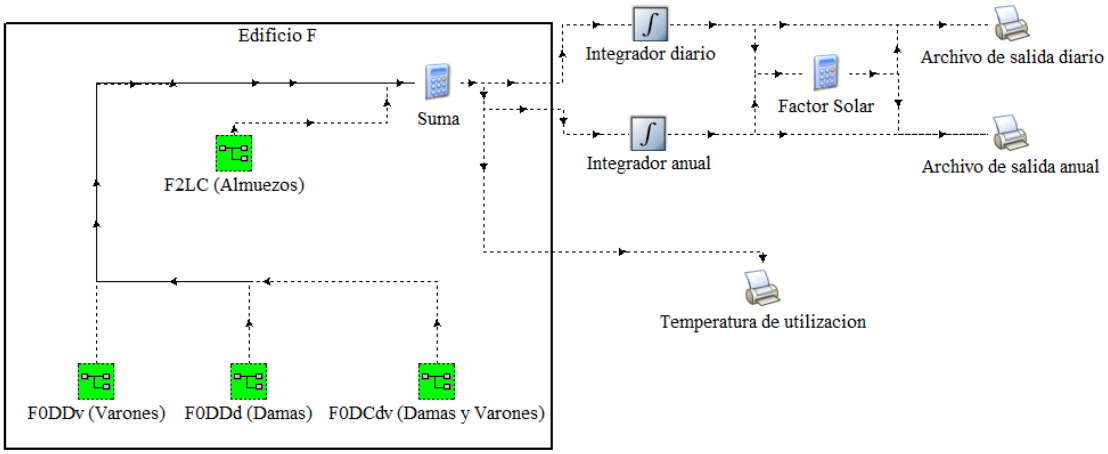


Figura 8.2: Esquema general de simulación de producción de ACS distribuida actual (Fuente: Trnsys 17)

El día crítico es graficado en la Figura 8.3, en la curva no se observa la temperatura de las duchas de los varones de edificio F (F0DDv), ya que está sobrepuesta por la curva de las duchas de las damas (F0DDd).

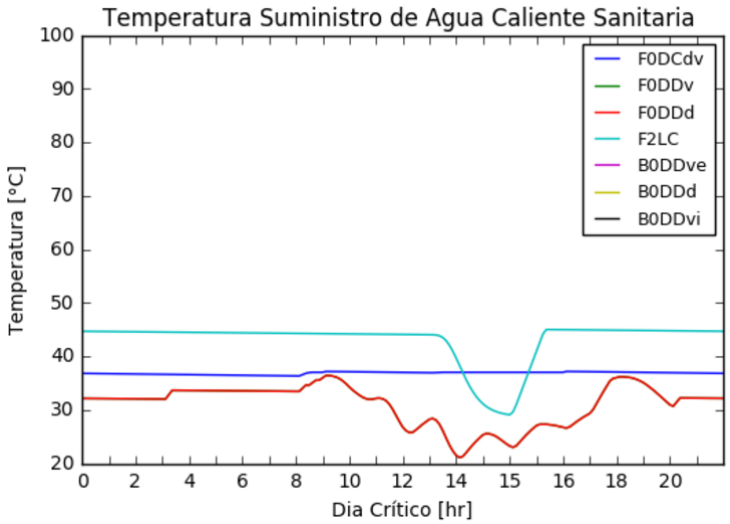


Figura 8.3: Temperatura de suministro de los servicios

8.2 Instalación Distribuida Auxiliar de Respaldo

Este caso representa la situación donde las instalaciones sanitarias en mal estado son reparadas. También se reagrupan y agregan nuevos termos eléctricos, a continuación se realizan tres cambios, en cada caso se verifica si suministra ACS a las temperaturas óptimas. Como los problemas de las instalaciones sanitarias se solucionarían, ahora toda la demanda de ACS de los termos requerida por el Defider se distribuye de manera proporcional al número de duchas, esto se observa en el esquema representado en la Figura 8.4, que es similar al esquema anterior con la diferencia que se agregan los termos del edificio B.

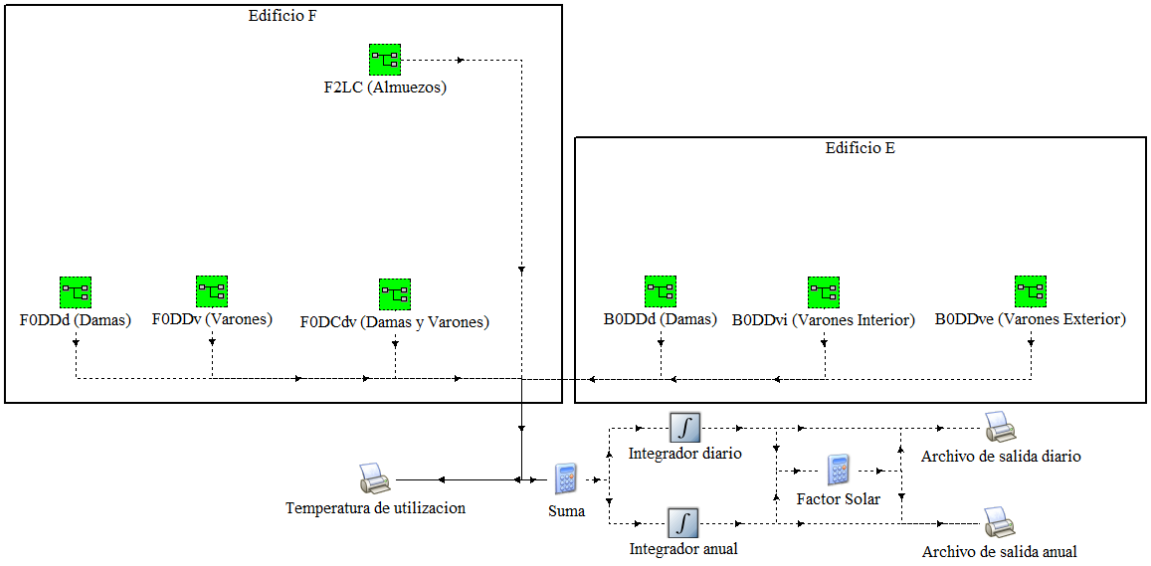


Figura 8.4: Esquema general de simulación de producción de ACS distribuida propuesta (Fuente: Trnsys 17)

8.2.1 Adición y Reagrupación de Termos Eléctricos

La adición de termos consiste en agregar dos termos eléctricos de 700 [l] con una potencia de 9 [kW] cada uno, estos termos suministran agua a las duchas del edificio B, específicamente las de damas (B0DDd) y las de varones (B0DDvi). En la reagrupación se propone cambiar el termo de 250 [l] que se ubica en el edificio E (E0DFdva), por el termo de 700 [l] que no es utilizado en los lavaplatos del edificio F (F0LC). Como resultado de estos cambios se obtiene el perfil diario de temperaturas representado en la Figura 8.5, donde se observa que la situación mejoró, sin embargo no se satisfacen las temperaturas, principalmente en los termos del nivel 2 del edificio F (F2LC).

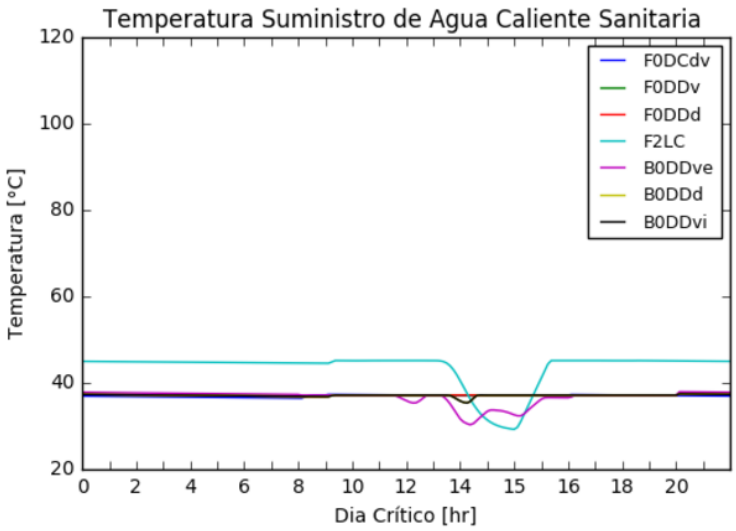


Figura 8.5: Temperatura de suministro de los servicios

8.2.2 Aumento de la Temperatura de Acumulación

Además, de la adición y reagrupación de los termos se propone aumentar la temperatura de almacenamiento, que permite maximizar el volumen de almacenamiento, para esto se necesita una válvula mezcladora termostática. La temperatura de almacenamiento escogida para los termos del nivel 2 del edificio F es de 65 [°C], que es la máxima temperatura suministrada por los termos, para el resto de los termos es de 60 [°C], ya que son menos exigidos. El resultado de estos cambios es representado en la Figura 8.6, las temperaturas graficadas son de la válvula mescladora termostática, donde la temperatura mostrada en los periodos sin demanda es la temperatura de almacenamiento de cada termo. El cambio es positivo para la mayoría de los termos, sin embargo, los termos del nivel 2

del edificio F (F2LC) no logran cubrir la demanda de agua caliente, incluso cuando se regula el termostato del termo eléctrico a la temperatura máxima.

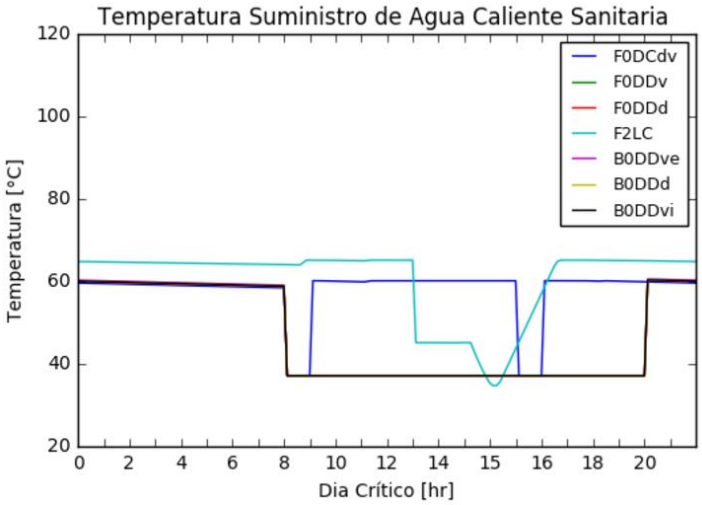


Figura 8.6: Temperatura de suministro de los servicios

8.2.3 Reutilización de Termos en Fuera de Servicio

Además, de la adición, reagrupación y aumento de la temperatura de Acumulación de los termos, se propone la reutilización de los termos fuera de servicio, esto consiste en agregar dos de los termos a gas con el calentador defectuoso a los 4 termos del casino en el nivel 2 del edificio F (F2LC). Cada uno de estos termos se conecta en serie entre dos termos eléctrico aumentado el volumen de almacenamiento de agua caliente de 2800 a 4200 [l]. Sin embargo se debe verificar el estado de la aislación, corrosión y estanqueidad de los termos. Como resultado de la reutilización de los termos se logra cubrir la demanda de agua caliente de manera óptima, esto se observa en la Figura 8.7.

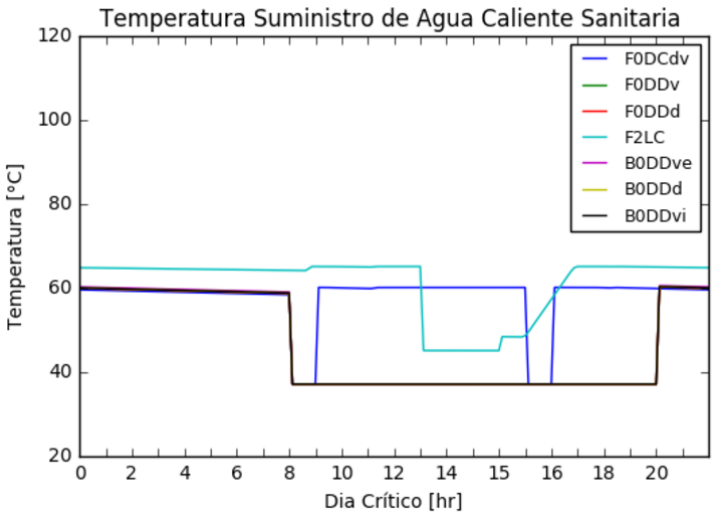


Figura 8.7: Temperatura de suministro de los servicios

8.3 Instalación Centralizada Solar Térmica

Este caso representa el sistema termo solar centralizado explicado en el Capítulo 6, el cual se basa en la interacción entre el circuito primario del campo solar y el circuito secundario del estanque de almacenamiento central. Donde la producción de ACS se distribuye al sistema auxiliar de termos eléctricos a través del circuito de consumo, este circuito utiliza agua del nodo superior del estanque central la cual es enviada a los termos eléctricos por una diferencia de altura de 14 [m], ya que el estanque central se ubica en la azotea del edificio. Este recorrido es de un sentido, por lo tanto no existe una circulación debido al número de entrada de los termos existentes y el costo involucrado en cañerías, por lo tanto se debe reponer el agua consumida al termo central, a su presión de trabajo, en este estudio se considera que la presión de la red dentro de la universidad alcanza la presión de trabajo del estanque central, sin la necesidad de utilizar un grupo de llenado.

El esquema general de la configuración se muestra en la Figura 8.8 donde se observan los circuitos mencionados en el capítulo 6, en cada circuito se consideran perdidas térmicas en las tuberías y estanques de almacenamiento. En el circuito primario y secundario se considera la temperatura ambiental para calcular las perdidas térmicas, ya que se encuentran en el exterior del edificio. En el circuito de consumo se considera una temperatura constante de 20 [°C] debido a la calefacción e inercia térmica del edificio.

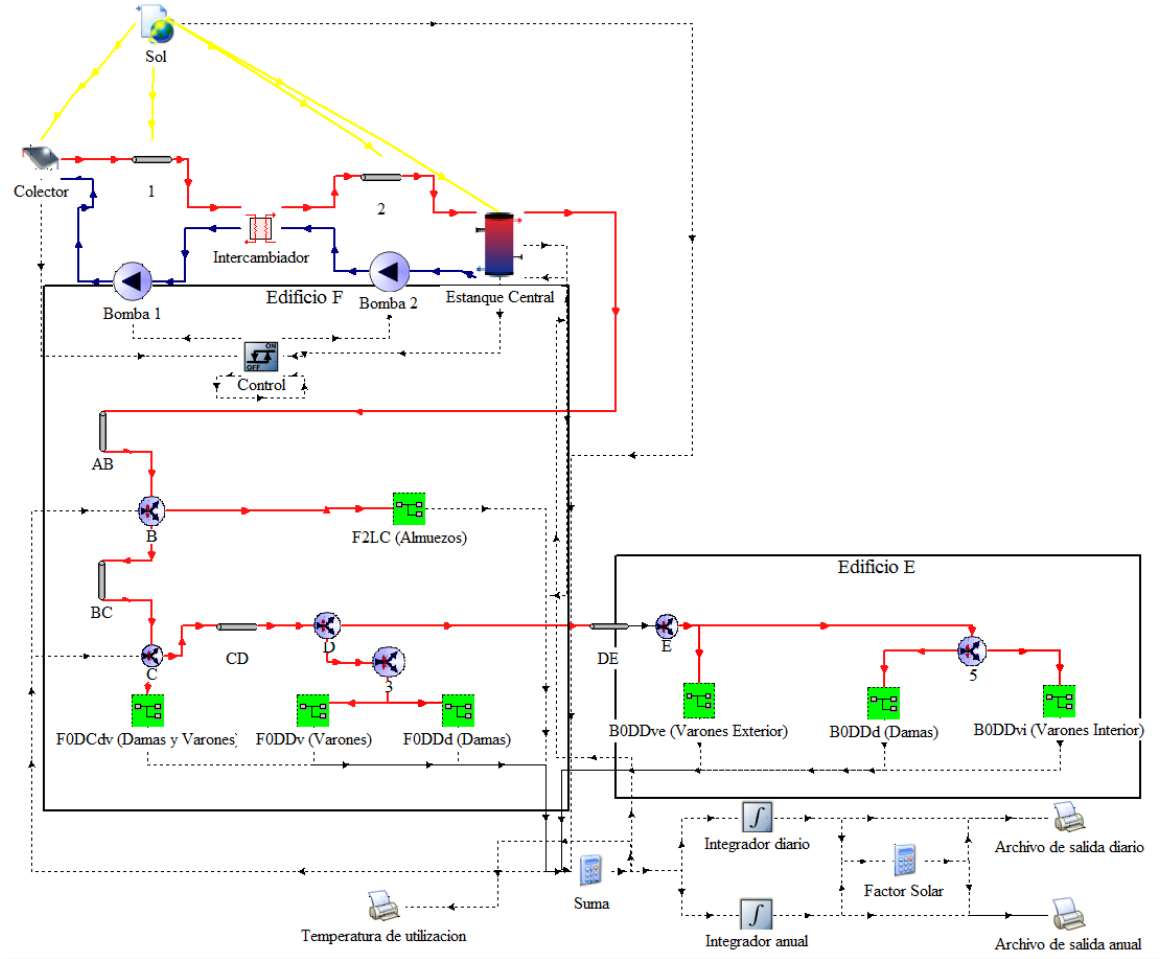


Figura 8.8: Esquema de simulación del sistema solar térmico centralizado (Fuente: Trnsys 17)

Con el objetivo de determinar la configuración que obtenga el retorno de capital (Payback) en menor tiempo se estudian distintos tamaños y configuraciones de los equipos, desde un caso base, el dimensionamiento inicial del Capitulo7.2. El primer estudio es la variación del volumen del estanque, donde se determina la relación entre el área de absorción y el volumen del estanque, la cual está ligada al perfil de demanda de ACS. El segundo estudio es la variación del número de paneles conectados en paralelo, donde se determina la fracción solar del sistema. El tercer estudio es la variación del ángulo de inclinación de los colectores y por último se estudia la configuración en serie de los colectores. Respecto al perfil de las temperaturas del día crítico se comprueba que en cada una de estas configuraciones se obtienen el mismo perfil. Esto se debe a que se utiliza como sistema de respaldo la instalación distribuida de la sección 8.2.3, lo que se observa en la Figura 8.9.

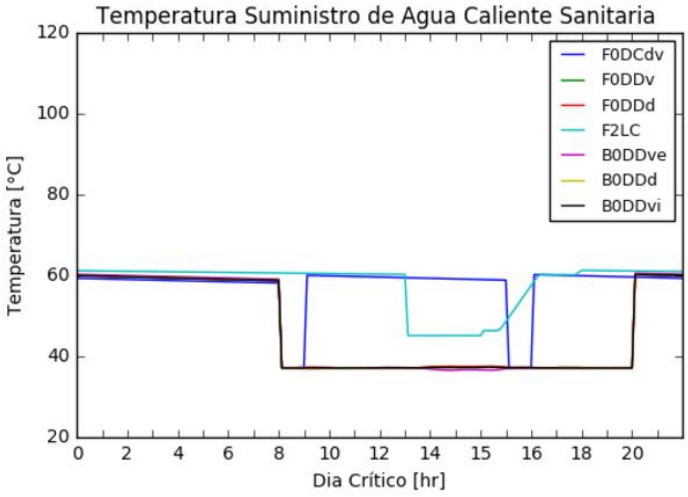


Figura 8.9: Temperatura de suministro de los servicios

9 Análisis y Evaluación Económica

En este capítulo se analizan los casos simulados desde un punto de vista energético y económico, con el objetivo de encontrar la mejor solución que logre abastecer agua caliente a temperaturas adecuadas y permita recuperar la inversión en el menor plazo. En el capítulo 8 se verificó si las soluciones propuestas cumplen con los requerimientos de los servicios. En este capítulo se analizan los resultados energéticos obtenidos, estos resultados son el consumo de energía auxiliar (Q_{AUX}) y el consumo energético de agua caliente sanitaria (Q_{ACS}). El primero corresponde a la energía consumida por todos los calentadores de los termos eléctricos. El segundo corresponde a la energía utilizada por todos los servicios de agua caliente, la cual es calculada según la Ecuación - 9.1, donde la masa de agua caliente corresponde a la cantidad de agua del termo utilizada para mezclarse con agua de la red y alcanzar la temperatura de utilización de los servicios.

$$Q_{ACS} = Cp * m_{caliente}(T_{caliente} - T_{red}) \qquad [kJ/hr] \qquad \text{- 9.1}$$

Para las instalaciones centralizadas con un sistema termosolar se calcula la fracción solar, que corresponde a la relación entre la energía aportada por el sistema solar térmico y el consumo energía de agua caliente sanitaria, donde se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$Q_{SOL} = (Q_{ACS} - Q_{AUX}) \qquad [kJ/hr] \qquad \text{- 9.2}$$

$$F_{SOL} = Q_{SOL}/Q_{ACS} \qquad [kJ/hr] \qquad \text{- 9.3}$$

Con el valor de energía auxiliar anual se determina el costo de electricidad y para los sistemas solares térmicos calcular el ahorro, este costo bruto es calculado con un precio de la electricidad de 74,5 [CLP/kWh]. Para calcular el ahorro se compara el costo de electricidad de la instalación distribuida propuesta, con el costo de electricidad de cada caso solar. Con este ahorro se calculan tres indicadores financieros los cuales son calculados para un periodo de 20 años y una tasa de descuento de 8 %, donde no se consideran costos de mantenimiento ni la venta de equipos al termino de los 20 años. Para cada evaluación se determina el VAN, el TIR y el Payback.

9.1 Análisis Instalación Distribuida Actual

El objetivo de realizar esta simulación es comprobar los resultados de las mediciones realizadas en el análisis de situación actual, lo cual se logra y se observa claramente en el perfil de temperatura del día crítico en la Figura 8.3. Los principales resultados de la simulación se detallan en la Tabla 9.1, donde se observa que la energía consumida por el calentador auxiliar es levemente mayor que la energía del agua caliente sanitaria. Esto se debe a las perdidas térmicas de cada termo, estas pérdidas corresponden a 1594 [kJ/hr].

Tabla 9.1: Resultados económicos de la instalación distribuida actual

Balance Anual		
Energía de Agua Caliente Sanitaria	66743	[kWh]
Energía del Calentador Auxiliar	68337	[kWh]
Costo Electricidad	$-5.091.132	[CLP]

Si comparamos estos valores con los de los casos donde se cumplen con los requerimientos de temperatura se observa que son menores, ya que la energía suministrada por los equipos es menor al alcanzar temperaturas inferiores a las adecuadas.

9.2 Análisis Instalación Distribuida Auxiliar de Respaldo

En este estudio se realizan tres simulaciones, donde los cambios realizados se van acumulando hasta determinar la configuración que permite cumplir con los requerimientos de temperatura de los

servicios, con el objetico de respaldar al sistema solar térmico. También se calculan las pérdidas térmicas, estas son la diferencia entre la energía auxiliar y la de ACS.

9.2.1 Análisis Adición y Reagrupación de Termos Eléctricos

Al agregar los dos termos eléctricos del edificio B mejoran las temperaturas en la mayoría de los servicios. Sin embargo en la duchas de los varones con acceso desde el exterior del edifico B (B0DDve) y los lavaplatos del casino (F2LC) no se logra cumplir con los requerimientos. El costo de implementar esta medida es de $3.967.221 [CLP] que es el costo bruto de los dos termos eléctricos y su instalación, donde las pérdidas térmicas son 2645 [kWh], estas aumentan respecto a la situación actual, ya los termos están a mayor temperatura y aumenta el área de perdida.

Tabla 9.2: Resultados económicos de la instalación distribuida propuesta

Balance Anual		
Energía de Agua Caliente Sanitaria	80831	[kWh]
Energía del Calentador Auxiliar	83476	[kWh]
Costo Electricidad	$-6.218.948	[CLP]
Inversión	$-3.967.221	[CLP]

9.2.2 Análisis Aumento de la Temperatura de Acumulación

Al aumentar la temperatura de almacenamiento a 65 [°C] en los termos de los lavaplatos del casino (F2LC) y a 60 [°C] al resto de los termos, se logra solucionar el problema en las duchas, sin embargo en los lavaplatos no se alcanza a cubrir la demanda a temperaturas óptimas. El costo de implementación de esta medida es el costo bruto de 7 válvulas termostática más los termos agregados anteriormente.

Tabla 9.3: Resultados económicos de la instalación distribuida propuesta

Balance Anual		
Energía de Agua Caliente Sanitaria	88005	[kWh]
Energía del Calentador Auxiliar	94431	[kWh]
Costo Electricidad	$-7.035.132	[CLP]
Inversión	$-4.324.665	[CLP]

Al aumentar la temperatura de almacenamiento se debe considerar que se aumentan las pérdidas térmicas en los termos, lo que se traduce en pérdida de eficiencia del sistema de producción de agua caliente, esta pérdida es de 6426 [kWh]. Pero por otro lado se toma una medida preventiva de frente a la aparición de la legionela, que es una bacteria con una infección similar a la neumonía, esta bacteria se desarrolla a una temperatura de 20 a 45 [°C], para instalaciones distribuidas no existe una normativa, sin embargo los sistemas centralizados deben cumplir con normas europeas [4]

9.2.3 Reutilización de Termos Fuera de Servicio

Al reutilizar los termos se aumenta el volumen de almacenamiento total de los termos del casino, de 2800 a 4200 [L], lo que permite abastecer agua caliente a la temperatura de utilización de los lavaplatos como se observa en el gráfico de temperaturas de Figura 8.7.

Tabla 9.4: Resultados económicos de la instalación distribuida propuesta. (Fuente: Elaboración propia)

Balance Anual		
Energía de Agua Caliente Sanitaria	88699	[kWh]
Energía del Calentador Auxiliar	95647	[kWh]
Costo Electricidad	$-7.125.726	[CLP]
Inversión	$-4.324.665	[CLP]

Al comparar el costo de electricidad de la Tabla 9.4 con los casos anteriores, se verifica que es el mayor, ya que como se menciona anteriormente se tienen un mayor consumo energético de agua caliente, al cumplir con la temperatura requeridas por los servicios. Por lo tanto se considera este valor de costo de la electricidad para calcular el ahorro en los sistemas solares térmicos. Respecto a las pérdidas se observa que aumentan a 6948 [kWh], este aumento es de un 263% respecto al caso con temperaturas de almacenamiento bajas, esta pérdida de energía se traduce a $517.637 [CLP] anuales.

9.3 Análisis Instalación Centralizada Solar Térmica

Esta instalación corresponde a un sistema termosolar centralizado, donde se analiza y estudian las variaciones de cuatro parámetros o configuraciones, donde el criterio para definir la configuración

[4] UNE 100030 "Prevención de la Legionela en instalaciones de edificios".

optima es el plazo de la recuperación la inversión o Payback. El primer caso simulado es el caso base dimensionado en el Capítulo 7.2, luego se escoge el caso óptimo para realizar el estudio de variación del siguiente parámetro. En la Tabla 9.5 se muestran los resultados de la simulación del caso base utiliza un estanque de 4000 [l], 28 colectores en paralelo y una inclinación de 33°.

Tabla 9.5: Resultados económicos de la instalación base

Balance Anual		
Energía de Agua Caliente Sanitaria	88706	[kWh]
Energía del Calentador Auxiliar	66453	[kWh]
Energía del Sistema Solar	22253	[kWh]
Factor Solar	25,1	[%]
Costo Electricidad	$ -4.950.732	[CLP]
Ahorro	$ 2.174.994	[CLP]
Inversión	$-19.058.096	[CLP]
Van	$ 2.585.423	[CLP]
Tir	9,8	[%]
Payback	15,2	[años]

9.3.1 Análisis Variación Volumen de Estanque Central

Al variar el tamaño del estanque cambia la capacidad de almacenamiento de energía del sistema termosolar, el tamaño del estanque del caso base es de 4000 [l], ya que se utilizó la razón de 75 [L/m^2] para dimensionarlo. Sin embargo esta regla se considera para instalaciones familiares, donde su demanda punta de agua caliente es en la mañana. En este caso la demanda de ACS de la universidad se acopla a la radiación solar y no es necesario un gran almacenamiento. Es por esta razón que al variar el volumen del estanque central disminuye el tiempo de recuperación de la inversión, como se observa en la Figura 9.1, ya que bajan la inversión y no varía en gran medida la energía aportada por el sistema termo solar, además se tienen menos perdidas y se facilita la instalación, ya que no es necesario subir un termo 4000 [l] con una grúa.

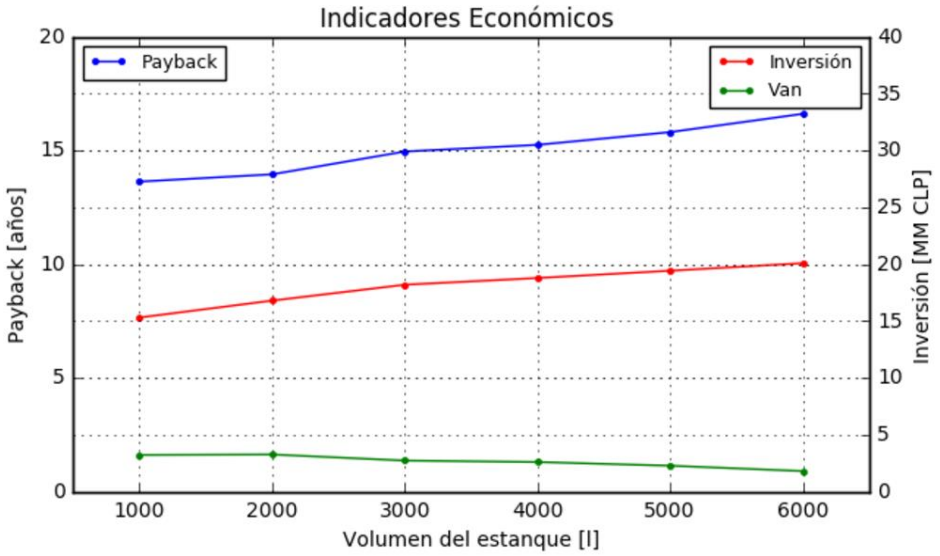


Figura 9.1: Resultado del análisis de variación volumen de estanque central

En la Tabla 9.6 se observan los resultados de la simulación con un estanque de 1000 [l], donde se recupera la inversión en menor plazo de tiempo , además disminuye la inversión, se incrementa el VAN y la TIR, esto se observa al compáralo con la Tabla 9.5.

Tabla 9.6: Resultados económicos de la instalación con estanque de 1000 [l]

Balance Anual		
Energía de Agua Caliente Sanitaria	88704	[kWh]
Energía del Calentador Auxiliar	70353	[kWh]
Energía del Sistema Solar	18351	[kWh]
Factor Solar	20,7	[%]
Costo Electricidad	$ -5.241.311	[CLP]
Ahorro	$ 1.884.415	[CLP]
Inversión	$ -15.583.606	[CLP]
Van	$ 3.206.971	[CLP]
Tir	10,7	[%]
Payback	13,6	[años]

9.3.2 Análisis Variación Número de Colectores

Al aumentar el número de colectores en paralelo aumenta el área de absorción, esto implica dos consecuencias importantes para la recuperación de la inversión: un aumento del factor solar y un aumento de los costos de los equipos. El aumento del factor solar se traduce en un aumento del ahorro,

mientras que un aumento en los costos de los equipos eleva la inversión del proyecto, principalmente en el costo de los colectores con su estructura de montaje incluida.

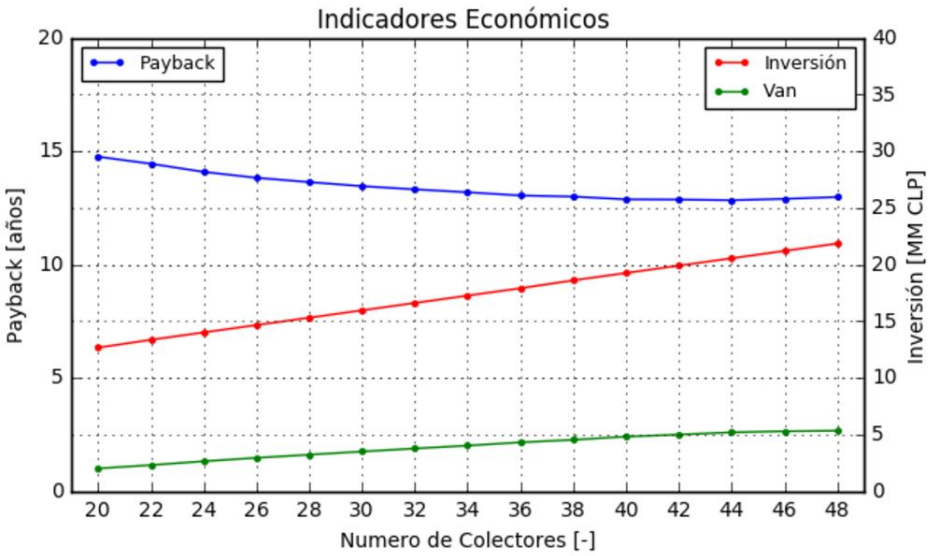


Figura 9.2: Resultado del análisis de variación número de colectores.

En la Figura 9.2 se muestra un menor plazo de recuperación de la inversión con un número de 44 colectores, este número cambió significativamente desde el dimensionamiento del caso base, donde se obtuvo un número de 28 colectores. Esta diferencia se debe principalmente por el método simplificado de calcular la fracción solar, donde utilizando la metodología F-chart se obtuvo una fracción solar de 0,50 [-] con un numero de 28 colectores, mientras que a través de las simulaciones se obtuvo una fracción solar de 0,32 [-] con un numero de 44 colectores. Luego de 44 colectores la curva del Payback sube levemente al aumentar el área de absorción, esto se debe al comportamiento de la demanda de ACS, ya que para el caso de la universidad un día de vacaciones su demanda baja un 80 % respecto de un día normal, donde en el periodo de verano se tienen 51 días de vacaciones y 31 donde la universidad cierra, periodo que tenemos la mejor radiación solar del año, por lo tanto al aumentar el área de absorción solo se aumenta la fracción solar en los meses de invierno, ya que los meses de verano tienen un aporte 100 % solar, esto se observa en la Figura 9.3. Por lo tanto el incremento de la inversión no se justifica para el ahorro que genera.

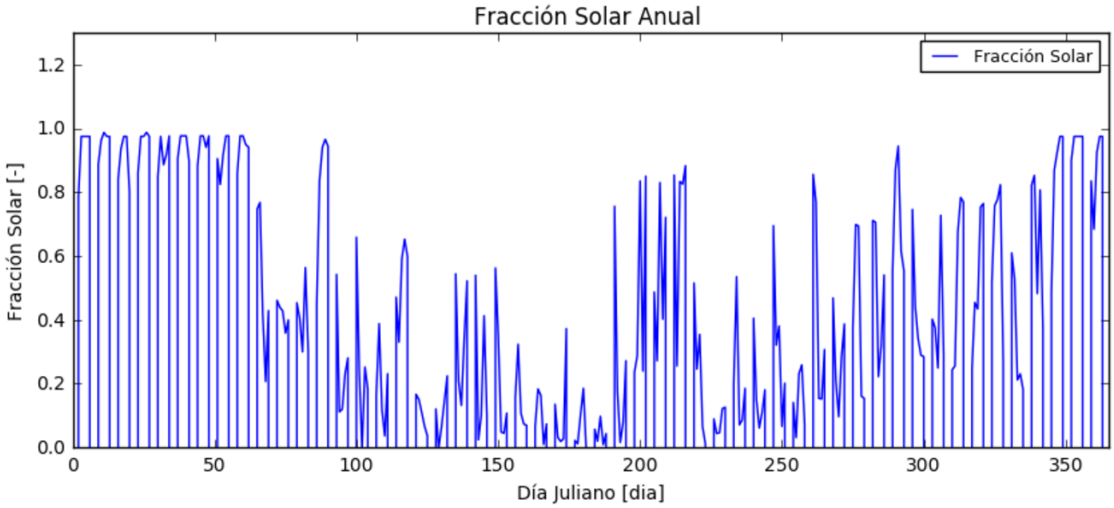


Figura 9.3: Fracción solar para una istalación con 44 colectores

Los resultados de las simulaciones para 44 colectores de detalla en la Tabla 9.7.

Tabla 9.7: Resultados económicos de la instalación con 44 colectores

Balance Anual			
Energía de Agua Caliente Sanitaria		88704	[kWh]
Energía del Calentador Auxiliar		60487	[kWh]
Energía del Sistema Solar		28217	[kWh]
Factor Solar		31,8	[%]
Costo Electricidad	$	-4.506.279	[CLP]
Ahorro	$	2.619.141	[CLP]
Inversión	$	-20.774.688	[CLP]
Van	$	5.176.844	[CLP]
Tir		11,2	[%]
Payback		12,8	[años]

9.3.3 Análisis Variación Ángulo de Inclinación de Colectores

Al variar el ángulo de inclinación del colector se prioriza la época del año que absorberá más energía, donde en verano el sol pasa más alto y en invierno más bajo, como regla general para maximizar la captación de energía a lo largo del año se recomienda ajustar este ángulo a la latitud del lugar donde se ubica la instalación, en este caso 33°. Sin embargo los resultados no son los esperados, ya que no se generan cambios significativos al variar este ángulo dentro de los valores estudiados, como se observa en la Figura 9.4, el resultado esperado era que en una inclinación mayor se obtuvieran mejores resultados, ya que los colectores recibirían más energía en invierno, que es donde existe una mayor y

constante demanda de ACS. Este resultado se puede justificar por la naturaleza de la radiación en invierno donde tenemos una radiación más difusa la cual no se maximiza con la inclinación del colector.

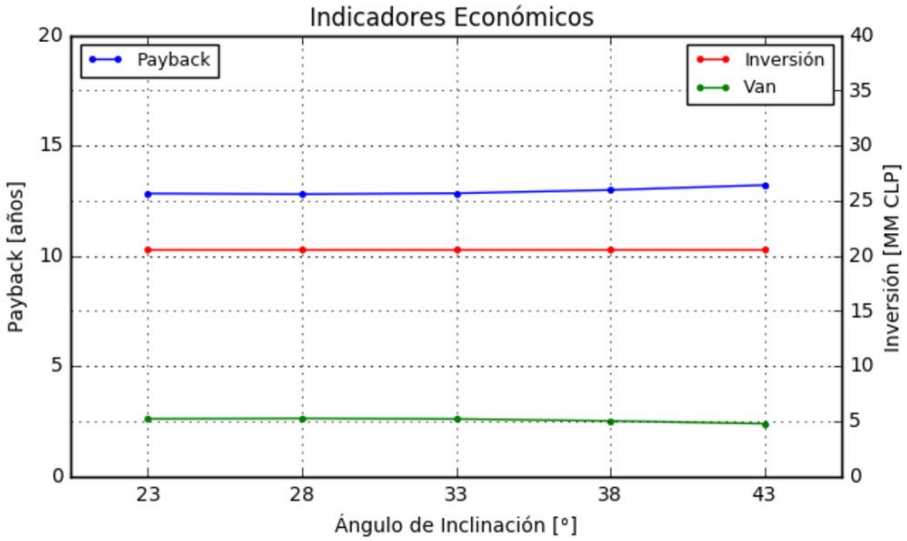


Figura 9.4: Resultado del análisis de variación ángulo de inclinación

De acuerdo a los resultados, se decide conservar el ángulo de inclinación del colector de 33°, por los tanto se obtienen los mismos resultados de la Tabla 9.7.

9.3.4 Análisis Variación Conexión de los Colectores

Se estudian tres configuraciones de la conexión de las cuatro baterías de colectores con 11 colectores conectados en paralelo cada una. La primera configuración es la conexión en paralelo de las cuatro baterías. La segunda configuración es la conexión en paralelo de dos grupos de baterías conectadas en serie. La tercera configuración es la conexión en serie de las cuatro baterías. Los resultados se grafican en la Figura 9.5, donde no se observan cambios, por los tanto se obtienen los mismos resultados de la Tabla 9.7.

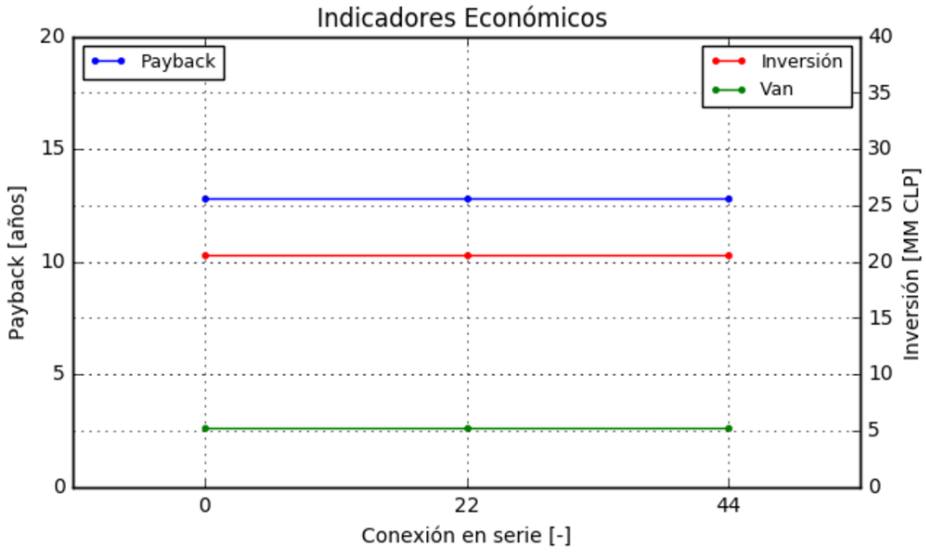


Figura 9.5: Resultado del análisis de variación conexión de los colectores

Los resultados obtenidos de la configuración se justifican principalmente por la disminución de la eficiencia del colector al aumentar las temperaturas y el aumento de eficiencia al aumentar el caudal del fluido calor portador, como se observa en la Figura 9.6 donde se compara el conexionado en paralelo y en serie de dos colectores. Para los colectores conectados en paralelo se obtiene la misma eficiencia y la misma temperatura de salida, para los colectores conectados en serie por el primer colector pasa en doble de caudal y obtiene una mayor eficiencia, pero cuando pasa por el segundo colector pierde la eficiencia ganada debido al aumento de temperatura.

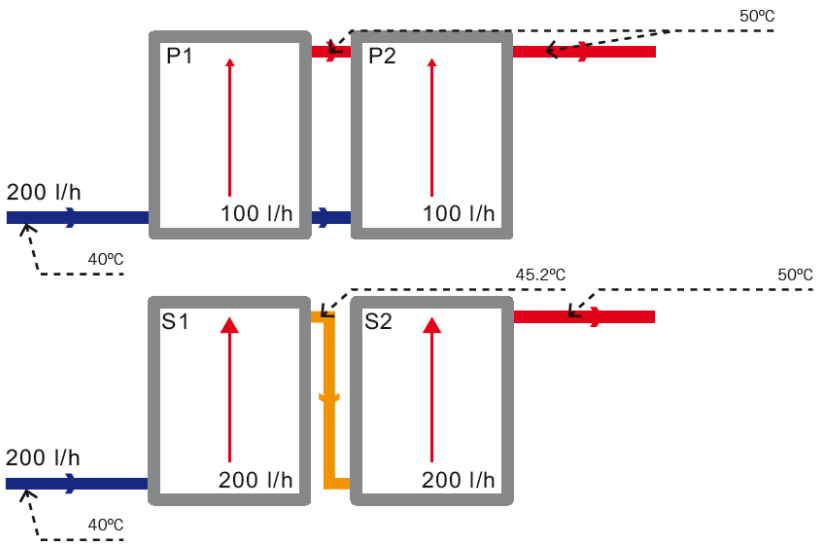


Figura 9.6: Ejemplo conexión serie paralelo de los colectores (Fuente: Sistemas Solares Térmicos II.)

9.4 Instalación Centralizada Solar Térmica Final

Las simulaciones entregan como resultado una instalación con un estanque de 1000 [l], 44 colectores conectados en paralelo y con una inclinación de 33°, donde se recuperación la inversión en un plazo de 12,8 años, esto se observa en la Tabla 9.8.

Tabla 9.8: Resultados económicos de la instalación termosolar centralizada Final

Balance Anual			
Energía de Agua Caliente Sanitaria		88704	[kWh]
Energía del Calentador Auxiliar		60487	[kWh]
Energía del Sistema Solar		28217	[kWh]
Factor Solar		31,8	[%]
Costo Electricidad	$	-4.506.279	[CLP]
Ahorro	$	2.619.141	[CLP]
Inversión	$	-20.774.688	[CLP]
Van	$	5.176.844	[CLP]
Tir		11,2	[%]
Payback		12,8	[años]

Los costos totales de la instalación solar térmica son de $ 20.774.688 [CLP], donde no se consideran los $4.324.665 [CLP] de la instalación distribuida auxiliar de respaldo. El porcentaje de este costo se muestra en la Tabla 9.9, donde los detalles de estos equipos se muestran en el Anexo D.

Tabla 9.9: Tabla de costos de la instalación termosolar centralizada Final

Ítem	Costo [CLP]	Porcentaje [%]
Colectores Planos	$ 8.524.208	41
Estanque Central	$ 1.749.301	8
Estructura Colectores	$ 3.889.248	19
Tuberías	$ 1.517.701	7
Vaso Expansor	$ 712.120	3
Válvulas	$ 1.052.327	5
Intercambiador de Calor	$ 279.150	1
Bombas de Circulación	$ 271.163	1
Control y Medición	$ 69.729	0
Instalación	$ 2.709.742	13
	$20.774.688	100

10 Conclusiones

Se comprueban las hipótesis de los problemas en la producción de ACS que arrojan las mediciones realizadas en el estudio de situación actual. Donde a través de simulaciones se determina que la gran mayoría de los termos eléctricos no logran satisfacer la demanda de ACS a las temperaturas adecuadas de los servicios. El único termo que cubre la demanda de manera adecuada es el ubicado en las duchas de los funcionarios del casino (F0DCdv).

Se determina la instalación auxiliar que logra cubrir la demanda de agua caliente en un día crítico de manera adecuada y respaldar al sistema termosolar. Esta instalación considera: la adición de dos termos eléctricos de 600 [l] en el edificio B; la reagrupación de un termo eléctrico de 250 litros por el termo eléctrico de 700 litros que suministra ACS a los lavaplatos del Casino en nivel 0 (F0LC), el cual no se utiliza; la adición de 7 válvulas mezcladoras termostáticas que permiten aumentar la temperatura de almacenamiento de los termos; aumentar su volumen de almacenamiento de 2800 a 4200 litros, agregando dos termos a gas con su calentador en mal estado. El costo total de la instalación distribuida auxiliar de respaldo es de $4.324.665 [CLP].

Se diseña y dimensiona la configuración de la instalación solar térmica centralizada óptima que permite recuperar la inversión en el menor plazo. Esta instalación centralizada sólo considera suministrar ACS a los edificios F y B, debido a la baja demanda del edificio E. De los resultados de

las simulaciones se obtiene la siguiente configuración: 44 colectores de área total 85 m^2, un estanque de 1000 litros, una inclinación de 33° y una conexión en paralelo. . El costo total de la instalación es de $ 20.774.688 [CLP]. Además, esta instalación aporta 28217 [kWh] al año lo que corresponde a una fracción solar de 0,32 y a un ahorro anual de $2.619.447 [CLP], también se obtienen un VAN de $5.179.855 [CLP], un TIR de 0,112 [-] y un Payback de 12,8 [años].

Respecto al número de colectores, se generó un aumento significativo desde el caso base de dimensionamiento, donde se proponía la mejor solución con un área de 54 [m^2], la cual aumento a 85 [m^2] a través de los resultados de las simulaciones. Esta diferencia se debe principalmente por el método simplificado de calcular la fracción solar que es de 0,4978 [-], incluso con menor área de absorción. Además se determina que al agregar más de 44 colectores no disminuye el plazo de recuperación de la inversión, esto se debe al comportamiento de la demanda de agua caliente sanitaria de la universidad que en el periodo de verano se tienen 51 días de vacaciones y 31 donde la universidad cierra, periodo que tenemos la mejor radiación solar del año. Por lo tanto al aumentar el número de paneles aumenta el aporte de energía solo en el invierno, ya que en el periodo de verano está cubierto al 100%.

En relación al volumen del estanque se generó una disminución desde el caso base, donde se utilizó un volumen de almacenamiento de 4000 [l], ya que se utilizó la razón de 75 [L/m^2]. Sin embargo esta regla es considera para instalaciones familiares donde su demanda punta de agua caliente es en la mañana, pero en este caso la demanda de ACS de la universidad se acopla a la radiación lo que permite un menor almacenamiento.

Respecto a la inclinación no se observan cambios significativos, sin embargo el resultado esperado era obtener una recuperación de la inversión menor al aumentar la inclinación, ya que los colectores recibirían más energía en invierno, que es donde existe una mayor demanda constante de ACS, esto se justifica por la naturaleza de la radiación en invierno donde tenemos una radiación más difusa la cual no se maximiza con el aumento de la inclinación del colector.

Acerca de la conexión no se genera una variación al cambiar de paralelo a serie, donde los resultados se justifican principalmente por la disminución de la eficiencia del colector al aumentar la temperatura y el aumento de eficiencia al aumentar el caudal del fluido calor portador.

Se proponer un diseño imparcial que permite tomar la decisión de la licitación. Además se proporciona la información requerida por un instalador para generar una propuesta de licitación. En el Anexo D se muestran los detalles de la instalación auxiliar de respaldo y la instalación solar térmica centralizada. También, el en Anexo B se muestran los perfiles de demanda de ACS que permiten dimensionar un proyecto solar térmico.

11 Referencias

[1] SHC Task 51. Solar Energy and Urban Planning-2016 Highlights. [en línea]. International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, 2016. [Consulta: 06-Sep.-2017]. Disponible en: http://task51.iea-shc.org/

[2] SHC Task 49. Solar Heat Integration in Industrial Processes – 2013 Highlights. [en línea]. International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, 2013. [Consulta: 06-Sep.-2017]. Disponible en: http://task49.iea-shc.org/

[3] Ministerio de Energia (MINENERGIA). Sistemas Solares Térmicos II. [en línea]. Ministerio de Energia, 2010. [Consulta: 06-Sep.-2017]. Disponible en: http://www.minenergia.cl/sst/?wpdmpro=sistemas-solares-termicos-ii

[4] Ministerio de Trabajo. NTP 524: Primeros auxilios: quemaduras. [en línea] Instituto Nacional de Seguridad, Salud y Bienestar en el Trabajo, 1999. [Consulta: 06-Sep.-2017]. Disponible en: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/501a600/ntp_524.pdf

[5] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). Guía Técnica de Agua Caliente Sanitaria Central. [en línea] Reglamento de Instalaciones Térmicas en los edificios (RITE), 2010. [Consulta: 06-Sep.-2017]. Disponible en:

[6] TRNSYS 17 Documentation. Volume 8 - Weather Data. [en línea]. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2011. [Consulta: 06-Sep.-2017]. Disponible en: http://sel.me.wisc.edu/trnsys

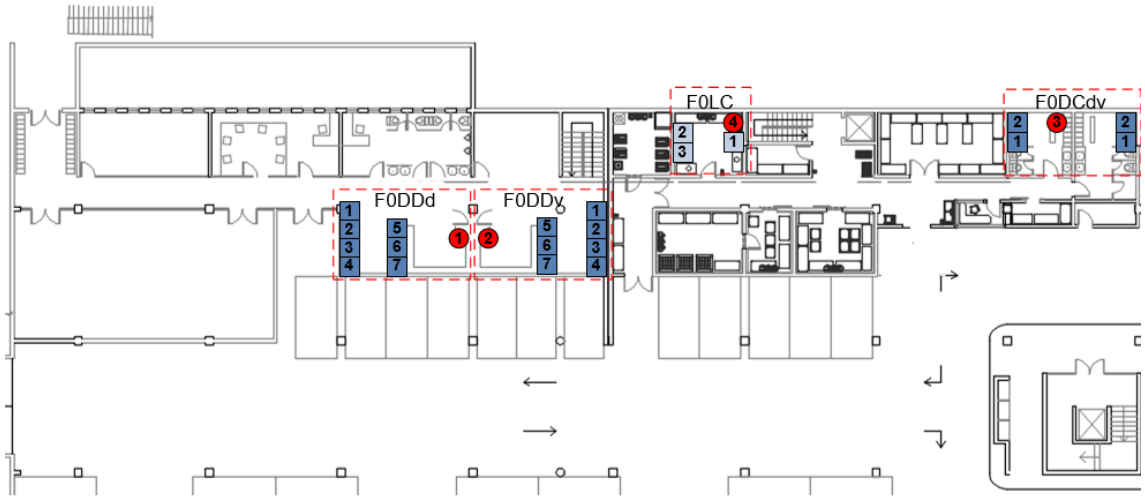
[7] TRNSYS 17 Documentation. Volume 4 - Mathematical Reference. [en línea]. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2014. [Consulta: 06-Sep.-2017]. Disponible en: http://sel.me.wisc.edu/trnsys

[8] Ministerio de Energia (MINENERGIA). Ficha Técnica de Diseño e Instalación - Sistema Solar Térmico Forzado Para Viviendas Unifamiliares. [en línea]., Ministerio de Energia, Programa Solar, 2009. [Consulta: 06-Sep.-2017]. Disponible en: http://www.programasolar.cl/images/pdfs/sistema_solar_termico_forzado.pdf

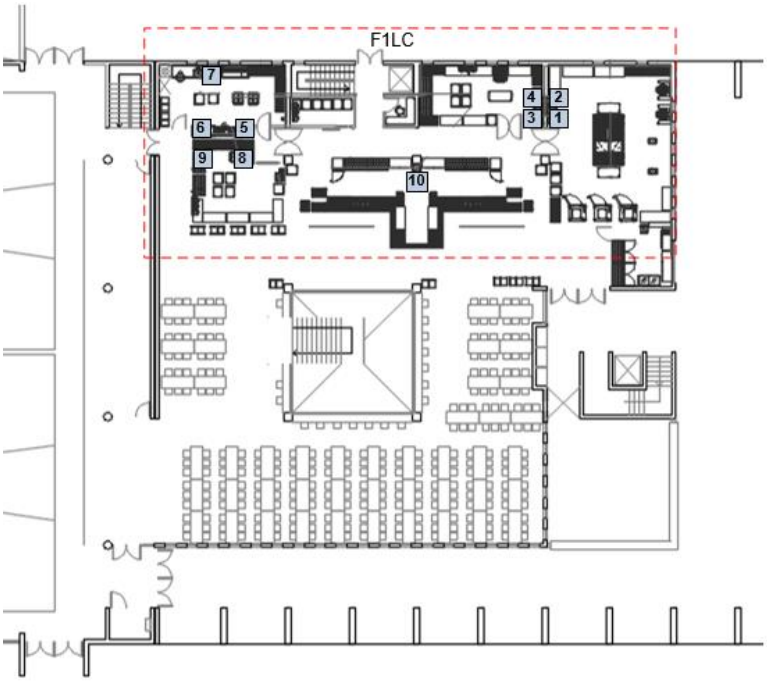
Anexo

Anexo A

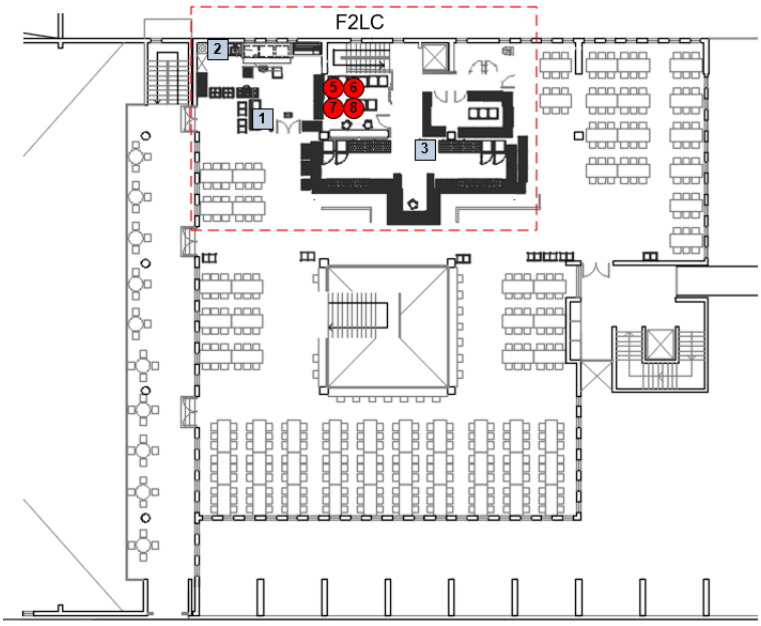
Edificio F nivel 0



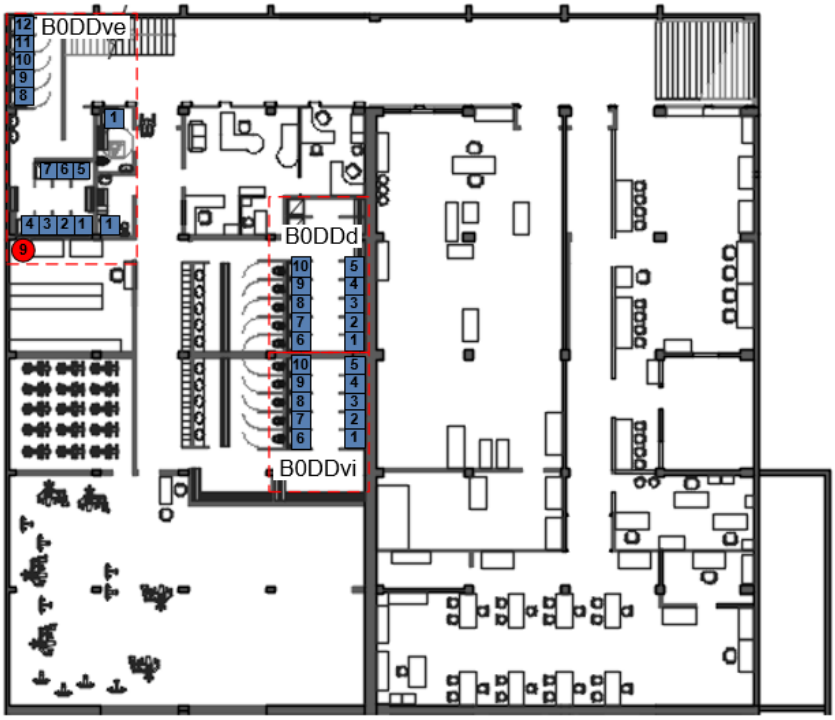
Edificio F nivel 1



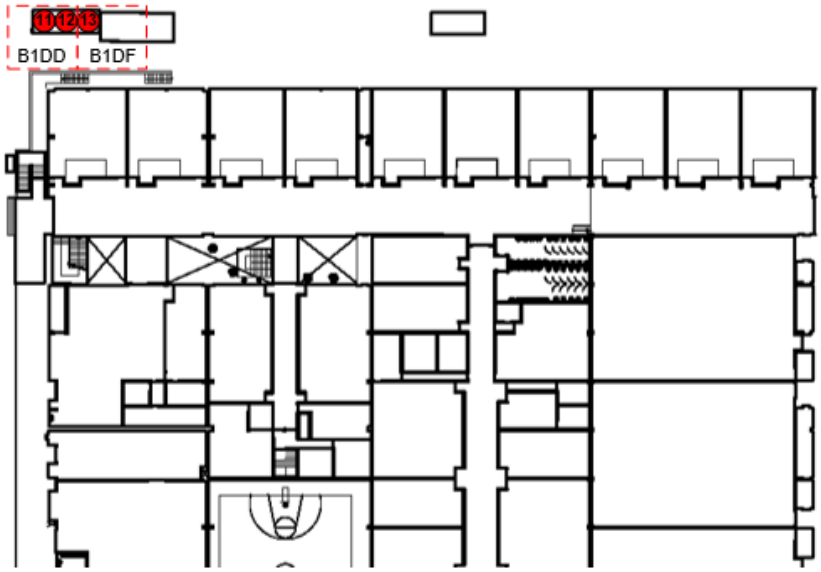
Edificio F nivel 2



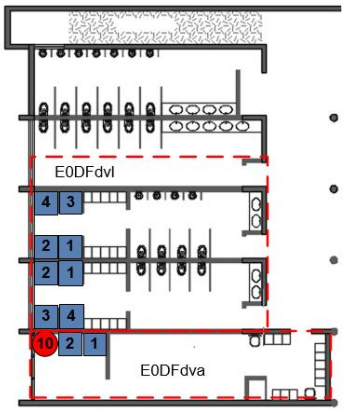
Edificio B nivel 0



Edificio B nivel 1



Edificio E nivel 0



Anexo B

Perfil diario de demanda de ACS del Defider

Horas	N_per [per]	C [l/per]	U [-]	C_ACS(T_utilización) [l/h]	C_ACS(60°) [l/h]	C_ACS(60°) [l/dia]
8:00-9:00	5	24	0,8	96	48	5960
9:00-10:00	45,2	24	0,8	868	434	
10:00-11:00	35	24	0,8	672	336	
11:00-12:00	67,4	24	0,8	1294	647	
12:00-13:00	35	24	0,8	672	336	
13:00-14:00	94	24	0,8	1805	902	
14:00-15:00	38	24	0,8	730	365	
15:00-16:00	75	24	0,8	1440	720	
16:00-17:00	35	24	0,8	672	336	
17:00-18:00	54,8	24	0,8	1052	526	
18:00-19:00	35,2	24	0,8	676	338	
19:00-20:00	13	24	0,8	250	125	
20:00-21:00	40	24	0,8	768	384	
21:00-22:00	48,2	24	0,8	925	463	

Perfil diario de demanda de ACS del Casino

Horas	N_per [per]	C [l/per]	U [-]	C_ACS(T_utilización) [l/h]	C_ACS(60°) [l/h]	C_ACS(60°) [l/dia]
8:00-9:00	22	24	0,2	106	53	3650
9:00-10:00	0	0	0	0	0	
10:00-11:00	0	0	0	0	0	
11:00-12:00	0	0	0	0	0	
12:00-13:00	0	0	0	0	0	
13:00-14:00	292	6	1	1753	1182	
14:00-15:00	292	6	1	1753	1182	
15:00-16:00	292	6	1	1753	1182	
16:00-17:00	0	0	1	0	0	
17:00-18:00	22	24	0,2	106	53	
18:00-19:00	0	0	0	0	0	
19:00-20:00	0	0	0	0	0	
20:00-21:00	0	0	0	0	0	
21:00-22:00	0	0	0	0	0	

Perfil diario de demanda de ACS de los Funcionarios

Horas	N_per [per]	C [l/per]	U [-]	C_ACS(T_utilización) [l/h]	C_ACS(60°) [l/h]	C_ACS(60°) [l/dia]
8:00-9:00	0	24	0,2	0	0	142
9:00-10:00	0	24	0,2	0	0	
10:00-11:00	0	24	0,2	0	0	
11:00-12:00	0	24	0,2	0	0	
12:00-13:00	0	24	0,2	0	0	
13:00-14:00	17	24	0,2	82	41	
14:00-15:00	0	24	0,2	0	0	
15:00-16:00	0	24	0,2	0	0	
16:00-17:00	25	24	0,2	120	60	
17:00-18:00	0	24	0,2	0	0	
18:00-19:00	0	24	0,2	0	0	
19:00-20:00	0	24	0,2	0	0	
20:00-21:00	0	24	0,2	0	0	
21:00-22:00	17	24	0,2	82	41	

Anexo C

Los paneles solares importados y fabricados en chile deben cumplir con los ensayos y procedimientos establecidos por las normas europeas UNE EN 12975-1 2006 y UNE EN 12975-2 2006 para optar a subsidios o franquicie tributarias. Además, esta norma establece que los coeficientes se deben obtener en función de la temperatura de entrada y de salida del colector (ΔT_p). Donde dependiendo de la normativa estos coeficientes se puede obtener en función de la diferencia de temperatura de entrada del colector (ΔT_e) o de la diferencia de temperatura de salida del colector (ΔT_s).

$$\Delta T_p = T_{promedio} - T_{ambiente} \quad \text{- 0.1}$$

$$\Delta T_s = T_{salida\ caliente} - T_{ambiente} \quad \text{- 0.2}$$

Como el modelo utilizado para determinar el flujo de calor útil en la Ecuación - 6.41 o en la Ecuación - 6.42 usa la diferencia de temperatura de entrada, la que corresponde a la normativa de estados unidos, se deben corregir los coeficientes con las siguientes ecuaciones:

$$a_0 = a_0|_{\Delta T_p} * \left(\frac{\dot{m}_{test} * Cp_f}{\dot{m}_{test} * Cp_f + \frac{a_1'|_{\Delta T_p}}{2}} \right) \quad [-] \quad \text{- 0.3}$$

$$a_1' = a_1'|_{\Delta T_p} * \left(\frac{\dot{m}_{test} * Cp_f}{\dot{m}_{test} * Cp_f + \frac{a_1'|_{\Delta T_p}}{2}} \right) \quad [kJ/(hr * m^2 * K)] \quad \text{- 0.4}$$

Anexo D

Instalación Distribuida Auxiliar de Respaldo Sin Válvulas Mezcladoras Termostáticas

Equipo	Proveedor	Modelo	Costo [CLP]	Numero [-]	Características	
Termo eléctrico	Winter	U-TEEG-PT54	$ 1.724.879	2	700 [l]	9 [kW]
			$ 3.449.758			

Costos totales de la instalación

Ítem	Costo [CLP]	Porcentaje [%]
Termos eléctricos	$3.449.758	87
Instalación	$ 517.464	13
	$3.967.221	100

Instalación Distribuida Auxiliar de Respaldo Con Válvulas Mezcladoras Termostáticas

Equipo	Proveedor	Modelo	Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Termo eléctrico	Winter	U-TEEG-PT54	$ 1.724.879	2	700 [l]	9 [kW]
Válvula mescladora	Winter	3/4	$ 44.403	7	20 [mm]	
			$ 3.760.579			

Costos totales de la instalación

Ítem	Costo [CLP]	Porcentaje [%]
Termos eléctricos	$3.449.758	80
Válvula mescladora Termostática	$ 310.821	7
Instalación	$ 564.087	13
	$4.324.665	100

Instalación Centralizada Termo Solar Dimensionamiento Inicial

Circuito de Consumo

Equipo	Proveedor	Modelo	Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Tuberías Consumo	Winter	3/4	$ 40.243	24	6 [m]	20 [mm]
Aislación Tuberías	Winter	3/4	$ 1.251	71	2 [m]	20 [mm]
			$ 1.054.688			

Circuito Primario

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Colector plano	Bosch	Bosch FCC220 2V	$	193.732	28	2 [m]	6 [bar]
Estructura	Bosch		$	88.392	28	por colector	
Válvula equilibradora	Cosmo plas	CALEFFI 191959	$	180.841	4	20 [mm]	
Válvula manual	Winter	3/4	$	4.206	12	20 [mm]	
Válvula de seguridad	Winter	3/4	$	18.698	4	20 [mm]	
Purgador automático	Winter	1/4	$	2.705	4	8 [mm]	
Tuberías	Winter	3/4	$	40.243	7	6 [m]	20 [mm]
Aislación Tuberías	Winter	3/4	$	1.857	20	2 [m]	20 [mm]
Anticongelante	Winter	Propilenglicol	$	58.679	1	10 [l]	
			$	9.136.440			

Intercambiador de Calor

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Intercambiador de calor	Winter	ZB500-24	$	279.150	1	24 [placas]	
Válvula manual	Winter	3/4	$	4.206	8	20 [mm]	
			$	312.799			

Circuito Secundario

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Estanque Central	Winter	TESG0068	$	4.770.597	1	4000 [l]	
Válvula manual	Winter	3/4	$	4.206	4	20 [mm]	
Tuberías	Winter	3/4	$	40.243	2	6 [m]	20 [mm]
Aislación Tuberías	Winter	3/4	$	1.251	4	2 [m]	20 [mm]
Filtro	Winter	3/4	$	3.415	1		
			$	4.876.329			

Sistema de Impulsión

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Sistema de Control	Winter	RTC 31	$	59.637	1		
Bombas de circulación	Winter	LRP25 80/180 1	$	67.791	4	3120 [kg/hr]	5,5 [m]
Valvula antirretorno	Winter	3/4	$	4.053	8	20 [mm]	
Manometro	Winter	NINGBO 1/4	$	2.018	2	8 [mm]	
Válvula manual	Winter	3/4	$	4.206	12	20 [mm]	
			$	417.733			

Sistema de Seguridad

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Vaso expansor 1	Winter	EZL-35	$	42.563	1	35 [l]	
Vaso expansor 2	Winter	EZL-300	$	233.114	1	300 [l]	
Vaso expansor C	Winter	EZL-600	$	436.443	1	600 [l]	
Manometro	Winter	NINGBO 1/4	$	2.018	3	8 [mm]	
Válvula de seguridad	Winter	3/4	$	18.698	3	20 [mm]	
			$	774.268			

Costos totales de la instalación

Ítem	Costo [CLP]	Porcentaje [%]
Colectores Planos	$ 5.424.496	28
Estanque Central	$ 4.770.597	25
Estructura Colectores	$ 2.474.976	13
Tuberías	$ 1.517.701	8
Vaso Expansor	$ 712.120	4
Válvulas	$ 1.052.327	6
Intercambiador de Calor	$ 279.150	1
Bombas de Circulación	$ 271.163	1
Control y Medición	$ 69.729	0
Instalación	$ 2.485.839	13
	$19.058.096	100

Instalación Centralizada Termo Solar Simulación Final

Circuito de Consumo

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Tuberías Consumo	Winter	3/4	$	40.243	24	6 [m]	20 [mm]
Aislación Tuberías	Winter	3/4	$	1.251	71	2 [m]	20 [mm]
			$	1.054.688			

Circuito Primario

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Colector plano	Bosch	Bosch FCC220 2V	$	193.732	44	2 [m]	6 [bar]
Estructura	Bosch		$	88.392	44	por colector	
Válvula equilibradora	Cosmo plas	CALEFFI 191959	$	180.841	4	20 [mm]	
Válvula manual	Winter	3/4	$	4.206	12	20 [mm]	
Válvula de seguridad	Winter	3/4	$	18.698	4	20 [mm]	
Purgador automático	Winter	1/4	$	2.705	4	8 [mm]	
Tuberías	Winter	3/4	$	40.243	8	6 [m]	20 [mm]
Aislación Tuberías	Winter	3/4	$	1.857	23	2 [m]	20 [mm]
Anticongelante	Winter	Propilenglicol	$	58.679	1	10 [l]	
			$	13.696.238			

Intercambiador de Calor

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Intercambiador de calor	Winter	ZB500-24	$	279.150	1	24 [placas]	
Válvula manual	Winter	3/4	$	4.206	8	20 [mm]	
			$	312.799			

Circuito Secundario

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Estanque Central	Winter	TESG0068	$	1.749.301	1	1000 [l]	
Válvula manual	Winter	3/4	$	4.206	4	20 [mm]	
Tuberías	Winter	3/4	$	40.243	2	6 [m]	20 [mm]
Aislación Tuberías	Winter	3/4	$	1.251	4	2 [m]	20 [mm]
Filtro	Winter	3/4	$	3.415	1		
			$	1.855.033			

Sistema de Impulsión

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Sistema de Control	Winter	RTC 31	$	59.637	1		
Bombas de circulación	Winter	LRP25 80/180 1	$	67.791	4	3120 [kg/hr]	5,5 [m]
Valvula antirretorno	Winter	3/4	$	4.053	8	20 [mm]	
Manometro	Winter	NINGBO 1/4	$	2.018	2	8 [mm]	
Válvula manual	Winter	3/4	$	4.206	12	20 [mm]	
			$	417.733			

Sistema de Seguridad

Equipo	Proveedor	Modelo		Costo [CLP]	Numero [-]	Característica	
Vaso expansor 1	Winter	EZL-35	$	42.563	1	35 [l]	
Vaso expansor 2	Winter	EZL-300	$	233.114	1	300 [l]	
Vaso expansor C	Winter	EZL-600	$	436.443	1	600 [l]	
Manometro	Winter	NINGBO 1/4	$	2.018	3	8 [mm]	
Válvula de seguridad	Winter	3/4	$	18.698	3	20 [mm]	
			$	774.268			

Costos totales de la instalación

Ítem	Costo [CLP]	Porcentaje [%]
Colectores Planos	$ 8.524.208	41
Estanque Central	$ 1.749.301	8
Estructura Colectores	$ 3.889.248	19
Tuberías	$ 1.517.701	7
Vaso Expansor	$ 712.120	3
Válvulas	$ 1.052.327	5
Intercambiador de Calor	$ 279.150	1
Bombas de Circulación	$ 271.163	1
Control y Medición	$ 69.729	0
Instalación	$ 2.709.742	13
	$20.774.688	100

Anexo E

Demanda de Energía

Mes del Año [mes]	Dias del Mes [día]	Demanda Mensual [kJ/mes]	Demanda Diaria Promedio [MJ/dia]	Consumo de Agua [l/dia]
ene	31	4231888	137	1419
feb	28	2659142	95	988
mar	31	28345240	914	9508
abr	30	31827583	1061	11032
may	31	32008704	1033	10737
jun	30	37485348	1250	12993
jul	31	16460610	531	5521
ago	31	33697697	1087	11303
sep	30	29141791	971	10101
oct	31	28095086	906	9424
nov	30	34075761	1136	11811
dic	31	13931977	449	4673
		3035886	99509	1034723

Datos del proyecto

Datos			
Comuna		291 San Joaquin	
latitud sur media	[°]	-33	
beta	[°]	33	(inclinacion del panel)
reflectividad	[-]	0,1	(supuesto)

Radiación

Mes del Año	Dias del Mes [dias]	Radiacion Horizontal [Kwh/m2]	Het	Kt	Hd/Ht
ene	31	253	43,10	0,682	0,230
feb	28	203	39,20	0,666	0,243
mar	31	176	33,30	0,614	0,283
abr	30	116	26,00	0,535	0,342
may	31	79	20,00	0,459	0,406
jun	30	60	17,30	0,416	0,448
jul	31	73	18,40	0,461	0,405
ago	31	98	23,30	0,488	0,380
sep	30	132	30,20	0,525	0,351
oct	31	188	37,00	0,590	0,301
nov	30	230	41,90	0,659	0,249
dic	31	258	44,00	0,681	0,231

Mes del Año	Dias del Mes [dias]			Declinacion	cos^(-1)(tan…	h′ss	hss	Rb
ene	31	17	17	-20,92	90	90	104,4	0,839
feb	28	16	47	-12,95	90	90	98,6	0,957
mar	31	16	75	-2,42	90	90	91,6	1,143
abr	30	15	105	9,41	90	84	83,8	1,425
may	31	15	135	18,79	90	77	77,2	1,760
jun	30	11	162	23,09	90	74	73,9	1,975
jul	31	17	198	21,18	90	75	75,4	1,873
ago	31	16	228	13,45	90	81	81,1	1,552
sep	30	15	258	2,22	90	89	88,6	1,241
oct	31	15	288	-9,60	90	90	96,3	1,012
nov	30	14	318	-18,91	90	90	102,9	0,868
dic	31	10	344	-23,05	90	90	106,0	0,810

Mes del Año	Hd/Ht 0 0	Rb 0 0	R
ene	0,230	0,839	0,866
feb	0,243	0,957	0,956
mar	0,283	1,143	1,088
abr	0,342	1,425	1,260
may	0,406	1,760	1,427
jun	0,448	1,975	1,510
jul	0,405	1,873	1,495
ago	0,380	1,552	1,320
sep	0,351	1,241	1,136
oct	0,301	1,012	0,992
nov	0,249	0,868	0,889
dic	0,231	0,810	0,843

Mes del Año	Dias del Mes [dias]	Radiacion Horizontal [Kwh/m2]	R 0 0	Hti [MJ/m2]
ene	31	253,000	0,866	25,435
feb	28	203,000	0,956	24,951
mar	31	176,000	1,088	22,229
abr	30	116,000	1,260	17,541
may	31	79,000	1,427	13,087
jun	30	60,000	1,510	10,874
jul	31	73,000	1,495	12,677
ago	31	98,000	1,320	15,020
sep	30	132,000	1,136	17,998
oct	31	188,000	0,992	21,658
nov	30	230,000	0,889	24,523
dic	31	258,000	0,843	25,261

Datos del Colector

Datos tecnicos

Fr U	[W/m2 ºC]	4,083
Fr T	[-]	0,761
Fr'/Fr	[-]	0,95
(/alpha/theta)n	[-]	0,94
Estanque	[l/m^2]	85
tem ref	[°C]	100
Vol ref	[l/m^2]	75
Area de colección	[m2]	210

Fracción Solar

Mes del Año	Temperatura Ambiente t°	Delta de Tiempo [s]	Demanda Real [Mj]	X	Xc
ene	21,20	2678400	4232	40,62	39,37
feb	18,20	2419200	2659	60,62	58,75
mar	18,20	2678400	28345	6,30	6,10
abr	14,20	2592000	31828	5,69	5,52
may	11,10	2678400	32009	6,06	5,87
jun	8,20	2592000	37485	5,17	5,01
jul	8,20	2678400	16461	12,17	11,79
ago	10,20	2678400	33698	5,81	5,63
sep	12,10	2592000	29142	6,37	6,17
oct	15,10	2678400	28095	6,59	6,39
nov	18,10	2592000	34076	5,07	4,92
dic	20,90	2678400	14596	11,82	11,46

Mes del Año	Dias del Mes [dias]	Demanda Real [Mj]	Hti 0 [MJ/m2]	Y
ene	31	4232	25,4	26,6
feb	28	2659	25,0	37,5
mar	31	28345	22,2	3,5
abr	30	31828	17,5	2,4
may	31	32009	13,1	1,8
jun	30	37485	10,9	1,2
jul	31	16461	12,7	3,4
ago	31	33698	15,0	2,0
sep	30	29142	18,0	2,6
oct	31	28095	21,7	3,4
nov	30	34076	24,5	3,1
dic	31	14596	25,3	7,7

Mes del Año	X 0 0	Y 0 0	f	Demanda Real MJ	f*L	F	%
ene	40,62	26,59	1,0	4232	4232	0,930612	93,06
feb	60,62	37,49	1,0	2659	2659		
mar	6,30	3,47	1,0	28345	28345		
abr	5,69	2,36	1,0	31828	31828		
may	6,06	1,81	0,9	32009	27500		
jun	5,17	1,24	0,7	37485	24489		
jul	12,17	3,41	1,0	16461	16260		
ago	5,81	1,97	0,9	33698	31145		
sep	6,37	2,64	1,0	29142	29142		
oct	6,59	3,41	1,0	28095	28095		
nov	5,07	3,08	1,0	34076	34076		
dic	11,82	7,66	1,0	13932	13932		
				291961	271702		

Area de Colección [m2]	Fracción Solar [-]						
0,93	75	48	0,459	102	0,744	158	0,877
2	0,028	50	0,472	104	0,752	160	0,880
4	0,055	52	0,485	106	0,760	162	0,883
6	0,081	54	0,498	108	0,768	164	0,886
8	0,105	56	0,510	110	0,776	166	0,889
10	0,129	58	0,523	112	0,783	168	0,892
12	0,150	60	0,535	114	0,789	170	0,895
14	0,171	62	0,547	116	0,795	172	0,897
16	0,191	64	0,558	118	0,801	174	0,899
18	0,210	66	0,570	120	0,806	176	0,902
20	0,229	68	0,581	122	0,811	178	0,904
22	0,247	70	0,592	124	0,815	180	0,906
24	0,266	72	0,603	126	0,819	182	0,908
26	0,284	74	0,614	128	0,824	184	0,910
28	0,301	76	0,624	130	0,828	186	0,912
30	0,318	78	0,635	132	0,832	188	0,914
32	0,335	80	0,645	134	0,835	190	0,916
34	0,352	82	0,655	136	0,839	192	0,918
36	0,368	84	0,665	138	0,843	194	0,919
38	0,384	86	0,674	140	0,847	196	0,921
40	0,400	88	0,684	142	0,850	198	0,922
42	0,415	90	0,693	144	0,854	200	0,924
44	0,430	92	0,702	146	0,858	202	0,925
46	0,445	94	0,711	150	0,864	204	0,926
		96	0,719	152	0,868	206	0,928
		98	0,728	154	0,871	208	0,929
		100	0,736	156	0,874	210	0,931

Análisis Económicos

Datos economicos

Precio Energia 1	[Clp/kWh]	74,5
Tasa aumento E 1	[%]	0%
Vida del proyecto	[años}	20
Costos x area colec	$clp/[m²].	$ 200.000
Costos de independientes	[$clp]	$ 5.000.000
Costo instalación	[%]	15%
Tasa de descuento	[%]	8%
Costo de mantencion	[%]	0%
Costo residual	[%]	0%

Mes del Año	Dias del Mes [dias]	Demanda Real [MJ/dia]	Precio de E Requerida [$clp]
ene	31	137	$ 87.577
feb	28	95	$ 55.029
mar	31	914	$ 586.589
abr	30	1061	$ 658.654
may	31	1033	$ 662.402
jun	30	1250	$ 775.738
jul	31	531	$ 340.643
ago	31	1087	$ 697.355
sep	30	971	$ 603.073
oct	31	906	$ 581.412
nov	30	1136	$ 705.179
dic	31	449	$ 288.315
			$ 6.041.967