



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

**SIMULACIÓN Y ANÁLISIS TÉRMICO DE SISTEMA SOLAR DE
COLECTORES PLANOS DE GRAN SUPERFICIE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FELIPE IGNACIO CUEVAS GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:

ROBERTO ROMÁN LATORRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RAMÓN FREDERICK GONZALEZ

ALVARO VALENCIA MUSALEM

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL 2008

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: FELIPE CUEVAS GONZÁLEZ
FECHA: 22/04/2008
PROF. GUÍA: Sr. ROBERTO ROMAN

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS TÉRMICO DE SISTEMA SOLAR DE COLECTORES PLANOS DE GRAN SUPERFICIE

En una importante empresa dedicada a la exportación de carne de cerdo, existe una instalación de energía solar como apoyo a la calefacción de los lechones. Los lechones requieren de cuidados especiales para crecer, siendo uno de los cuidados más importantes la temperatura del medio y la temperatura del punto de contacto del lechón con el suelo. Las temperaturas requeridas en este caso varían entre 37 y 42 [°C], siendo la más alta al momento en el que nacen. Dadas estas temperaturas, se establecen los principales parámetros de diseño que debe cumplir el sistema de calefacción utilizado.

En general, se ocupan calderas que consumen gas licuado, pero en este caso se instaló como apoyo un sistema solar térmico de circulación forzada con 254 colectores solares planos, logrando un área de captación de 645 [m²] aproximadamente y una capacidad de acumulación de 30000 [lt]. Desde que se concibió el sistema solar, presentó problemas en su funcionamiento, no logrando las temperaturas requeridas por los lechones. Dado esto los dueños del criadero han optado por dejar sin funcionamiento el sistema solar y ocupar solamente las calderas, luego se debe realizar un análisis que permita detectar las fallas y realizar propuestas para mejorar el sistema.

Para abordar el problema, se realiza un profundo análisis de los posibles problemas existentes. El análisis se realiza a través de simulaciones computacionales que permitan ver el comportamiento térmico del sistema solar, se analiza en profundidad el circuito de acumulación existente y se compara con una configuración de estanques en paralelo. Una vez que se analiza la forma de acumular, se simula la distribución de energía, de tal forma de detectar los posibles problemas térmicos.

Por otra parte, se realiza un análisis basado en el juicio técnico sobre la concepción del sistema solar, de esta manera se detectan problemas de diseño que pueden afectar el comportamiento general de la instalación.

Dadas las condiciones de trabajo que se tienen, se observa que la configuración de estanques en paralelo es más eficiente durante el año, lo cual complementado con una lógica de control que entregue la energía de manera directa, se logra de manera eficiente la energía solar disponible.

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar una etapa tan importante en la vida, no puedo dejar de agradecer a mi familia, la cual me ha facilitado los medios necesarios para tener una educación de primer nivel, por apoyarme en los momentos difíciles de la carrera y por destacar los logros alcanzados.

Al profesor Roberto Román, por sus constantes recomendaciones, su buena disposición para aclarar dudas y por su vocación a investigar las energías alternativas, lo cual ha sido una gran motivación para estudiar el tema.

Al profesor Ramón Frederick y al profesor Alvaro Valencia, por haber aceptado ser miembros de la comisión y por los aportes realizados a este trabajo.

A mis amigos, por los buenos momentos que hemos pasado y por la confianza que han tenido en mí.

A todos los que han tenido un aporte directo o indirecto a la culminación de este trabajo.

Sinceros agradecimientos a todos, de corazón.

Índice General

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Índice de cuadros | III |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Objetivos | 3 |
| 2.1. Objetivo general | 3 |
| 2.2. Objetivos específicos | 3 |
| 2.3. Alcances | 4 |
| 3. Antecedentes | 5 |
| 3.1. Aspectos básicos en instalaciones solares de gran magnitud | 5 |
| 3.1.1. Componentes | 5 |
| 3.1.2. Lógica de control | 18 |
| 3.1.3. Sistema de acumulación | 19 |
| 3.1.4. Válvulas | 20 |
| 3.1.5. Dimensionamiento de la instalación | 22 |
| 3.2. Descripción de criaderos de cerdos | 22 |
| 3.3. Descripción del circuito de calefacción con calderas | 26 |
| 3.4. Descripción del sistema solar | 28 |
| 3.4.1. Circuito primario | 28 |
| 3.4.2. Circuito secundario | 30 |
| 3.4.3. Circuito de calefacción solar | 33 |
| 4. Simulaciones | 40 |
| 4.1. Circuito primario con circuito de acumulación del secundario, estanques conectados en cascada térmica | 40 |
| 4.2. Circuito primario con circuito de acumulación del secundario, estanques conectados en paralelo | 51 |
| 4.3. Circuito primario con totalidad del circuito secundario, estanques conectados en cascada térmica | 60 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4. Circuito primario con totalidad del circuito secundario, estanques conectados en paralelo . . . | 62 |
| 4.5. Intervención del sistema solar | 64 |
| 5. Análisis de resultados | 68 |
| 5.1. Tiempos de respuesta | 68 |
| 5.2. Energía acumulada | 69 |
| 5.3. Utilizabilidad del sistema solar | 71 |
| 5.4. Distribución de energía | 74 |
| 5.5. Circuito de calefacción solar | 75 |
| 6. Análisis conceptual del sistema solar y propuestas | 76 |
| 6.1. Fallas conceptuales | 76 |
| 6.2. Fallas de diseño | 78 |
| 6.3. Fallas operacionales | 80 |
| 7. Conclusiones | 82 |
| 7.1. Conclusiones generales | 82 |
| 7.2. Conclusiones específicas | 83 |
| 7.3. Recomendaciones | 83 |
| A. Implementación de simulaciones | 85 |
| A.1. Circuito primario | 85 |
| A.2. Circuito de acumulación del secundario | 87 |
| A.3. Circuito primario con totalidad del circuito secundario, estanques conectados en cascada térmica | 91 |
| B. Tablas de radiación y temperatura | 93 |
| C. Características de los componentes | 95 |
| C.1. Colector Solar | 95 |
| C.2. Bombas de circulación e intercambiadores de calor | 96 |
| D. Programa Simusol | 97 |
| E. Balance térmico de colectores solares planos | 101 |
| F. Estagnación de colectores solares planos | 104 |
| Bibliografía | 105 |

Índice de cuadros

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Tabla de temperaturas según días de vida, Fuente [15]. | 25 |
| 3.2. Energía promedio diaria entregada por las calderas, Fuente [15]. | 27 |
| 5.1. Tiempos de respuesta | 68 |
| 5.2. Energía acumulada. | 69 |
| 5.3. Energía acumulada real. | 71 |
| 5.4. Utilizabilidad del sistema solar | 72 |
| 5.5. Temperaturas intercambiador de calor secundario. | 74 |
| B.1. Temperaturas promedio de en un día de Marzo, Junio y Diciembre. Localidad: Tantehue VI Región de Chile | 93 |
| B.2. Radiación promedio de en un día de Marzo, Junio y Diciembre, plano inclinado de 17 °. Localidad: Tantehue VI Región de Chile | 94 |
| C.1. Características de las bombas de circulación. | 96 |
| C.2. Características de los intercambiadores de calor. | 96 |

Capítulo 1

Introducción

Chile desde el año 2002 vive una crisis energética en crecimiento. El crecimiento del país inevitablemente conlleva a mayores demandas energéticas, lo que en una industria puede llegar a marcar la diferencia en el costo final del producto que produce.

Este es el caso de una empresa productora de carne de cerdo, la cual gran parte de los gastos que debe realizar recaen en la crianza del cerdo, lo que se traduce en infraestructura, alimento y cuidados para mantenerlo saludable. Dentro de los cuidados que se le realiza al cerdo, se destaca el aporte que se le debe realizar en calefacción, ya que el cerdo debe crecer en un ambiente propicio para cumplir con los exigentes estándares internacionales de exportación.

La calefacción abarca 2 puntos, el ambiente y el punto de contacto del cerdo con el suelo. En el segundo caso, el cerdo crece sobre una especie de losa radiante, de ahora en adelante, los calefactores. En general, en el resto de las instalaciones existentes, la calefacción funciona con calderas que consumen gas licuado, pero en la construcción de este grupo, en el año 2004, se decidió instalar las calderas con apoyo de energía solar, luego se instala un sistema solar térmico de circulación forzada con 254 colectores solares planos, logrando un área efectiva de captación de $645 [m^2]$ y una capacidad de acumulación de 30000 [It].

Desde que se instaló el sistema de calefacción con apoyo de energía solar, se han producido grandes ahorros monetarios por la disminución en el consumo de gas licuado, pero el sistema solar siempre presentó problemas, por lo que en el último tiempo los dueños del criadero optaron por no ocuparlo, luego para mantener la calefacción, se ocupa sólo el sistema de calderas.

Dados los problemas existentes, en esta memoria se busca abordar el tema desde un punto de vista conceptual, por lo que a través de simulaciones computacionales se refleja el funcionamiento térmico del sistema solar, luego se analizan las posibles causas que hacen que la instalación solar no funcione de manera correcta y se plantean soluciones. Junto con este análisis, se realiza un estudio del correcto diseño de una instalación solar térmica de gran superficie, con lo cual se pueden detectar problemas de diseño. Una vez recopilados los antecedentes y realizados los análisis, se procede a proponer soluciones que permitan funcionar que el

sistema solar funciona de manera normal.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo general de esta memoria consiste en realizar una simulación computacional de una instalación de energía solar térmica de colectores de gran superficie. Actualmente la instalación funciona ineficientemente, luego se busca mostrar gráficamente el comportamiento térmico del sistema instalado, lo cual se ocupa de referencia para el posterior análisis de las modificaciones.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos están enfocados al análisis de las causas que probablemente hacen que el sistema solar funcione de manera ineficiente y al análisis de nuevas propuestas que busquen mejorar estas falencias. A continuación se detallan los componentes a abordar.

- Analizar el comportamiento térmico de la acumulación del sistema. Planteamiento de nuevas configuraciones de acumulación. En la actualidad, la acumulación del sistema solar se compone de 3 estanques de 10000 [It] cada uno, los cuales se conectan en cascada térmica, luego se analiza el comportamiento térmico de esta configuración durante 3 días representativos del año y luego se compara con una configuración de estanques conectados en paralelo.
- Análisis de la distribución de la energía acumulada. Una vez analizada la acumulación del sistema solar, se analiza la forma en que se distribuye la energía y se plantea una configuración tal que no afecte el sistema de calefacción que normalmente se ha utilizado.
- Análisis técnico-operativo de la instalación actual. Muchos de los problemas existen desde la concepción de la instalación y existen problemas debido a la forma en que se utiliza el sistema solar, luego se realiza un análisis y se proponen soluciones basadas en el juicio experto.

2.3. Alcances

El alcance de esta memoria es a nivel conceptual, es decir, todas las propuestas no deben ser implementadas en el sistema que está originalmente instalado para probar sus efectos reales, sino que se ocupan programas computacionales para comparar resultados.

El análisis incluye preferencialmente el sistema solar, por lo cual el sistema que usualmente se ocupa para calefaccionar será analizado en detalle para conocer su funcionamiento, pero no se proponen modificaciones al mismo. Más adelante, en los antecedentes, se hace énfasis en destacar hasta que punto de la instalación se considera como parte del sistema solar.

Capítulo 3

Antecedentes

En una importante industria exportadora de carne de cerdo del país, existe una instalación de energía solar para calentar agua. Esta instalación ha permitido ahorrar grandes cantidades de dinero, pero desde que se concibió ha tenido problemas, ya que la forma de entregar la energía está interfiriendo con el resto de los sistemas instalados. A continuación, se realiza una descripción de los puntos que se deben considerar en una instalación de energía solar, luego se dan detalles del criadero de cerdos y se hace una revisión del sistema que se encuentra instalado.

3.1. Aspectos básicos en instalaciones solares de gran magnitud

En esta sección se hace un análisis de los aspectos básicos a considerar en una instalación de energía solar térmica con colectores solares planos. El análisis es sobre un sistema indirecto de convección forzada.

3.1.1. Componentes

El sistema se compone de varios elementos, los cuales se describen a continuación.

Colector solar plano

El principal componente de la instalación es el colector solar plano, ya que es el encargado de transformar la energía solar en energía térmica. Esto se logra aprovechando el efecto invernadero producido por una superficie selectiva.

Los datos relevantes de un colector solar plano son

- Área de captación
- Caudal recomendado por el fabricante
- Factor de remoción de calor

- Factor óptico

Estos datos permiten caracterizar un colector solar plano y predecir su comportamiento durante el año dada una zona geográfica. A continuación se describen los aspectos más importantes a considerar en un colector solar.

- Rendimiento colector

El estudio del rendimiento del colector solar plano se realiza en condiciones estacionarias, existen normas bajo las cuales se realizan ensayos para obtener la curva de rendimiento.

El rendimiento del colector viene dado por

$$\eta = \frac{Pu}{A * I_g} \quad (3.1)$$

donde

- Pu es la potencia útil
- A es el área de captación del colector
- I_g es la radiación global incidente

Al realizar el balance térmico del colector [Anexo E], se llega a la siguiente expresión del rendimiento

$$\eta = F' * \tau\alpha - F' * U_L \frac{t_f - t_a}{I_g} \quad (3.2)$$

donde

- $F' * \tau\alpha$ es el factor óptico
- $F' * U_L$ es el factor de remoción de calor
- $(t_f - t_a)/I_g$ es la temperatura reducida.

Esta expresión del rendimiento es una recta con pendiente igual al factor de remoción de calor. La ecuación es válida para el caudal con el cual se realiza el ensayo, en caso de ocupar otro caudal significativamente distinto, la recta se puede ver afectada notoriamente.

En la figura 3.1 se aprecian curvas de rendimiento para distintos colectores solares.

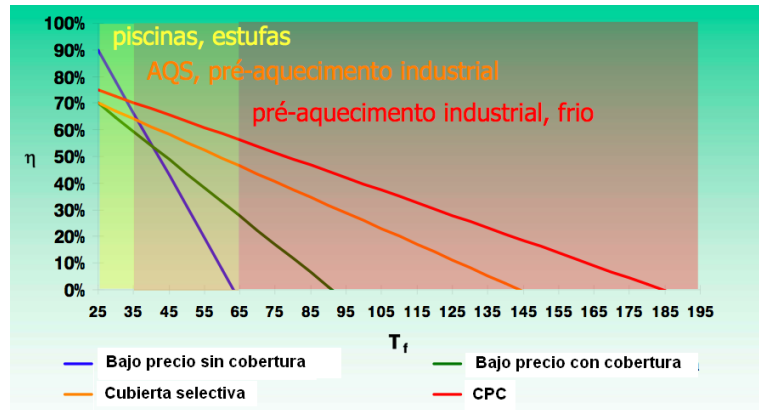


Figura 3.1: Curvas de rendimiento para distintos colectores, Fuente [13]

En la figura se observan las diferencias entre los colectores y las distintas aplicaciones en las cuales se pueden ocupar.

Para un mismo colector, la curva de rendimiento es válida para el caudal con el cual se realizó el ensayo. En la figura 3.2 se aprecia como se ve afectada la curva de rendimiento con la disminución del caudal.

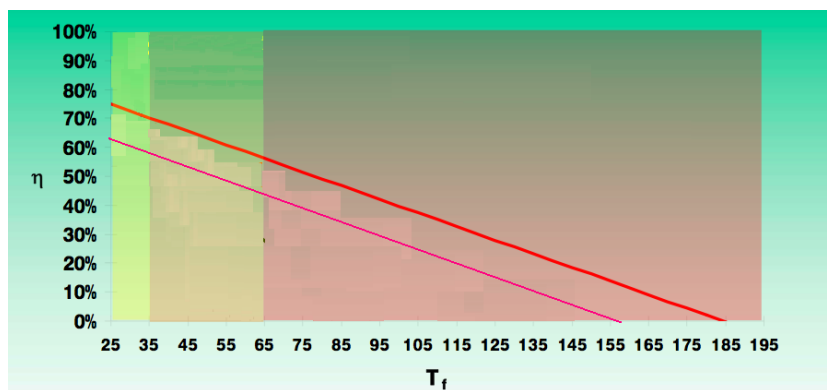


Figura 3.2: Variación de la curva de rendimiento con el caudal, Fuente [13]

Al disminuir el caudal en el colector solar, la transferencia de calor entre el fluido y la placa del colector solar empeora, luego la curva de rendimiento se desplaza a la izquierda de forma paralela, entonces se tendrá el mismo rendimiento para un ΔT menor, o con el mismo ΔT un rendimiento menor.

- Conexión entre colectores

La conexión entre colectores se puede realizar de 2 formas, en serie y en paralelo.

- Conexión en serie

La conexión en serie se aprecia en la figura 3.3

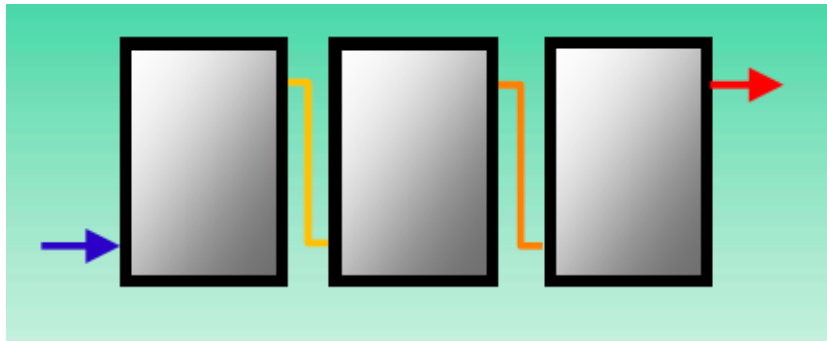


Figura 3.3: Conexión de colectores en serie, Fuente [13]

En este caso, el fluido que es precalentado en el primer colector solar, ingresa al siguiente. Dadas las características de la curva de eficiencia de un colector solar plano, se tiene que mientras menor es la diferencia entre la temperatura de ingreso y la temperatura ambiente, menor es el rendimiento del colector, luego se ocupa esta conexión en los casos en que se quiere obtener temperaturas elevadas, pero sacrificando en parte el rendimiento del sistema.

Si al realizar la conexión en serie de 2 colectores se ocupa el caudal recomendado para 1 colector, la temperatura de descarga será mayor que en el caso en que se conectan en paralelo.

- Conexión en paralelo

La conexión en paralelo se aprecia en la figura 3.4

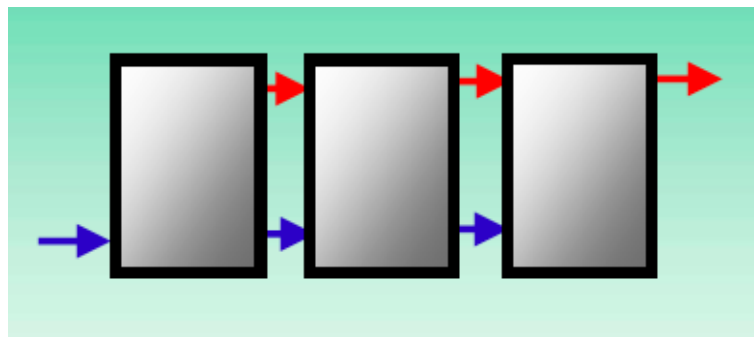


Figura 3.4: Conexión de colectores en paralelo, Fuente [13]

En este caso, el fluido que ingresa al primer colector lo hace a la misma temperatura que el fluido que ingresa al segundo colector. La unión en paralelo es simple, pero está limitada en el número de colectores que se pueden unir en paralelo. En un principio no es recomendable realizar uniones directas de más de 4 colectores, ya que se tienen problemas de presión en los colectores que se ubican en medio, pero la cantidad de colectores que se pueden unir en paralelo depende

principalmente de sus características.

- **Orientación e inclinación de los colectores**

La orientación de los colectores determina la cantidad de radiación solar aprovechable. Esta cantidad es maximizada orientando los colectores hacia el norte geográfico.

El norte geográfico está ubicado 4° a la derecha del norte magnético.

Dado que la altura solar varía durante el año, la inclinación óptima del colector también varía. Esto se puede apreciar en la figura 3.5

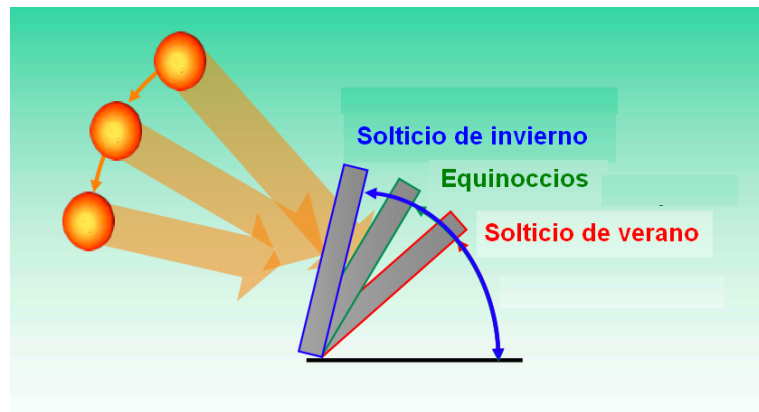


Figura 3.5: Inclinación óptima durante el año, Fuente [13]

En caso de no poder variar la inclinación de los colectores durante el año, se prefiere utilizar una inclinación equivalente a la latitud del lugar donde se instalan.

- **Equilibrio hidráulico**

La conexión entre los colectores debe asegurar el equilibrio hidráulico en el circuito de colectores, de tal manera que todos trabajen con el mismo caudal y a la misma presión.

Para asegurar el equilibrio hidráulico, se ocupa la alimentación invertida. El esquema de la alimentación invertida se aprecia en la figura 3.6

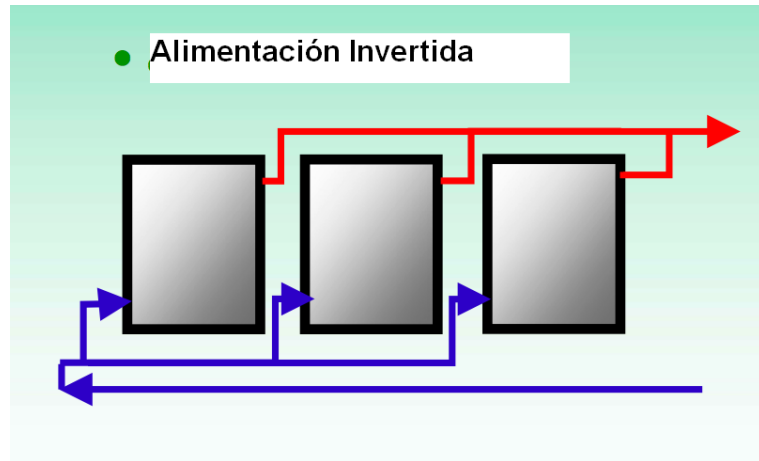


Figura 3.6: Alimentación invertida, Fuente [13]

La alimentación invertida consiste en que la primera alimentación es en la última batería de un techo y la primera recolección es en la misma batería, con esto se logra un equilibrio hidráulico, con lo cual, todas las baterías que son iguales reciben el mismo caudal y, por lo tanto, la temperatura de salida de cada batería es uniforme, además, como se tiene un equilibrio hidráulico, se tiene un equilibrio en las presiones de cada colector. Necesariamente debe ser la cañería de alimentación la que alimenta de forma invertida, ya que de esta manera se minimizan las pérdidas por conducción y convección en la recolección del circuito.

- Simetría

Al realizar las conexiones de los colectores solares, se debe diseñar de tal forma que exista simetría en la instalación.

El agua va a tender a fluir por las zonas que representen menores resistencias al flujo, por lo tanto si existen zonas que no son simétricas, se van a tener resistencias distintas, por lo que el caudal será menor en las zonas que representen mayor resistencia al flujo, lo cual afecta directamente el rendimiento del colector.

Bomba de circulación y control

La bomba de circulación debe ser capaz de vencer la pérdida de carga de la instalación, de tal manera de permitir la circulación del fluido por todo el sistema.

La ubicación en el sistema primario debe ser en la parte fría del circuito, entre el intercambiador de calor y los colectores solares, idealmente se debe ubicar en la zona más baja de la instalación.

Si en paralelo a la bomba se conecta un manómetro, se puede medir la pérdida de carga del circuito, lo cual es de gran ayuda para tener estimaciones del caudal que está circulando por los colectores.

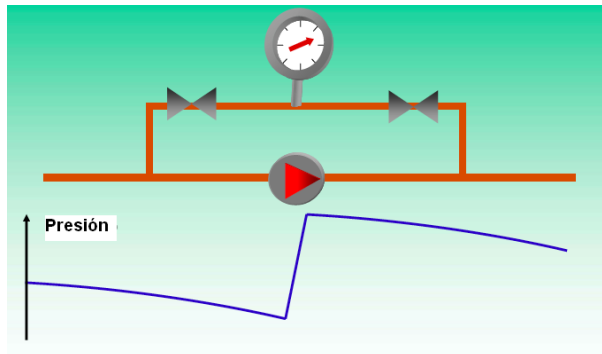


Figura 3.7: Esquema de instalación de manómetro en paralelo, Fuente [13]

La bomba debe funcionar cuando sea necesario, por lo que debe existir un control automático sobre la bomba, generalmente a este control se le denomina “central de mando”. La lógica de funcionamiento de la central de mando debe ser tal que aproveche al máximo la energía disponible

Válvula de retención

La válvula de retención permite la circulación del fluido en un único sentido, evitando la recirculación del fluido. Esto se ocupa para evitar el enfriamiento del sistema de acumulación durante la noche, ya que al disminuir la temperatura de los colectores se produce una circulación inversa del sistema.

Vaso de expansión

El vaso de expansión permite absorber la dilatación del fluido térmico. Funciona como un amortiguador entre la presión del circuito en frío y la máxima presión admisible. En la figura 3.8 se aprecia el % de dilatación del fluido en función de la temperatura.

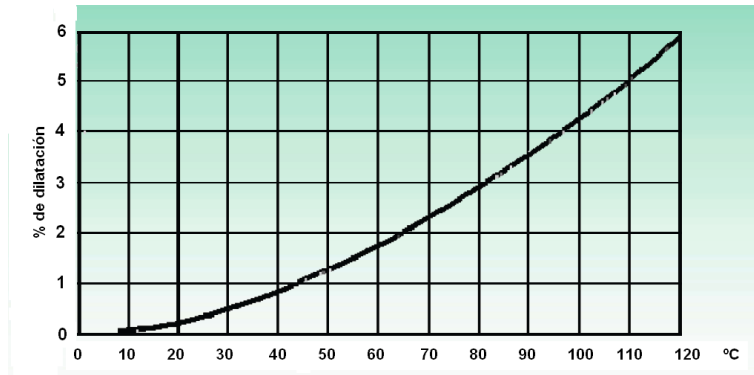


Figura 3.8: % de dilatación vs temperatura, Fuente [13]

El vaso de expansión se debe ubicar en la aspiración de la bomba, en el circuito de ida de los colectores. Las principales funciones del vaso de expansión son

- Absorber la dilatación del fluido en el circuito primario.
- Recibir el líquido expulsado de los colectores durante el proceso de estagnación del colector [Anexo F].
- Servir de reserva de agua, evitando así el uso de sistemas de llenado automático.

Dado que una de las funciones es recibir el agua expulsada de los colectores durante la estagnación, su ubicación debe ser tal que no haya válvulas que impidan la entrada del líquido al vaso, por eso es fundamental la ubicación del vaso en relación a la válvula de retención. En la figura 3.9 se aprecia la correcta ubicación del vaso de expansión.

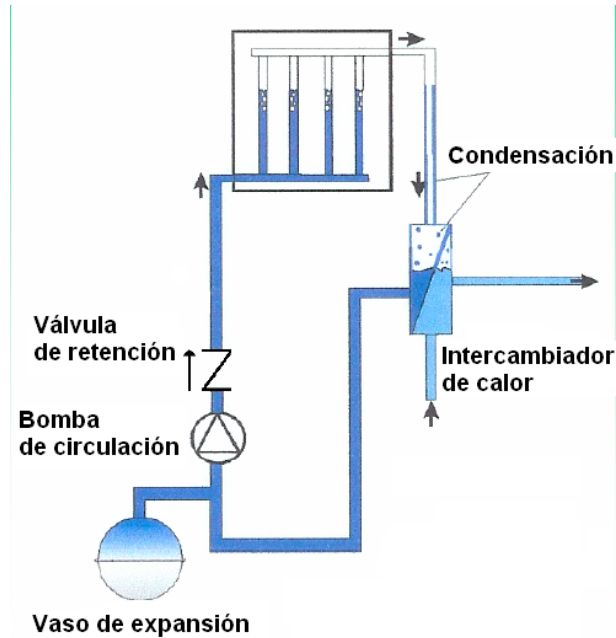


Figura 3.9: Correcta ubicación del vaso de expansión en el circuito primario, Fuente [13]

En la figura 3.22 se aprecia que el vaso de expansión se debe ubicar en la succión de la bomba de circulación y la válvula de retención se debe ubicar en la descarga de la bomba de circulación, de esta manera el fluido expulsado del colector puede ingresar al vaso de expansión sin mayores obstáculos.

Intercambiador de calor

En caso de ocupar un sistema indirecto, los sistemas se deben unir a través de un intercambiador de calor. La mayor desventaja de usar un intercambiador de calor es que hay asociado una pérdida en el rendimiento global del sistema, pero permite separar los fluidos de tal manera de ocupar anticongelante en el circuito primario para evitar el congelamiento de los colectores.

Para las aplicaciones de energía solar, se suelen ocupar 4 tipos de intercambiador de calor, de los cuales 2 van integrados al estanque de acumulación y 2 son externos.

Intercambiador de calor integrado al estanque

- **Intercambiador de calor de camisa**

El intercambiador se encuentra dentro del depósito, es una camisa por la cual circula el fluido proveniente de los colectores solares, tiene gran rendimiento debido al gran área de contacto pero está limitado a bajos volúmenes de acumulación, de hasta 300 [lt].

En la figura 3.10 se puede ver un esquema.

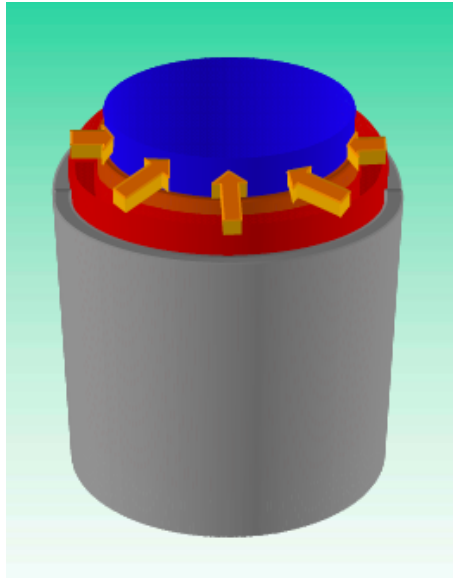


Figura 3.10: Esquema de intercambiador de calor con camisa, Fuente [13]

- Intercambiador de calor de serpentín

En este caso el intercambiador de calor también está integrado al depósito, es un serpentín que está dentro del depósito, por el serpentín circula el fluido proveniente de los colectores y transfiere energía al fluido que se encuentra dentro del estanque. También está limitado a bajos volúmenes de acumulación

En la figura 3.11 se puede ver un esquema

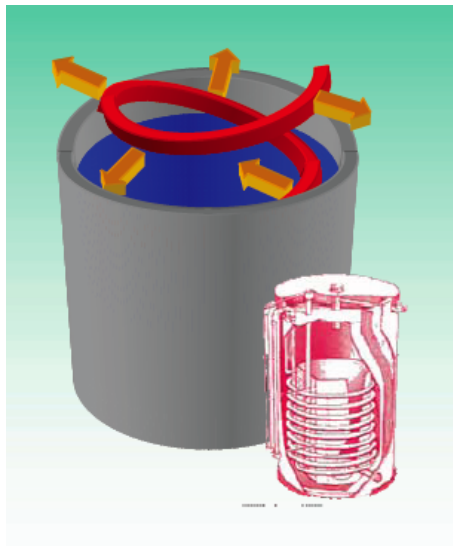


Figura 3.11: Esquema de intercambiador de calor con serpentín, Fuente [13]

Intercambiadores de calor externos

Hay 2 tipos de intercambiadores de calor externos, los de placa y los de tubo y carcasa.

■ Intercambiador de calor de placas

El intercambiador de calor de placas presenta grandes eficacias, ocupa poco espacio pero necesita de aislación térmica. El precio es relativamente alto comparado con los mencionados anteriormente y presenta una elevada pérdida de carga, pero su uso no está limitado por el volumen de acumulación. Una ventaja de este tipo de intercambiador es la opción de agregarle placas, de tal forma que se puede aumentar el área de intercambio térmico. En la figura 3.12 se aprecia el intercambiador de calor de placas y la forma en que circulan los fluidos en su interior.

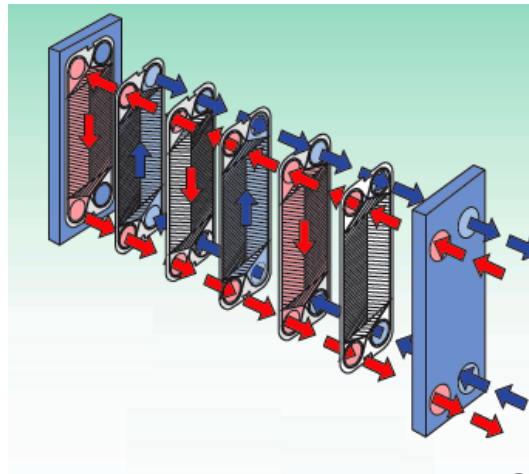


Figura 3.12: Esquema de intercambiador de calor de placas, Fuente [13]

■ Intercambiador de calor de tubo y carcasa

El de tubo y carcasa es de características similares al de placas, salvo que no es una pérdida de carga tan elevada para el sistema. En la figura 3.13 se aprecia una imagen del intercambiador.



Figura 3.13: Intercambiador de calor de tubo y carcasa, Fuente [13]

Una vez que se tiene el tipo de intercambiador de calor que se ocupará, se debe dimensionar. El aspecto

más importante a la hora de dimensionar un intercambiador de calor es el área total de intercambio, lo cual indirectamente entrega la potencia del intercambiador de calor.

En un principio se recomienda utilizar una potencia de intercambio térmico de $750 \text{ [W/m}^2 \text{ de colector]}$

Circuito hidráulico

Para realizar el circuito hidráulico hay que tomar en cuenta 3 aspectos, el material de la cañería, el posterior dimensionamiento de la misma y la aislación necesaria para reducir las pérdidas térmicas.

■ Materiales

Hay gran cantidad de materiales que se pueden ocupar, entre ellos

- Acero inoxidable: Buena resistencia a la corrosión, fácil manipulación y gama completa de accesorios para realizar circuitos hidráulicos, tiene baja rugosidad.
- Acero galvanizado: Se puede ocupar para temperaturas inferiores a $50 \text{ [}^\circ\text{C]}$, ya que el zinc sufre corrosión a mayores temperaturas.
- Acero negro: Difícil manipulación, necesita pintura exterior para proteger de la corrosión, no se puede utilizar en transporte de agua caliente sanitaria porque sufre oxidaciones que deterioran la pureza del agua.
- Cobre: Altamente utilizado en todo tipo de instalaciones, es de fácil manipulación y económicamente competitivo, es resistente a la corrosión y de gran durabilidad.
- Polipropileno: Fácil manipulación, económicamente competitivo, no presenta deformación permanente bajo los $80 \text{ [}^\circ\text{C]}$ y tiene un coeficiente de rugosidad bajo.

La selección del material debe realizarse considerando los problemas de corrosión, la presión del circuito, pureza del agua, el hecho de que el circuito primario puede exceder los $100 \text{ [}^\circ\text{C]}$ durante la estagnación del colector y la rugosidad del material.

■ Dimensionamiento de la cañería

Se busca dimensionar el circuito hidráulico con las secciones de menor diámetro posible, esto por un tema económico del material. A su vez, la circulación del fluido a mayor velocidad aumenta significativamente las pérdidas de carga de la instalación y por lo tanto, se requiere un mayor consumo de la bomba de circulación, por lo que se debe trabajar con velocidades inferiores a los 2 [m/s] y el caudal debe satisfacer las necesidades de consumo.

En la elección del material de la cañería el coeficiente de rugosidad juega un papel muy importante en las pérdidas de carga, ya que si la cañería presenta un elevado coeficiente de rugosidad, aún a bajas velocidades de circulación se van a tener pérdidas de carga considerables.

- Dimensionamiento de la aislación

Para dimensionar la aislación de la tubería, se calcula un espesor de ella dadas ciertas condiciones de trabajo y dada una pérdida de temperatura admisible en un tramo.

Las condiciones de trabajo relevantes son la temperatura de circulación del fluido y la temperatura ambiente. La pérdida de temperatura admisible es un valor que el usuario fija, por ejemplo, que la pérdida sea de 0.5 [°C] en 10 [m].

Fluido de trabajo

El fluido de trabajo circula por el interior de los tubos del colector solar, transportando la energía hacia el depósito de acumulación, esto lo realiza indirectamente a través del intercambiador de calor.

Dado que realiza el transporte de energía del sistema solar, se busca que cumpla con ciertas propiedades, entre ellas

- Elevado calor específico
- Baja Viscosidad
- Tensión de vapor moderada
- Baja temperatura de congelamiento
- Alta estabilidad térmica
- Químicamente inerte
- No corrosivo y libre de partículas disueltas
- Disponible y barato

Las primeras 3 propiedades reducen el caudal necesario de fluido para realizar un transporte óptimo de energía desde los colectores hacia el estanque de acumulación. Al tener menos caudal en el sistema, se reducen las dimensiones de la bomba de circulación y de las cañerías.

El agua cumple gran parte de los requisitos, con excepción de la baja temperatura de congelación, luego en zonas donde existe riesgo de congelamiento del fluido calotransportador, se deben tomar medidas para evitar el congelamiento, entre ellas

- Ocupar anticongelantes

- Realizar circulación del fluido a bajas temperaturas
- Ocupar colectores con diámetros sobredimensionados, de tal manera que la totalidad del fluido en el interior no alcance a congelarse.

3.1.2. Lógica de control

Dado que la energía solar es un fenómeno transiente durante el día, se necesita implementar lógicas de control que permitan aprovechar la energía solar al máximo.

El principal control se debe realizar sobre el circuito primario, ya que la bomba de circulación debe partir en el momento en que haya energía disponible y debe parar cuando no haya energía. De la misma forma, como el sistema tiene un circuito de acumulación, este debe estar acoplado al circuito primario, es decir, cuando se activa el circuito primario, necesariamente se activa el secundario, de tal forma de poder acumular la energía transformada.

Un típico ejemplo de control se puede apreciar en la figura 3.14

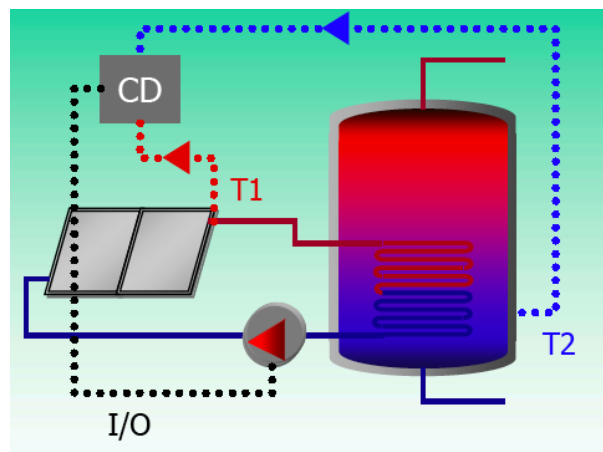


Figura 3.14: Puntos de control en instalación de energía solar térmica, Fuente [13]

En la figura, T1 es la temperatura de salida del fluido de los colectores y T2 es la temperatura de la parte inferior del estanque de acumulación, que es la parte mas fría de la acumulación si se ha privilegiado la estratificación en la acumulación. Luego la lógica de control es como sigue

- Sistema parte si $T1 - T2 \geq 5$ [°C]
- Sistema para si $T1 - T2 \leq 2$ [°C]

El sistema de control también sirve para evitar el congelamiento de las cañerías del sistema, luego cuando $T_1 = 2$ [°C], el sistema parte para hacer circular el fluido.

Para distribuir la energía almacenada, se debe estudiar en profundidad según corresponda el caso, para implementar la lógica de control que optimice el uso de la energía. En general, las aplicaciones son distintas entre sí, por lo que no es posible dar una forma general de optimizar el uso de la energía.

3.1.3. Sistema de acumulación

El sistema de acumulación debe almacenar la energía transformada por el sistema primario, luego es de vital importancia que funcione de manera eficiente y así aprovechar al máximo la energía. Lo ideal es que en verano, el sistema solar logre tener cierto nivel de autonomía incluso en la noche, luego la acumulación juega un rol bastante importante en la totalidad del sistema.

Los acumuladores de fluido deben ser diseñados para evitar las pérdidas térmicas durante el día y la noche y deben tener una geometría tal que favorezca la estratificación del agua. En los acumuladores se busca estratificar el agua, ya que 2 estanques con la misma energía en su interior pueden tener distintos valores de temperatura. En la figura 3.15 se muestra gráficamente este fenómeno.

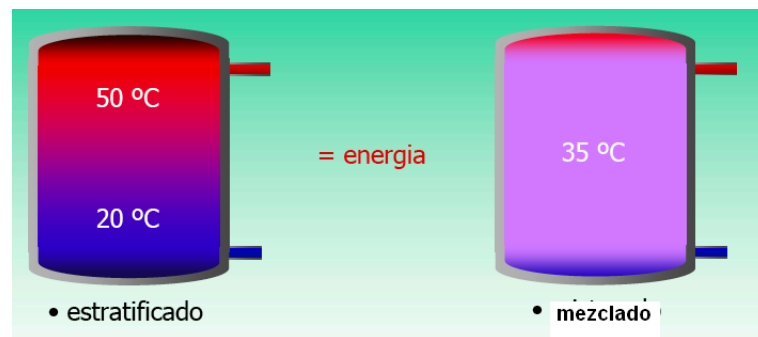


Figura 3.15: Estanques con misma energía, Fuente [13]

Para evitar las pérdidas térmicas se ocupan aislantes como espuma de poliuretano de alta densidad, además que se privilegia una geometría que minimice la relación Volumen/Superficie, de tal manera de minimizar el área expuesta para evitar las pérdidas térmicas a través de las paredes del depósito acumulador. Para favorecer la estratificación del agua se privilegia una ubicación vertical del depósito, de esta manera se minimiza el área en la dirección horizontal al estanque, luego un buen estanque acumulador debe cumplir lo siguiente.

- Buena aislación

- Ubicación vertical
- Baja relación Superficie/Volumen

Otro elemento importante en el sistema de acumulación es el tipo de difusor que se ocupa para introducir el agua caliente al depósito. En un principio se privilegian las bajas velocidades de ingreso del agua al estanque, pero esto viene dado por las dimensiones del sistema solar. En caso de no tener bajas velocidades de ingreso del agua, se ocupan difusores especiales que buscan minimizar la agitación del agua dentro del estanque. Entre los difusores se tienen deflectores, redistribuidores, tipo flauta, etc. En la figura 3.16 se pueden apreciar alguno de ellos

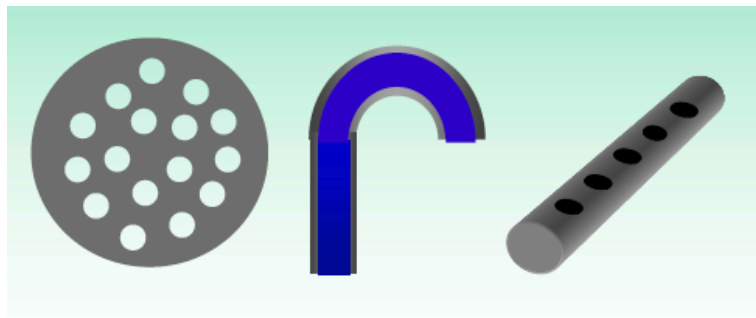


Figura 3.16: Difusores utilizados para promover la estratificación, Fuente [13]

3.1.4. Válvulas

En un sistema solar se deben ocupar varios tipos de válvulas.

Válvula de seguridad

Una válvula de seguridad es un elemento regulador de presión del sistema, de esta manera se protegen los componentes de la instalación. La presión de regulación del sistema debe ser menor a la máxima presión de trabajo del componente más delicado del sistema. Ninguna válvula de otro tipo puede impedir el funcionamiento de la válvula de seguridad.

Válvula de 3 vías

Una válvula de 3 vías permite la circulación de flujo en uno u otro sentido según un control automático. Generalmente se activan por la acción de un servomotor.

Válvula mezcladora

Una válvula mezcladora permite mezclar agua caliente y agua fría. Esto se ocupa principalmente por 3 motivos.

- Seguridad de personas y equipos
- Uso racional de agua
- Uso racional de energía

Instrumentos de monitorización

En la instalación se pueden monitorear varios componentes, de tal manera de ver el comportamiento de la instalación solar. Con un buen monitoreo, se puede estimar la energía solar convertida y la autonomía del sistema solar. Las mediciones tienen sentido en largos períodos, por ejemplo, 1 mes, de esta manera se elimina el carácter aleatorio de la energía solar.

Los principales instrumentos que se ocupan son

- Horómetros en las bombas
- Piranómetro
- Sondas de temperatura
- Medidor de caudal de agua
- Medidor de caudal de gas (o combustible equivalente)
- Termómetros

Con esto se busca medir

- Radiación disponible en el plano del colector
- Caudal de circulación en circuito primario y secundario
- Temperaturas de entrada y salida del campo de colectores
- Temperatura en los depósitos de acumulación

- Volumen de agua consumida
- Temperatura de la red
- Energía de apoyo ocupada

Realizando mediciones sobre estos parámetros, se puede hacer un seguimiento bastante preciso del rendimiento de la instalación solar, se analiza la autonomía del sistema e indirectamente se pueden encontrar fallas en ellas.

3.1.5. Dimensionamiento de la instalación

Para realizar una buena instalación de energía solar, se debe tener claro el fin de ella. Las principales características que se deben conocer para realizar un correcto dimensionamiento son

- Lugar geográfico de la instalación, de esta forma se pueden usar datos históricos de radiación o, en caso de no existir datos, se pueden ocupar métodos de estimación de radiación para ver la energía disponible en la zona. Generalmente de registros históricos se obtienen las temperaturas promedio de la zona.
- Factibilidad de ubicar los colectores en la orientación e inclinación óptima. En algunos casos, no será posible ubicar los colectores ya sea en la orientación o en la inclinación óptima, ya sea por motivos arquitectónicos o por espacio, luego habrán penalizaciones al rendimiento del colector, lo cual puede influir significativamente en la instalación final.
- Utilización del agua caliente. Es de gran importancia tener claro las cantidades de agua que se utilizan, las horas de mayor consumo, las épocas del año en que se dan las mayores y los menores consumos y la temperatura de utilización del agua.

3.2. Descripción de criaderos de cerdos

El sistema instalado se ocupa para calentar agua en un criadero de cerdos, el cual se ubica en el interior de Melipilla. La distribución de los lechones se realiza en galpones, en total hay 8 galpones, los cuales se dividen en maternidades, en total hay 22 maternidades.

La distribución de los galpones y de las maternidades se muestra en la figura 3.17

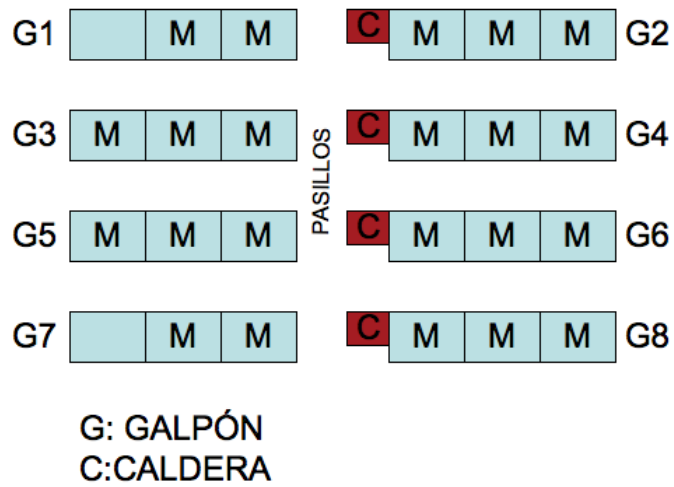


Figura 3.17: Distribución de maternidades en la planta, Fuente [15]

Los cerdos durante su vida pasan por distintas etapas:

- Chanchilla
- Recría
- Engorda

La instalación se encuentra en la etapa de chanchilla, la cual es desde el nacimiento, hasta los 21 días de vida. Durante esta etapa, los lechones viven con su madre en unas jaulas. En la figura 3.18 se aprecia la jaula donde crecen los cerdos, notando los calefactores ubicados en el suelo. En la figura 3.19 se puede apreciar una maternidad. En la figura 3.20 se aprecia un galpón con los colectores solares ubicados en el techo.



Figura 3.18: Jaula donde crecen los cerdos, Fuente [15]



Figura 3.19: Imagen de una maternidad de cerdos, Fuente [15]



Figura 3.20: Galpón con los colectores solares ubicados en el techo, Fuente [15]

Todo el recinto debe estar temperado, para lo cual existe un sistema de ventilación que regula la temperatura ambiente y, además, el punto de contacto del lechón con el suelo debe tener la temperatura adecuada durante el crecimiento del mismo. Esta temperatura es según los días de vida, siendo la más alta al momento en el que nacen.

Las temperaturas requeridas se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Tabla de temperaturas según días de vida, Fuente [15].

| Días de vida | Temperatura [°C] |
|--------------|------------------|
| 1-3 | 42 |
| 4-8 | 41 |
| 9-12 | 40 |
| 13-16 | 39 |
| 17-19 | 38 |
| 20-21 | 37 |

La temperatura requerida por los cerdos, es el principal parámetro de diseño a satisfacer por el sistema solar. Una vez que se comprende esto, no se habla más de los cerdos, sino que se les considera una carga térmica, la cual es independiente de la naturaleza de la misma.

De ahora en adelante, los distintos componentes del sistema se identificarán con un número, el cual identifica la ubicación del componente en los esquemas que se muestran en la descripción de las partes

del sistema. Para una mejor comprensión del lector, se han incluido imágenes de partes del sistema. Las características de cada componente se pueden ver en el cuadro “Características de los componentes”, el cual se encuentra en los anexos.

3.3. Descripción del circuito de calefacción con calderas

Un esquema del circuito de calefacción con calderas que se utiliza tradicionalmente se aprecia en la figura 3.21

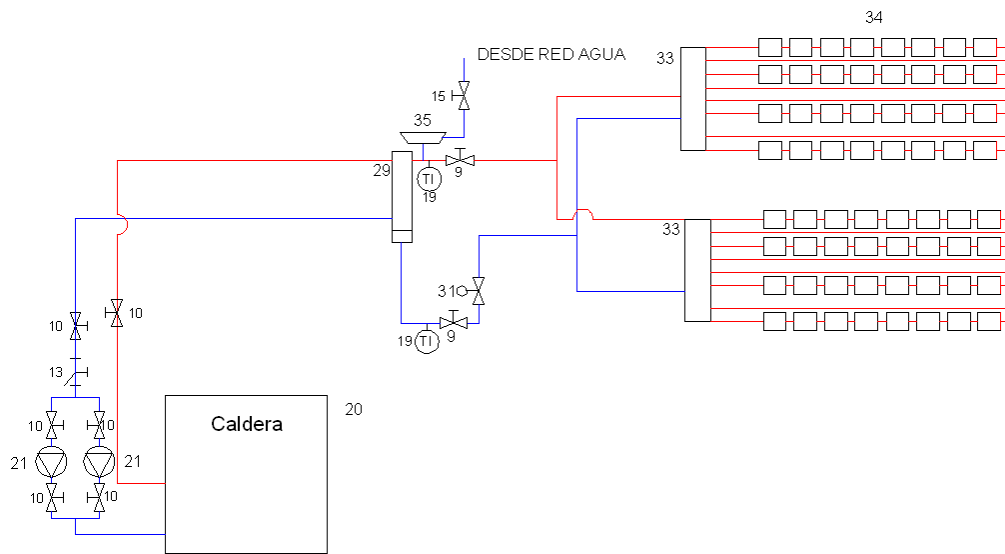


Figura 3.21: Esquema de la calefacción con calderas

Para lograr las temperaturas, se tiene un circuito de calefacción con calderas, las cuales tienen una potencia nominal de 110 [kW] (33) y funcionan con gas licuado. Su función es elevar la temperatura del agua hasta unos 55 [°C], luego el agua se hace circular por medio de la bomba de agua (21) hasta un intercambiador de calor de serpentín (29), el cual conecta el circuito de la caldera con el circuito de los calefactores. Una vez que se transfiere la energía a través del intercambiador de calor, el fluido circula por un dosificador (33), que mezcla el agua caliente con agua fría para obtener la temperatura exacta que se necesita. Cuando el agua tiene la temperatura adecuada, se hace circular por todos los calefactores. Tanto el intercambiador de calor de serpentín como el dosificador, tienen bombas de recirculación que permiten hacer circular el flujo por todo el circuito de calefactores.

Cada dosificador tiene 4 salidas, cada salida alimenta 8 calefactores (34). Después de cada intercambiador de calor de serpentín se tienen 2 dosificadores, luego en cada maternidad hay 64 calefactores y como en total hay 22 maternidades, se tienen 1408 calefactores. En promedio cada calefactor entrega 60 [W] al

exterior, y en condiciones óptimas entregan hasta 90 [W] cada uno. Los calefactores se conectan en serie y cada entrega del dosificador es independiente del resto.

El sistema del intercambiador de calor y dosificador son complementarios y junto con los calefactores se han diseñado especialmente para calefacción de suelos en crianza de animales.

Una caldera alimenta 2 galpones ubicados en forma opuesta, por ejemplo, en la figura 3.1, una caldera alimenta el galpón 1 y 2, otra el 3 y el 4, y así sucesivamente. En total hay 4 calderas.

Hay galpones que tienen 2 maternidades y otros que tienen 3 maternidades, luego hay 2 calderas que alimentan 5 maternidades y las otras 2 calderas alimentan 6 maternidades. En la tabla 3.2, se aprecian los promedios de consumo diario en los distintos meses.

Tabla 3.2: Energía promedio diaria entregada por las calderas, Fuente [15].

| Mes | [kg combustible/día] | [kWh] |
|------------|----------------------|-------|
| Enero | 125 | 1513 |
| Febrero | 143 | 1734 |
| Marzo | 202 | 2440 |
| Abril | 217 | 2622 |
| Mayo | 283 | 3428 |
| Junio | 285 | 3449 |
| Julio | 293 | 3549 |
| Agosto | 267 | 3227 |
| Septiembre | 252 | 3045 |
| Octubre | 192 | 2319 |
| Noviembre | 153 | 1855 |
| Diciembre | 123 | 1492 |

En este punto, se hace énfasis en destacar la diferencia entre los circuitos de calefacción. En total hay 3 circuitos, los cuales se detallan a continuación

- Circuito de calefacción con calderas: Es el explicado anteriormente, que consta de calderas para lograr la calefacción
- Circuito de calefactores: Es el circuito final, el cual contiene los calefactores que entregan la energía térmica a los cerdos. Se compone de un dosificador y se conecta al circuito de calefacción con calderas mediante un intercambiador de calor de serpentín
- Circuito de calefacción solar: Es el circuito que entrega la energía térmica procedente de la conversión de la energía solar. Este circuito actúa en paralelo y totalmente independiente del circuito de

calefacción de calderas.

3.4. Descripción del sistema solar

El sistema solar se puede considerar de gran superficie de captación debido al área total de captación. Las principales características del sistema solar se detallan a continuación.

- Sistema Indirecto: Sistema solar es indirecto, ya que el fluido de trabajo que circula por los colectores no es el mismo que circula por los calefactores, sino que se ocupan intercambiadores de calor para separar los circuitos.
- Sistema de circulación forzada: Se ocupan bombas de agua para forzar la circulación del fluido de trabajo en el circuito de primario.
- Capacidad de acumulación de 30000 [It]: El sistema solar cuenta con una capacidad de acumulación de 30000 [It], esto se logra por medio de 3 estanques de 10000 [It] cada uno. Considerando cotas de 55 y 75 [°C], se tiene una energía de 700 [kWh].
- Área de captación de 645 [m^2]: El área de captación se compone de 254 colectores solares planos de 2,54 [m^2] cada uno.
- Sistema auxiliar en paralelo: La caldera alimenta el sistema de calefacción en forma paralela al sistema solar, es decir, ambos sistemas no interactúan entre ellos. El sistema solar interviene el circuito de los calefactores directamente en serie, ya que, como se detalla más adelante, interviene justo antes del intercambiador de calor de serpentín.

El sistema solar se compone de 3 circuitos.

- Circuito primario primario
- Circuito secundario
- Circuito de calefacción solar

3.4.1. Circuito primario

El circuito primario es el encargado de transformar la energía solar en energía térmica, esto se logra por medio de los colectores solares (1), este es un colector plano, el cual aprovecha el efecto invernadero producido por una superficie selectiva. Por el interior del colector hay una serie de tubos de cobre por los cuales

circula el agua. Para transformar la energía solar en energía térmica, el circuito cuenta con 254 colectores, los cuales hacen un área total de 645 [m²]. Los colectores se ubican en el techo de 4 galpones, como se muestra en la figura 3.22

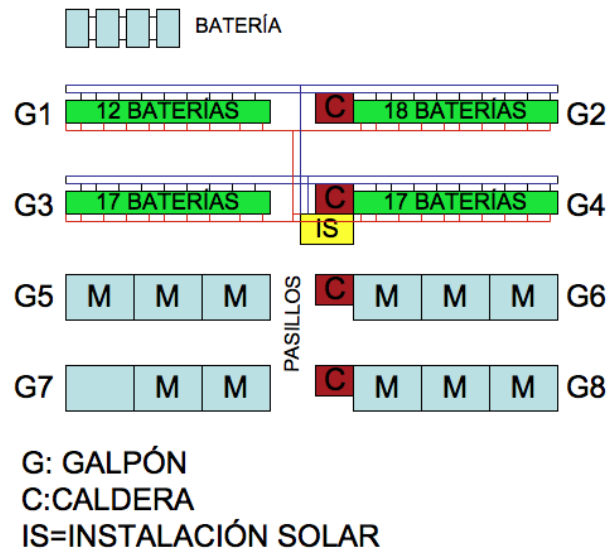


Figura 3.22: Ubicación actual de los colectores en los techos, Fuente [14]

El fluido calotransportador es agua y se hace circular a través del circuito primario por la bomba de agua (2).

Entre los distintos componentes del circuito primario, se tienen válvulas de bola (10), válvula de llenado automático (24), filtro Y (13), 2 termocuplas en 2 colectores (27), válvula de sentido del flujo (11), un estanque de expansión (17) y un intercambiador de calor de placas (5) que posee 33 placas de 1300 [cm²] de superficie de intercambio térmico cada una, obteniéndose un área total de intercambio de 4.03 [m²] (las 2 primeras placas no realizan intercambio térmico). El intercambiador de calor conecta el circuito primario con el circuito secundario, por lo que se puede decir que este componente pertenece a ambos circuitos. El diagrama de flujo con los distintos componentes se puede ver en la figura 3.23

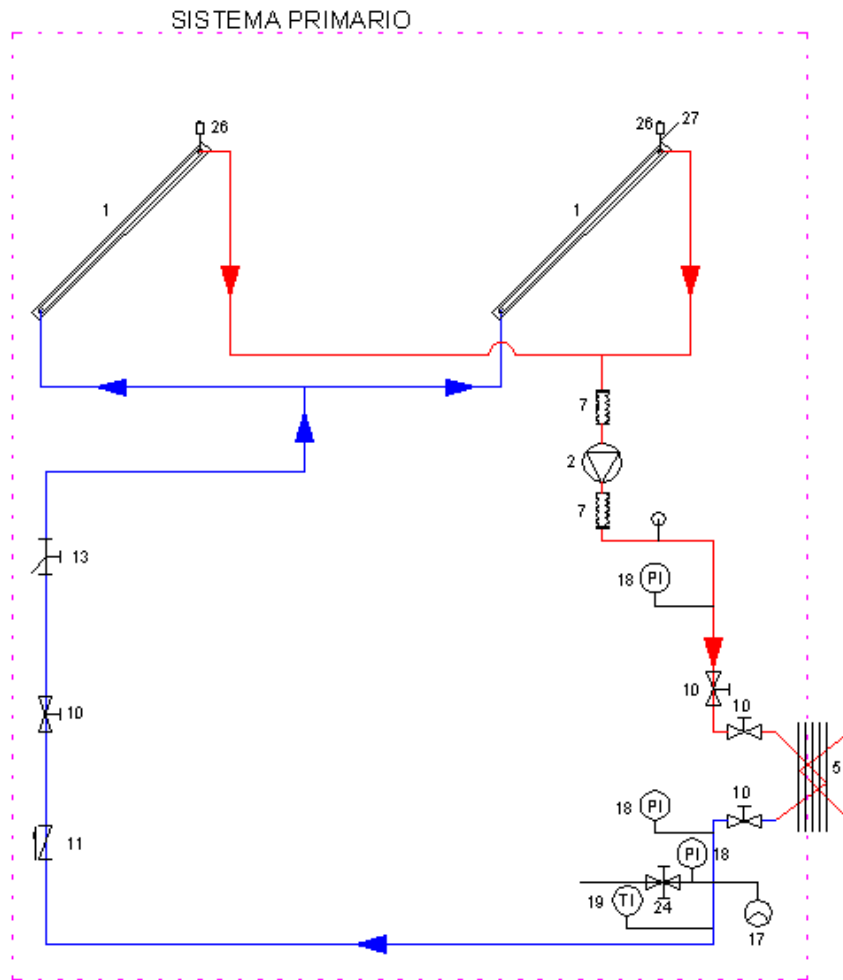


Figura 3.23: Diagrama de flujo circuito primario

3.4.2. Circuito secundario

El circuito secundario es el encargado de acumular la energía obtenida por el circuito primario y el encargado de entregar energía al circuito de calefacción, luego se puede decir que el circuito secundario tiene 2 sub-circuitos, que funcionan de manera independiente, los cuales llamaremos circuito de acumulación y circuito de distribución.

El circuito secundario tiene una capacidad de acumulación de 30.000 [lt], esto lo hace con 3 estanques (28) de 10.000 [lt] conectados en cascada térmica, los cuales se encuentran enterrados para disminuir las pérdidas de calor por convección con el medio. Para diferenciar los estanques, se les designará según su temperatura, luego el estanque donde se inyecta el fluido proveniente del intercambiador de calor primario colectores y del que se extrae el fluido hacia el consumo será el estanque caliente. De la misma forma, el

estanque del cual se extrae el agua hacia el intercambiador de calor primario y se inyecta el fluido proveniente del consumo, será el estanque frío. El estanque que se ubica entre los 2 mencionados anteriormente será el estanque tibio.

Circuito de acumulación

El circuito de acumulación interactúa con el circuito primario. El fluido calotransportador es agua, el cual se hace circular con la bomba de agua (3).

Un esquema del circuito de acumulación se aprecia en la figura 3.24

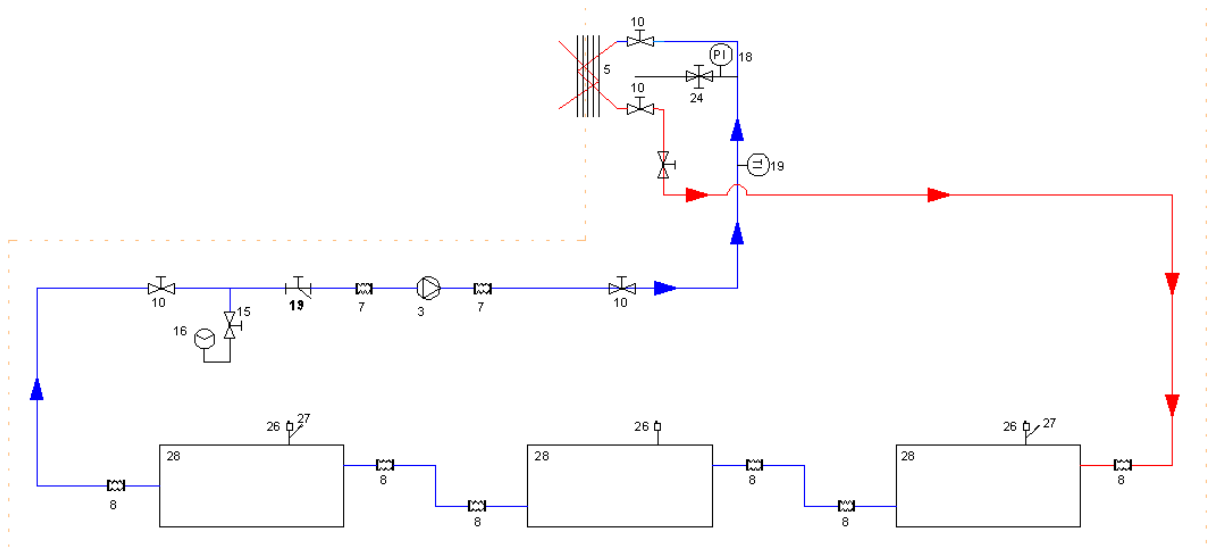


Figura 3.24: Diagrama de flujo de acumulación del circuito secundario

El circuito primario y el circuito de acumulación están acoplados, es decir, cuando se activa el primario, necesariamente se activa el circuito de calefacción. La lógica de funcionamiento es la siguiente.

- Sistema parte si la temperatura de descarga de los colectores es 5 [°C] mayor que la temperatura inferior del estanque frío.
- Sistema para si la diferencia de temperaturas disminuye a 2 [°C].

El único caso en que el circuito primario funciona independiente del circuito secundario, es cuando la temperatura en el colector es de 2 [°C], luego se activa la bomba de circulación del circuito primario para evitar el congelamiento del fluido en las cañerías. Todo el funcionamiento es controlado en forma automática por una central de mando.

El resto de los componentes de la parte de acumulación del circuito secundario son válvulas de bola (10), 1 estanque de expansión (16) y 2 termocuplas (27) ubicadas en el punto frío (punto inferior dada la estratificación térmica) del estanque de la izquierda y en el punto caliente (punto superior) del estanque de la derecha.

En la figura 3.7, se aprecia la conexión en cascada térmica de los estanques de acumulación, en este caso la inyección del fluido se realiza en el punto superior del estanque, esto se realiza con el objetivo de estratificar el agua en los estanques. La extracción del agua se realiza por la parte inferior del último estanque, ya que es la parte mas fría del circuito de acumulación.

Circuito de distribución

El circuito de distribución del secundario es el encargado de entregar energía al circuito de calefacción. Cuando el punto caliente de la acumulación tiene $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, la central de mando envía una señal que energiza las bombas de agua (4), la misma señal energiza la válvula solenoide de 2 vías normal cerrada (5), luego al energizarse se abre y deja circular el fluido hacia el intercambiador de calor de placas (6), entregándole energía al circuito de calefacción. El intercambiador de calor posee 19 placas, de $340\text{ }[\text{cm}^2]$ cada una de superficie de intercambio térmico, lo cual equivale a un área total de intercambio de $0.58\text{ }[\text{m}^2]$. El esquema del circuito de distribución se puede apreciar en la figura 3.25

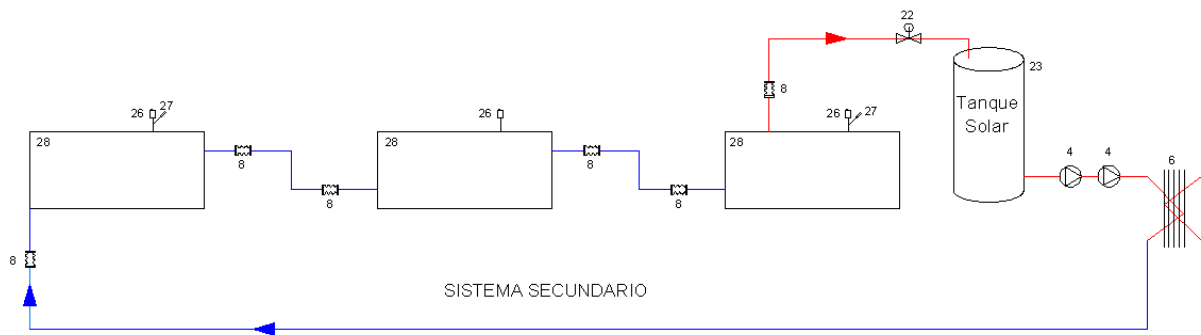


Figura 3.25: Diagrama de flujo del circuito de distribución del secundario

Dado que el funcionamiento del circuito de distribución considera una temperatura de $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, se establece esta temperatura como cota inferior, y asumiendo una cota superior de $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, se tiene una energía total en los estanques de acumulación de $700\text{ }[\text{kWh}]$.

3.4.3. Circuito de calefacción solar

El último circuito es el de calefacción solar y es el encargado de entregar la energía acumulada. El circuito de calefacción se conecta con el circuito de distribución a través del intercambiador de calor de placas (6), por lo que ambos están acoplados. El circuito de calefacción solar es totalmente independiente del circuito primario y del circuito de acumulación, de hecho, si la acumulación lograda durante el día es suficiente, el circuito de calefacción solar puede funcionar sin problemas durante la noche.

Un esquema del circuito de calefacción se aprecia en la figura 3.26

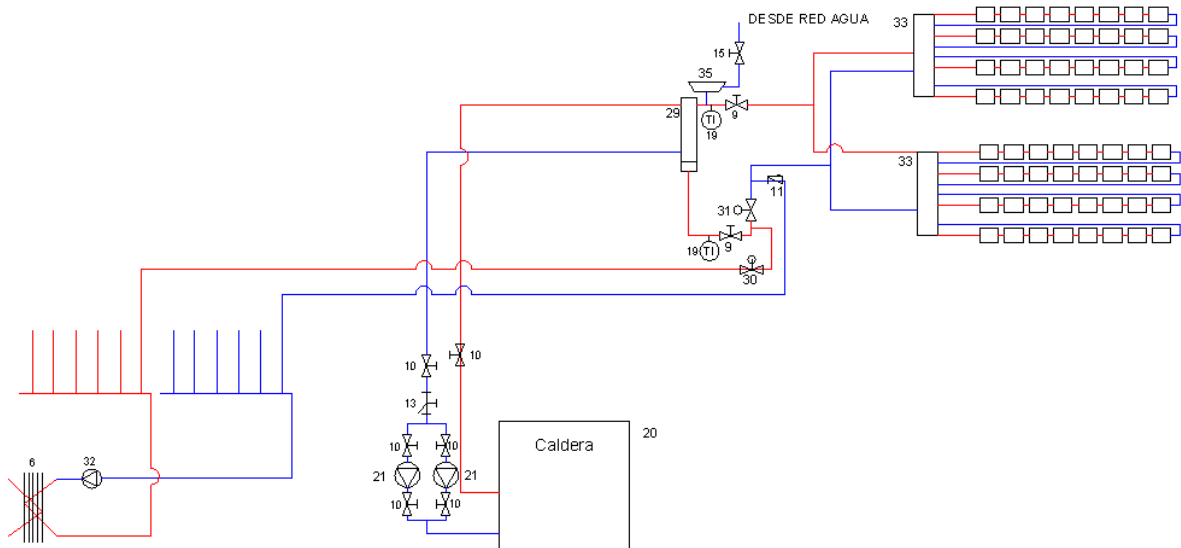


Figura 3.26: Diagrama de flujo de la calefacción del sistema solar

En el circuito de calefactores se distinguen 2 casos, cuando la calefacción se logra por medio de la energía calorica proveniente de la combustión de gas en la caldera, o, cuando la energía calórica se logra por la transformación de la energía solar. A continuación se explica en detalle el segundo caso.

Cuando la temperatura del punto caliente de los estanques tiene 55 [°C], el sistema solar puede satisfacer la demanda de energía. En este momento la central de mando envía una señal y se energizan las válvulas solenoides. La válvula solenoide (31) es una válvula solenoide de 2 vías Normal Abierta, luego al energizarse se cierra y el flujo es desviado hacia el intercambiador de calor de placas (6), la válvula solenoide (30) es una válvula de 2 vías Normal cerrada, luego al energizarse se abre y permite la circulación del flujo a través del intercambiador de calor sin problemas. Al mismo tiempo que se energizan las válvulas solenoides, se energiza la bomba de circulación de los calefactores (32), la cual hace circular el fluido a través de los calefactores y a través del intercambiador de calor de placas (6), por otra parte tambien se energizan las

bombas (4), las cuales extraen el agua caliente del estanque, la hacen circular a través del intercambiador de calor y la inyectan nuevamente en la parte fría del estanque, de esta forma se extrae el calor del circuito secundario.

Una vez que el agua circula y extrae energía del intercambiador de calor de placas (6), el agua circula por el intercambiador de calor de serpentín (29), pero en este caso circula por el secundario del intercambiador, sin extraer energía del primario, sino que solo circula por él por ser parte del esquema, la bomba que hace circular el fluido del circuito primario no se activa, pero si se activa la bomba de circulación que incluye el intercambiador de calor de serpentín. Las pérdidas de temperatura debido a la circulación por el intercambiador de calor de serpentín son mínimas, ya que el primario es el circuito de la caldera, luego tiene una temperatura relativamente elevada debido a la combustión del gas, pero, como ya se dijo, el flujo en el primario es nulo, por lo que la transferencia de calor es mínima. A continuación del intercambiador de calor de serpentín, hay un estanque atmosférico (35), la función de este estanque es análoga a la de una válvula de llenado automático, es decir, permite tener en el circuito una presión adecuada y un nivel constante, este estanque se encuentra en el punto más elevado del sistema de calefacción.

A continuación el agua circula a través de un dosificador (33), cuya función es mezclar el agua caliente con agua fría, de tal forma de tener la temperatura exacta en la entrega. Una vez que circula por el dosificador, el agua se distribuye por todos los calefactores de las distintas maternidades, entregando la energía necesaria para lograr la temperatura adecuada según los días de vida de los lechones. El control de las temperaturas se realiza por medio de una central de mando que es distinta a la central de mando del sistema solar.

El sistema solar comprende todo lo que no funciona cuando la calefacción se logra por medio de la combustión del gas licuado en la caldera, es decir, el dosificador y el intercambiador de calor de serpentín no forman parte del sistema solar, por lo que no se hacen mayores observaciones sobre ellos.

En las imágenes 3.27, 3.28 y 3.29 se muestra la instalación actual. En las 2 primeras figuras se muestra la instalación más compleja, ya que, aparte del sistema de caldera, se encuentra el sistema primario con el secundario, unidos por el intercambiador de calor de placas (5), y el sistema secundario con el sistema de calefacción solar, unidos por el intercambiador de calor de placas (6).



Figura 3.27: Instalación actual, Fuente [14]

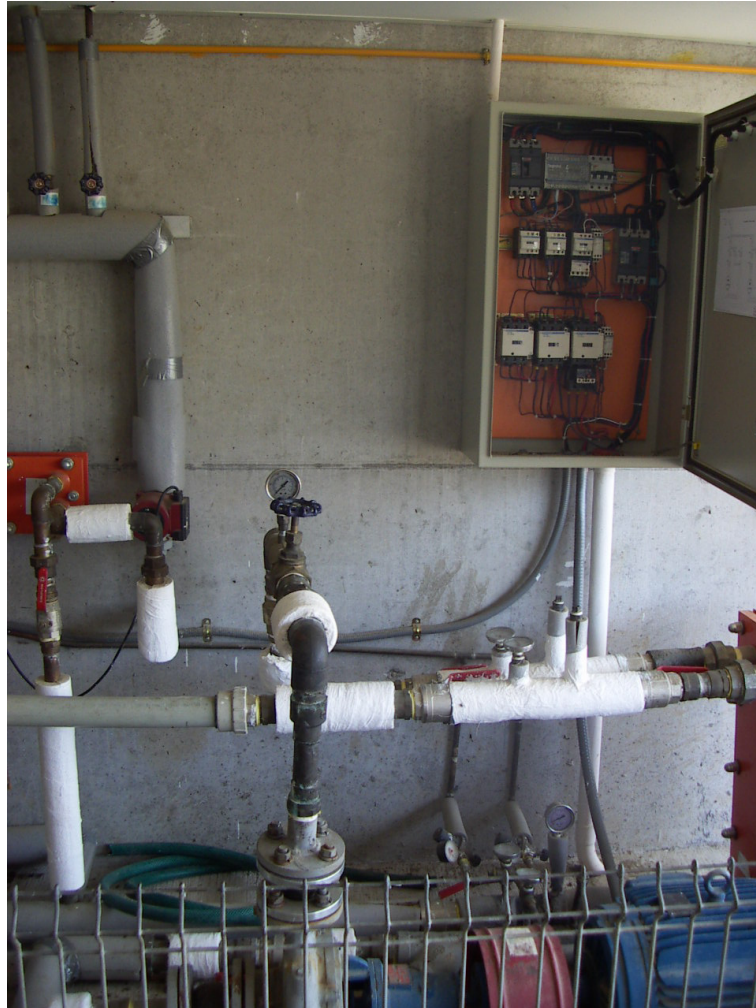


Figura 3.28: Continuación de la instalación, Fuente [14]

En la figura 3.30 se muestra la distribución general del resto de las calderas, donde solo se encuentra el sistema secundario con el sistema de calefacción solar.



Figura 3.29: Imagen del sistema instalado, Fuente [14]

En la figura 3.31 se muestra el intercambiador de calor de serpentín, en la parte inferior se aprecia la bomba de recirculación y a un costado el estanque atmosférico, en la figura 3.14 se muestra el dosificador con sus distintas conexiones hacia y desde los calefactores.

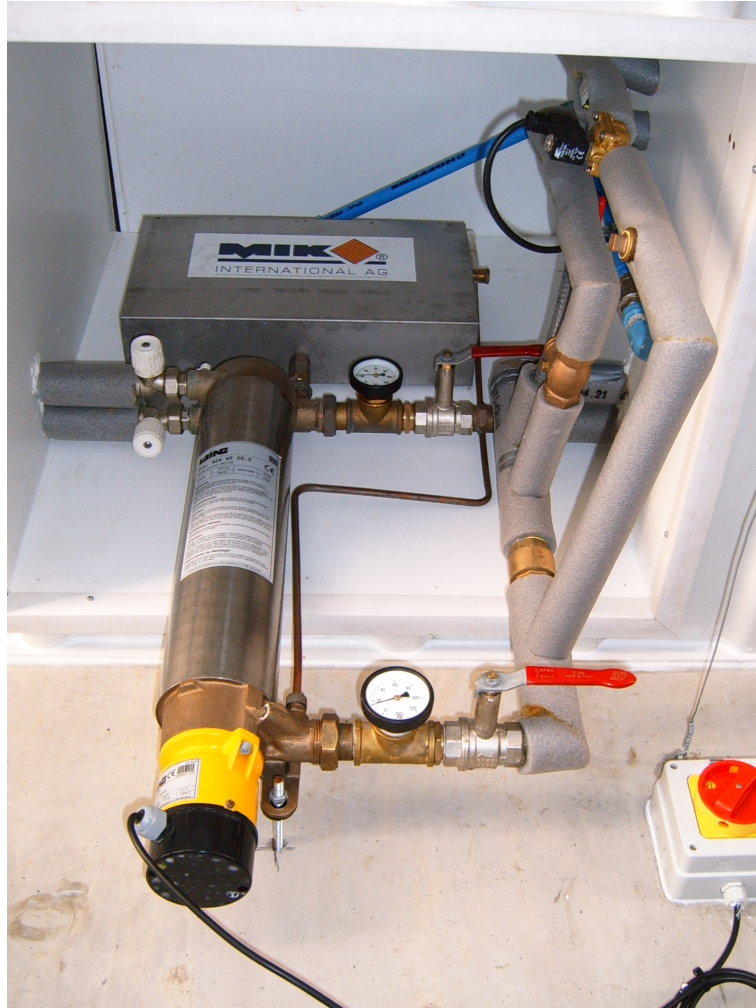


Figura 3.30: IQ de serpentín junto con sus componentes, Fuente [14]

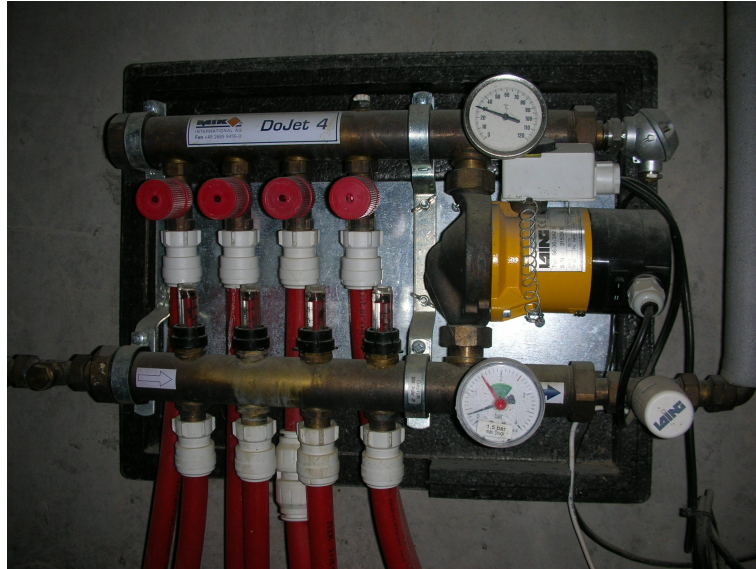


Figura 3.31: Dosificador junto con sus conexiones, Fuente [14]

Capítulo 4

Simulaciones

Las simulaciones que se realizan son las siguientes

- Circuito primario con circuito de acumulación del secundario, estanques conectados en cascada térmica. Con esta simulación se busca mostrar gráficamente el comportamiento térmico de los estanques de acumulación, la energía disponible que se tiene y el tiempo que se demora el sistema solar en alcanzar temperaturas utilizables, además se analiza la temperatura de descarga del arreglo de colectores solares
- Circuito primario con circuito de acumulación del secundario, estanques conectados en paralelo. El análisis es el mismo que en el caso anterior, con la diferencia de la conexión entre los estanques. Con esta simulación se busca lo mismo que en el caso anterior, luego se tienen 2 casos comparables, por lo que se procede a analizar los pros y los contras de cada configuración.
- Circuito primario con totalidad del circuito secundario, estanques conectados en cascada térmica. Se analizan las temperaturas que se alcanzan en el intercambiador de calor secundario.
- Circuito primario con totalidad del circuito secundario, estanques conectados en paralelo. Se realiza un análisis similar al anterior, para luego comparar ambas situaciones
- Circuito de calefacción solar interviniendo directamente en serie el circuito de calefacción y en paralelo el circuito de caldera, todo esto con lógica de control. Con esta simulación se busca encontrar problemas térmicos que dejan sin funcionamiento el sistema solar.

En cada caso, se muestra una imagen del esquema utilizado en el programa Simusol para realizar la simulación. Mayores detalles de como se implementa el esquema se pueden ver en el [Anexo A].

4.1. Circuito primario con circuito de acumulación del secundario, estanques conectados en cascada térmica

La totalidad del circuito primario con el secundario de acumulación se aprecia en la figura 4.1

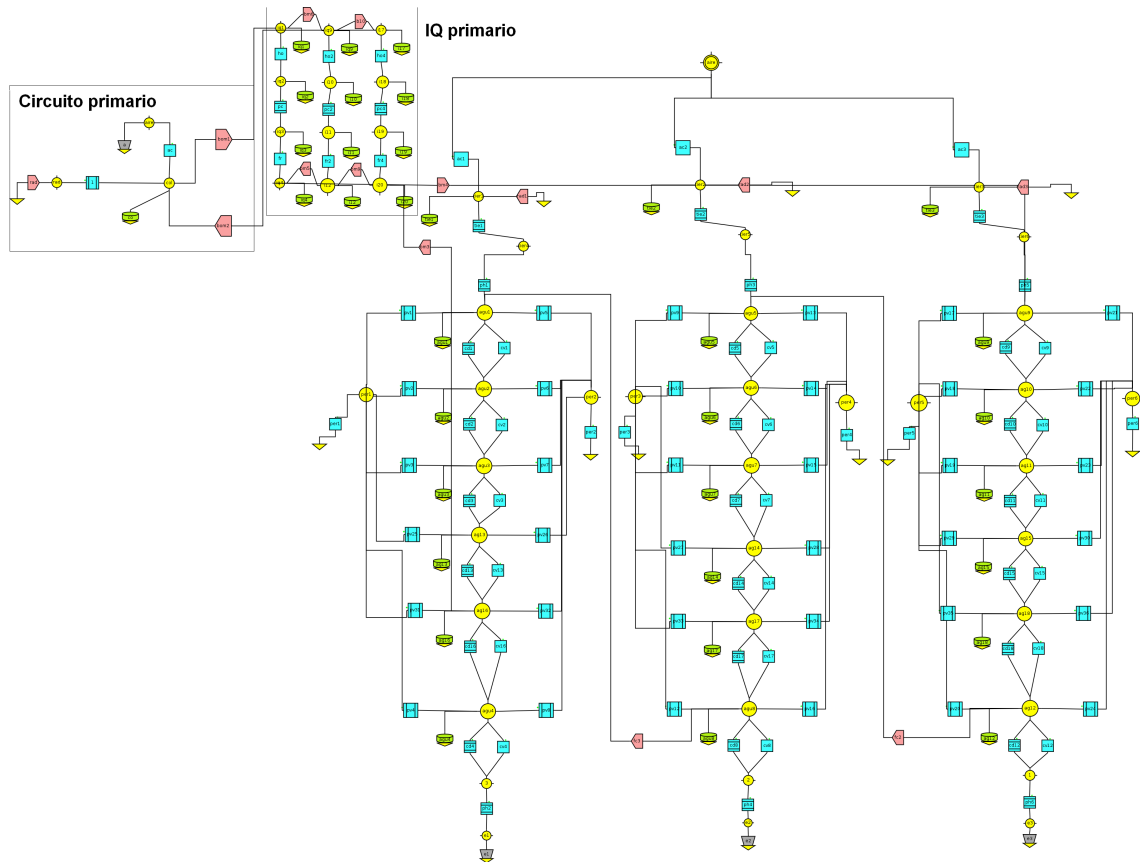


Figura 4.1: Totalidad del circuito primario con el secundario de acumulación, conexión en cascada térmica

Las simulaciones se realizan en 3 días distintos del año, los solsticios de verano e invierno y el equinoccio de otoño. A continuación se muestran los resultados obtenidos en los distintas fechas.

- Diciembre

El análisis se realiza considerando la radiación incidente del 21 de Diciembre. En la figura 4.2 se muestra la temperatura de descarga del arreglo de colectores solares durante el día.

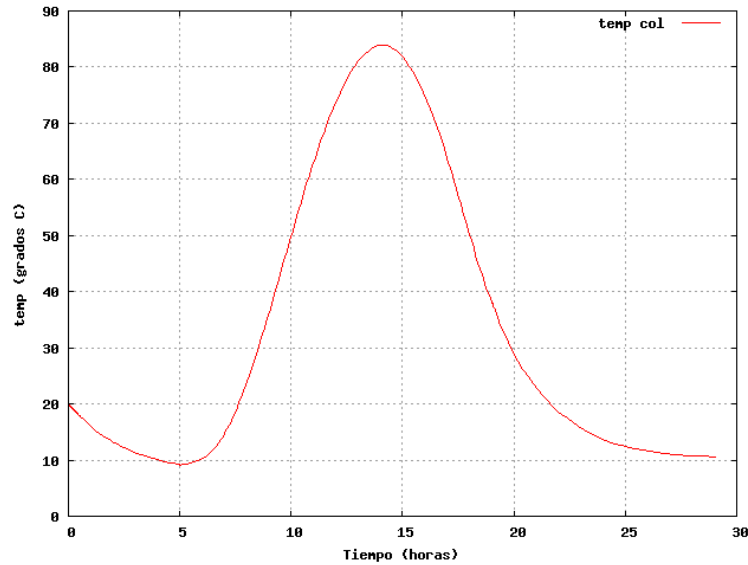


Figura 4.2: Temperatura alcanzada por el arreglo de colectores en Diciembre

La máxima temperatura alcanzada por el arreglo de colectores es de 85 [°C], partiendo desde una temperatura de 20 [°C]. En un principio la temperatura desciende debido a que no hay radiación incidente, luego las pérdidas por convección sobre el arreglo hacen descender la temperatura. El total de la energía se transfiere al sistema de acumulación del secundario a través del intercambiador de calor de placas.

Las temperaturas alcanzadas en los distintos volúmenes de control de los estanques se pueden apreciar en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5. La figura 4.3 muestra la temperatura del estanque frío, la figura 4.4 la del estanque tibio y la figura 4.5 muestra la temperatura del estanque caliente.

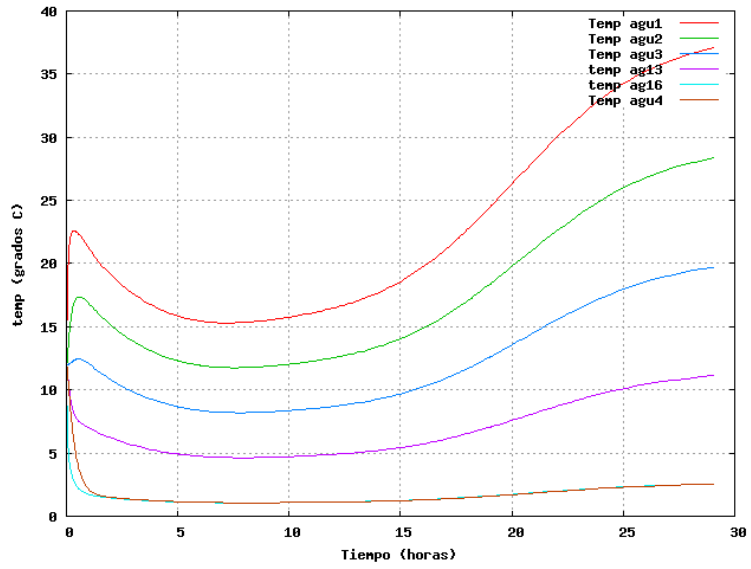


Figura 4.3: Temperatura estanque frío en Diciembre, conexión de estanques en cascada térmica

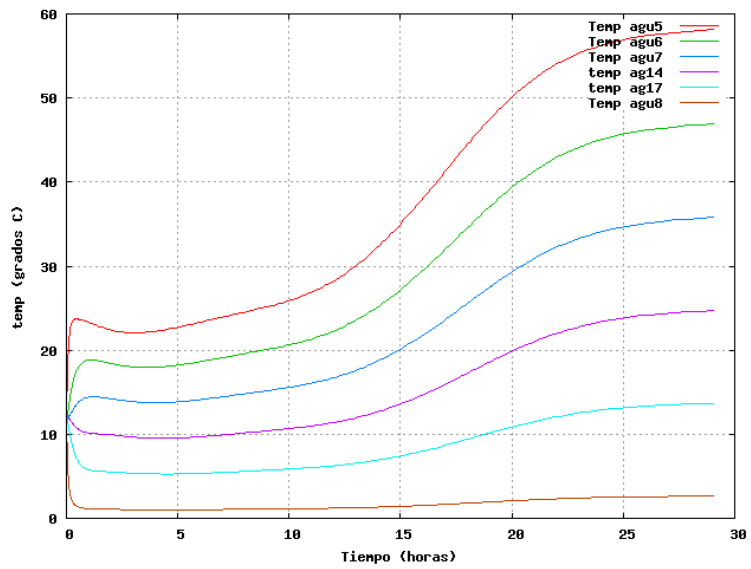


Figura 4.4: Temperatura estanque tibio en Diciembre, conexión de estanques en cascada térmica

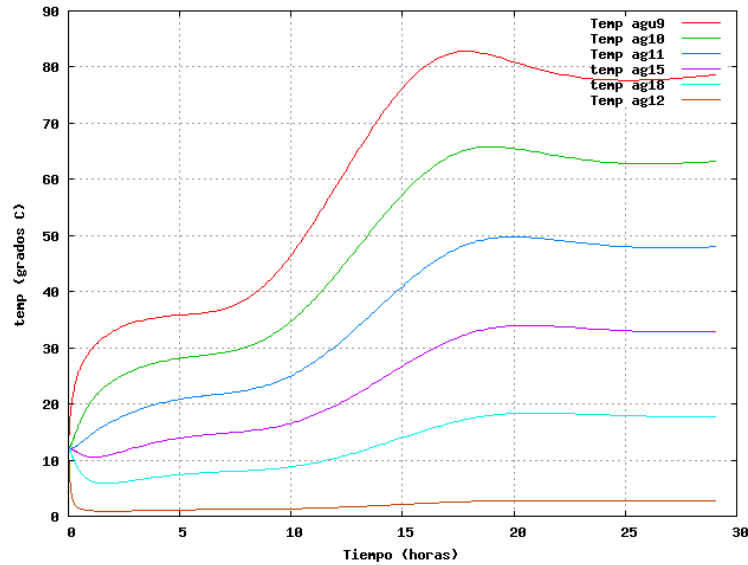


Figura 4.5: Temperatura estanque caliente en Diciembre, conexión de estanques en cascada térmica

En la figura 4.5 se aprecia que la temperatura máxima alcanzada en el estanque caliente es de 80 [°C] aproximadamente. La temperatura desciende a medida que aumenta la profundidad en el estanque, este comportamiento se aprecia en todos los estanques, luego esto confirma el hecho de que se logra la estratificación del fluido. Al tener la conexión en cascada térmica, se tiene una clara diferenciación de las temperaturas en los estanques, siendo el de mayor temperatura el estanque en el que se realiza la inyección del fluido proveniente del intercambiador de calor. El estanque de menor temperatura es en el que se realiza la extracción del fluido y que circula hacia el intercambiador de calor.

Dado que el sistema solar entrega energía sobre los 55 [°C], se calcula la energía disponible una vez terminada la simulación. La energía disponible considera la energía de los volúmenes de control que al finalizar el día alcanzan una temperatura superior a los 55 [°C]. En la figura 4.6 se aprecia una figura del total de energía durante el día.

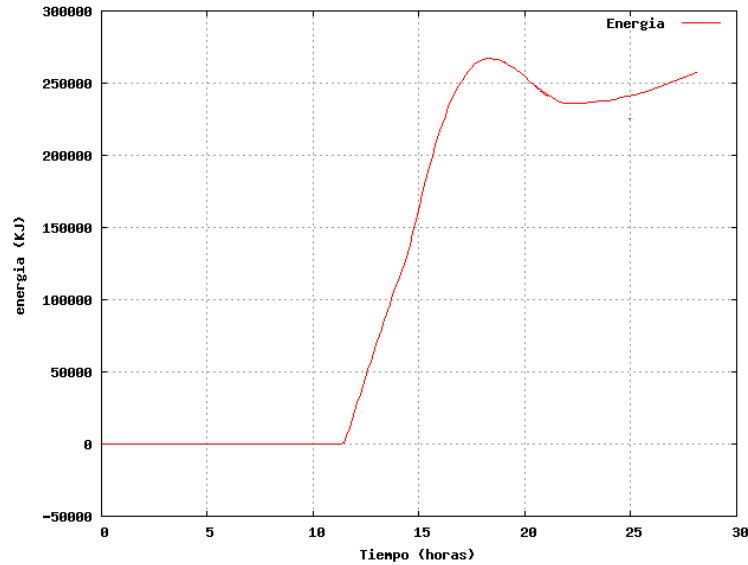


Figura 4.6: Energía acumulada en los estanques al finalizar la simulación en Diciembre, conexión en cascada térmica

La máxima energía en los estanques se alcanza en un desfase de 3 horas respecto a la máxima temperatura alcanzada por el arreglo de colectores. El máximo de energía es de 265000 [kJ], lo que equivale a 74 [kWh] y luego desciende. El descenso de energía se produce por la estabilización de temperaturas en los estanques, ya que se sigue produciendo un intercambio térmico entre los distintos volúmenes de control. Al finalizar la simulación, sólo el estanque caliente tiene energía suficiente para entregar al sistema de distribución.

El sistema solar alcanza temperaturas utilizables en 12 [hr].

- Marzo

El análisis se realiza considerando la radiación incidente del 21 de Marzo. En la figura 4.7 se muestra la temperatura del colector solar durante el día

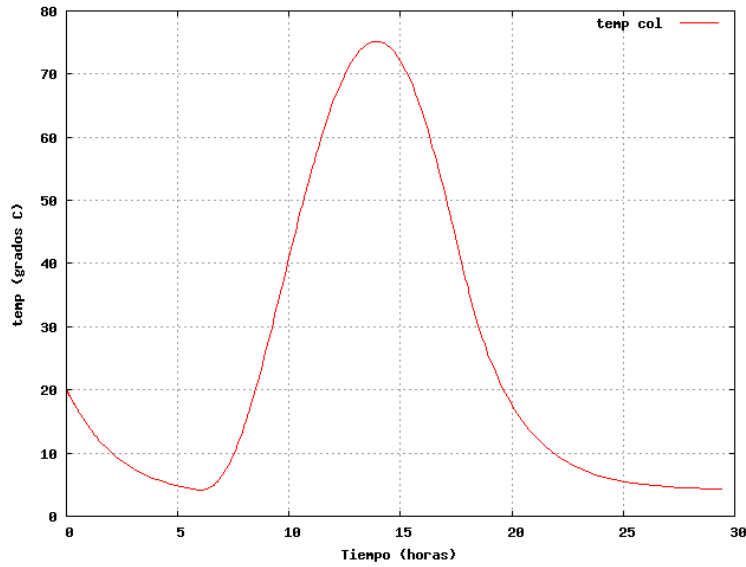


Figura 4.7: Temperatura del arreglo de colectores durante Marzo

La máxima temperatura alcanzada por el arreglo de colectores es de 75 [°C], el comportamiento es análogo al descrito anteriormente.

En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se muestran las temperaturas alcanzadas por los estanques de acumulación.

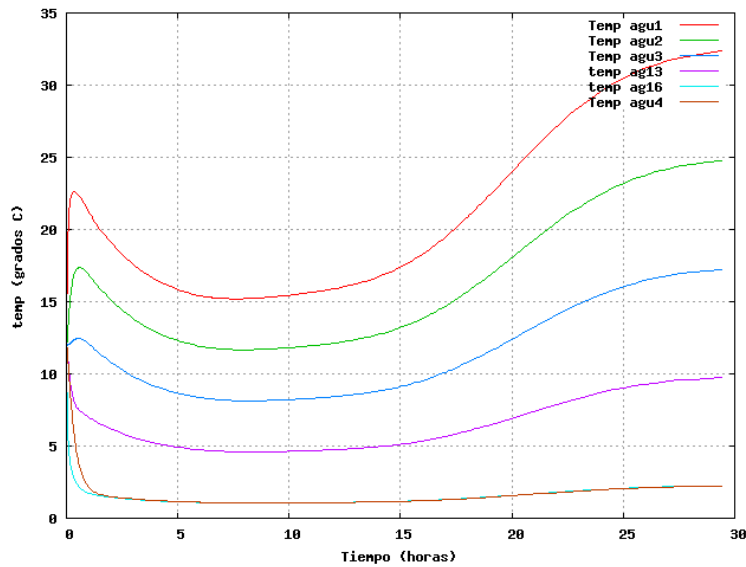


Figura 4.8: Temperatura estanque frío en Marzo, conexión de estanques en cascada térmica

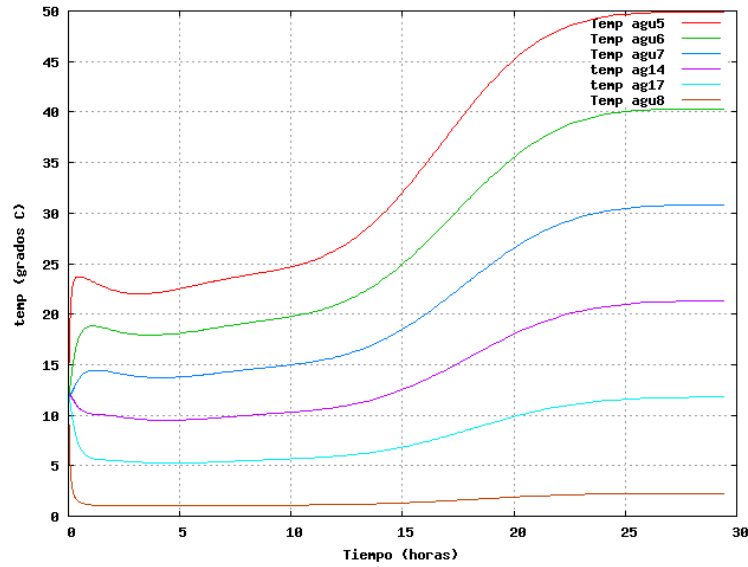


Figura 4.9: Temperatura estanque tibio en Marzo, conexión de estanques en cascada térmica

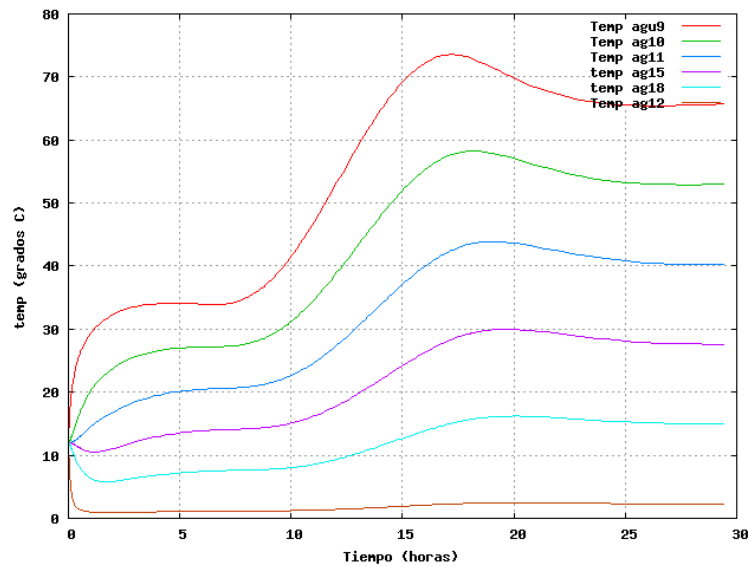


Figura 4.10: Temperatura estanque caliente en Marzo, conexión de estanques en cascada térmica

El comportamiento de los estanques es similar al descrito anteriormente, siendo la máxima temperatura alcanzada de 73 [°C].

En la figura 4.11 se muestra el gráfico de energía obtenido.

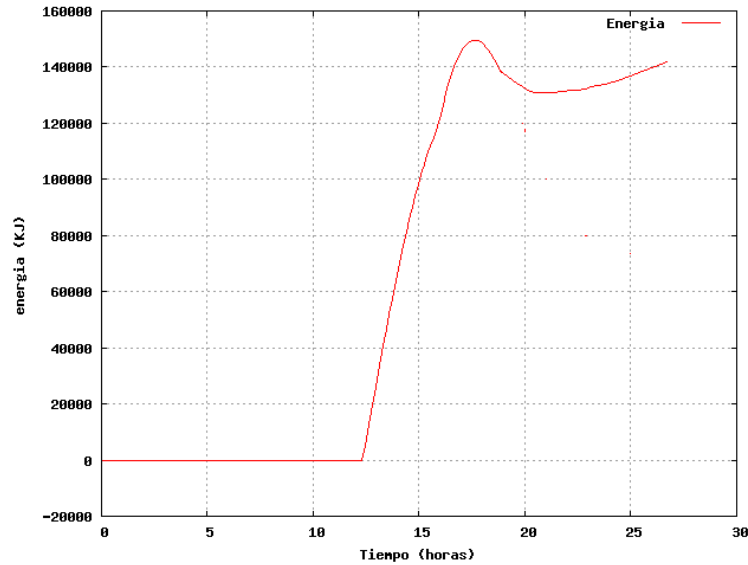


Figura 4.11: Energía acumulada en los estanques al finalizar la simulación en Marzo, conexión en cascada térmica

En este caso, el máximo de energía es de 148000 [kJ], lo que equivale a 41 [kWh], y luego presenta el mismo comportamiento observado anteriormente debido a la estabilización del fluido en los estanques.

El sistema solar alcanza temperaturas utilizables en 13 [hr].

■ Junio

El análisis se realiza considerando la radiación incidente del 21, 22 y 23 de Junio. En la figura 4.12 se muestra la temperatura del colector solar durante los días. En un principio hay un gran aumento de temperatura, pero en los siguientes días el aumento es menor, esto se debe a la pérdida de rendimiento del colector solar debido al ingreso del agua a mayor temperatura.

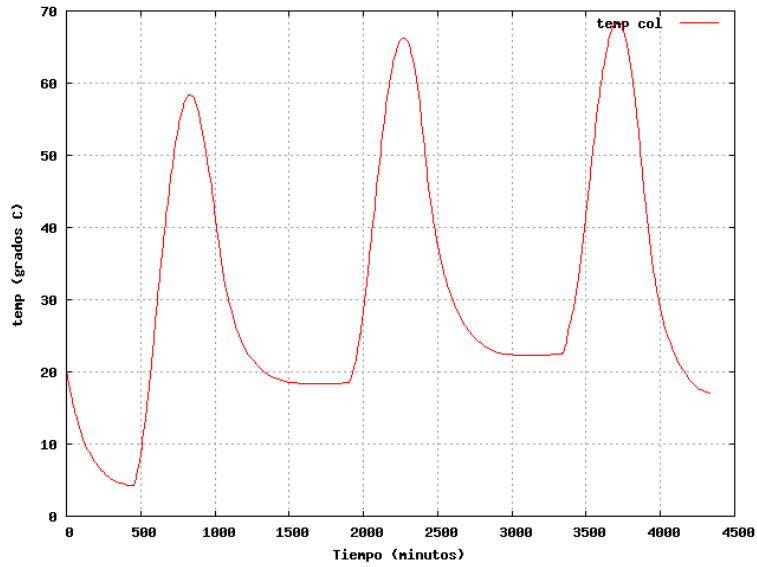


Figura 4.12: Temperatura del arreglo de colectores durante 3 días de Junio

En Junio se realiza un análisis de mayor duración debido a la poca radiación incidente, luego en un día no se alcanzan temperaturas adecuadas para el funcionamiento del sistema solar. En el caso de tener los estanques conectados en cascada térmica, la simulación se realiza durante 2 días, tiempo en el cual alcanza temperaturas utilizables.

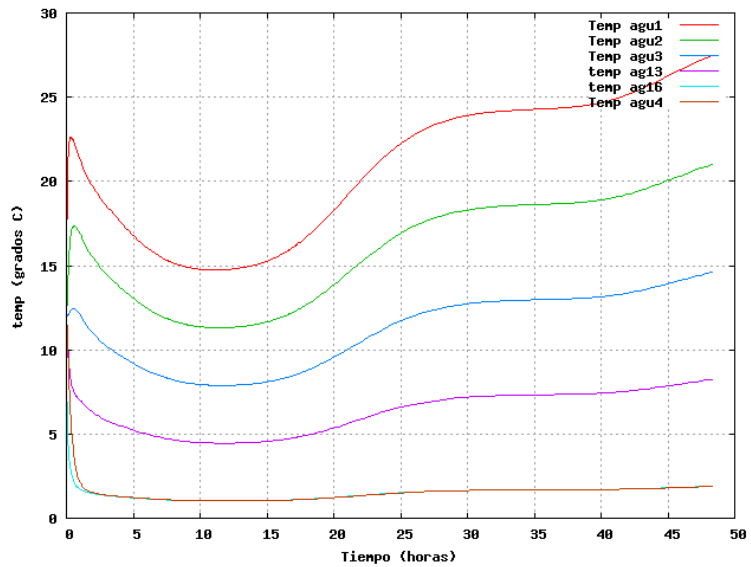


Figura 4.13: Temperatura estanque frío en Junio, conexión de estanques en cascada térmica

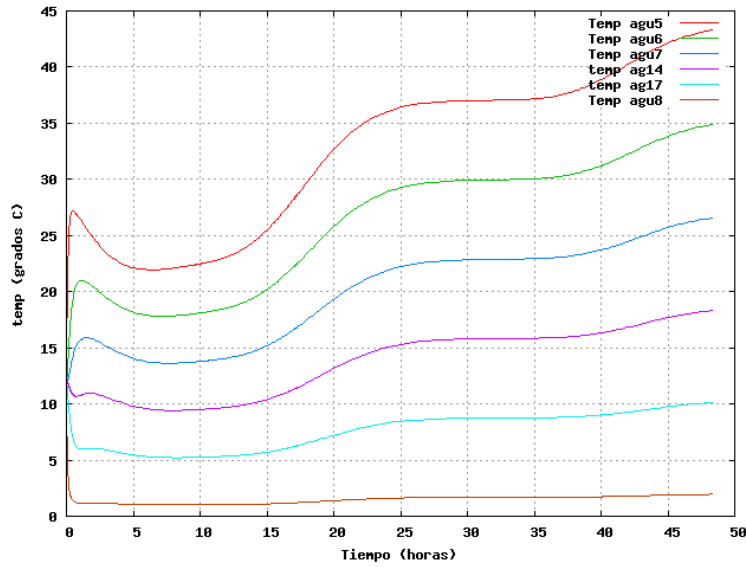


Figura 4.14: Temperatura estanque tibio en Junio, conexión de estanques en cascada térmica

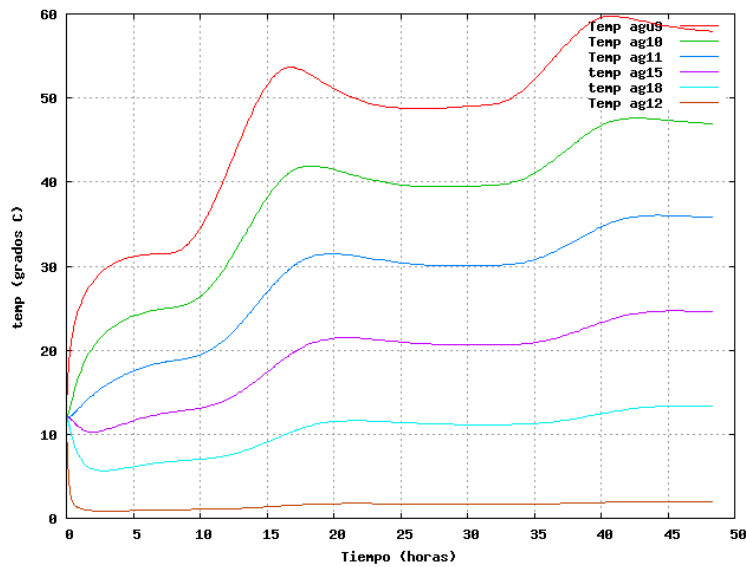


Figura 4.15: Temperatura estanque caliente en Junio, conexión de estanques en cascada térmica

La temperatura en los distintos volúmenes de control tiene un comportamiento similar a los casos anteriores. Como la simulación se realiza durante 2 días, se aprecia mejor como se va acumulando la energía en los estanques. Nuevamente se tiene una clara diferenciación en las temperaturas de cada estanque, siendo la temperatura máxima de 60 [°C] en el estanque caliente.

A medida que avanzan los días, el aumento de temperatura por día es menor, esto está directamente relacionado con las temperaturas alcanzadas por el arreglo de colectores, el cual ve afectado su

rendimiento debido al ingreso del agua a mayor temperatura.

En la figura 4.16, se muestra la energía alcanzada al finalizar el segundo día de la simulación.

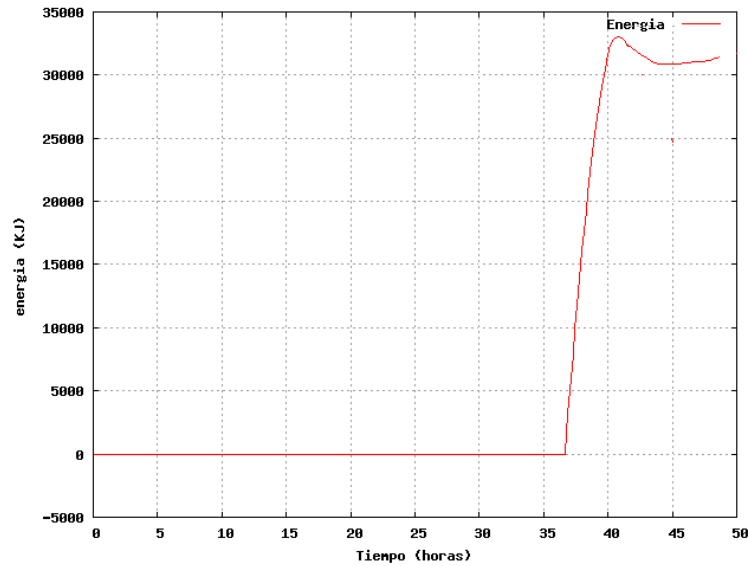


Figura 4.16: Energía acumulada en los estanques durante 2 días de Junio, conexión en cascada térmica

La energía acumulada en los estanques es de 33000 [kJ], lo que equivale a 10 [kWh] y presenta el mismo comportamiento analizado anteriormente. El sistema solar alcanza temperaturas utilizables en 37 [hr].

4.2. Circuito primario con circuito de acumulación del secundario, estanques conectados en paralelo

Dado que se quieren analizar nuevas formas de acumulación, se simula el circuito secundario con los estanques de acumulación conectados en paralelo. El esquema de la conexión en paralelo se aprecia en la figura 4.17

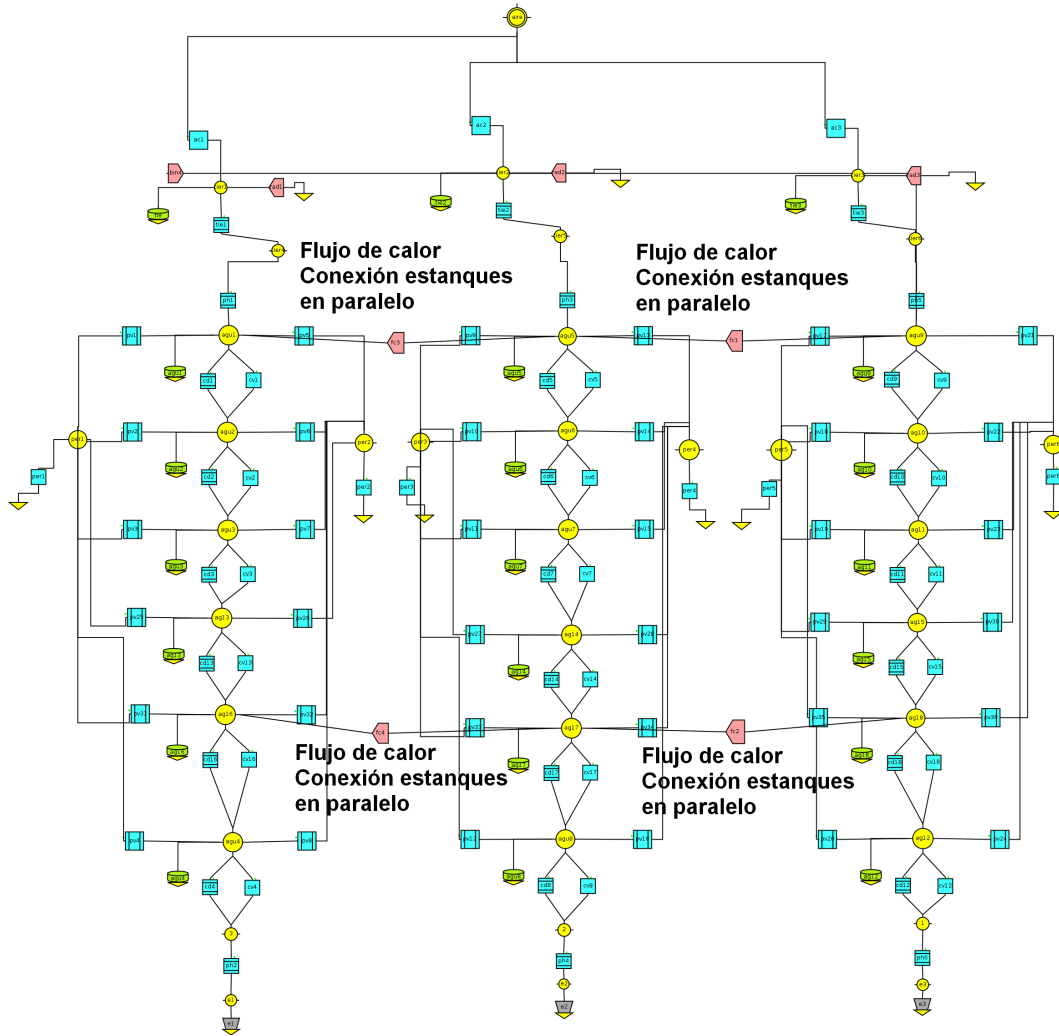


Figura 4.17: Conexión de estanques en paralelo

Como la configuración de los estanques no influye en la temperatura alcanzada por el arreglo de colectores, en esta sección sólo se analizan las temperaturas alcanzadas en los estanques. Los gráficos de temperatura del arreglo de colectores serían los mismos en el caso de tener los estanques conectados en cascada térmica o en paralelo.

Nuevamente se realizan simulaciones en el equinoccio de Marzo y en los solsticios de verano e invierno.

- Diciembre

En las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se muestran las temperaturas de los estanques de acumulación.

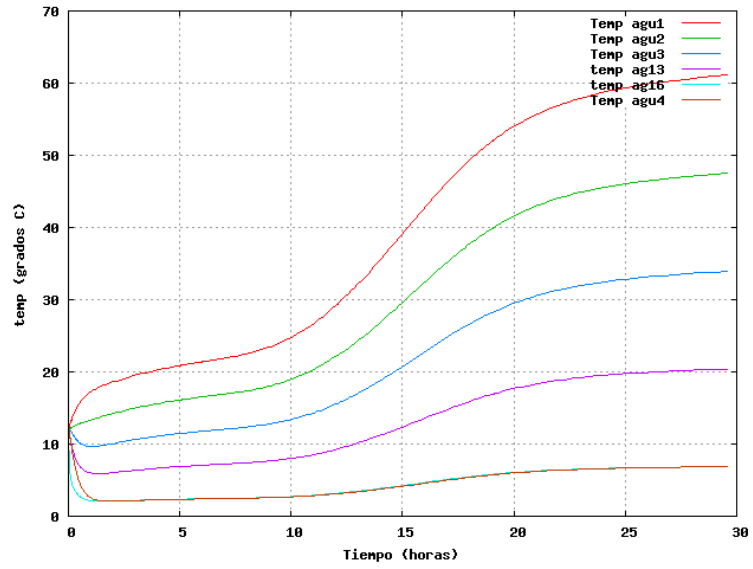


Figura 4.18: Temperatura estanque frío en Diciembre, conexión de estanques en paralelo

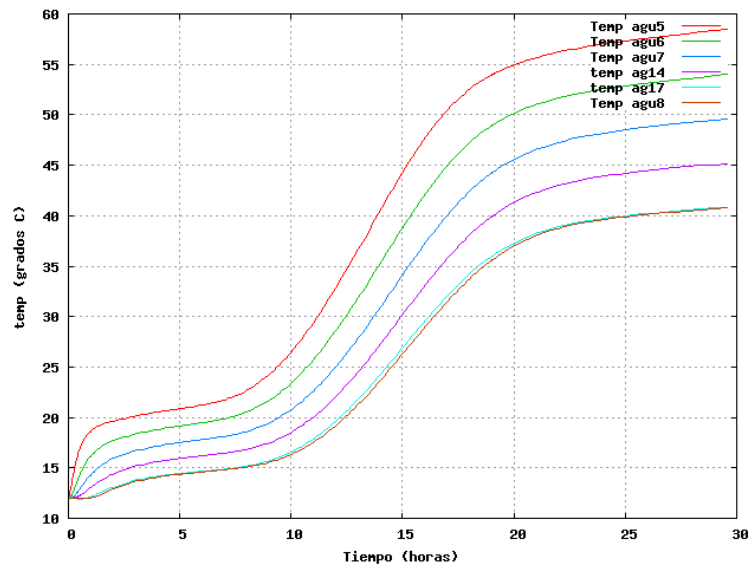


Figura 4.19: Temperatura estanque tibio en Diciembre, conexión de estanques en paralelo

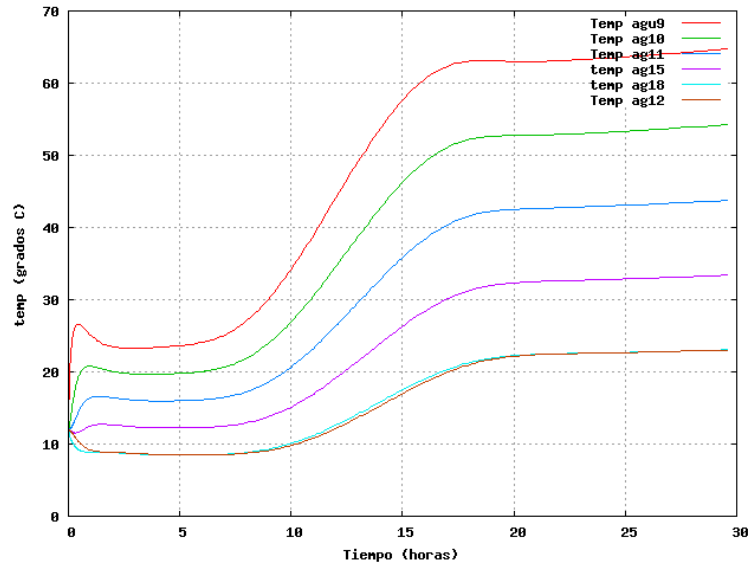


Figura 4.20: Temperatura estanque caliente en Diciembre, conexión de estanques en paralelo

En este caso no se tiene una diferenciación de las temperaturas de los estanques, sino que los 3 estanques tienen perfiles de temperatura similares. El máximo de temperatura es de 63 [°C] y se alcanza en el estanque donde se realiza la inyección del fluido. En el siguiente estanque se tienen 58 [°C] y en el último estanque se alcanzan 63 [°C] nuevamente.

Al aumentar la profundidad en los estanques se aprecia la disminución de la temperatura en los volúmenes de control, esto da cuenta que nuevamente se logra la estratificación en los estanques.

La energía acumulada al final del día se aprecia en la figura 4.21

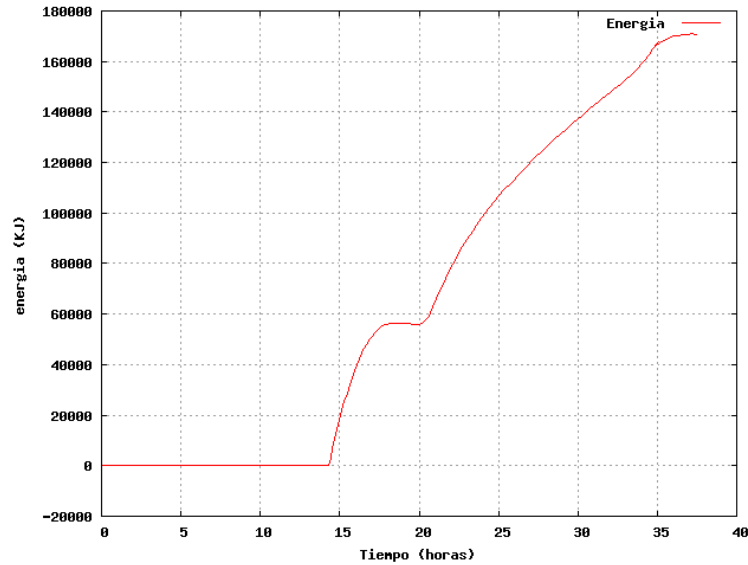


Figura 4.21: Energía acumulada en los estanques después de un día de Diciembre

En esta caso la energía acumulada es de 160000 [kJ], lo que equivale a 45 [kWh] y los 3 estanques alcanzan temperaturas necesarias para entregar a los consumos.

El sistema solar alcanza temperaturas utilizables en 14,5 [hr].

- Marzo

En Marzo se realiza la simulación durante 2 días, ya que al finalizar el primer día la máxima temperatura alcanzada en los estanques es de 53 [°C], por lo que no había energía disponible en el circuito de acumulación.

En las figuras 4.22, 4.23 y 4.24 se aprecian las temperaturas de los estanques.

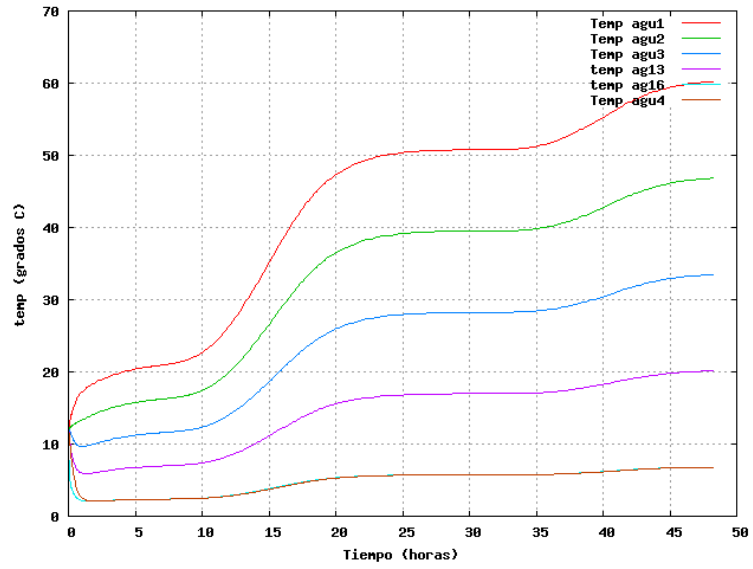


Figura 4.22: Temperatura estanque frío en Marzo, conexión de estanques en paralelo

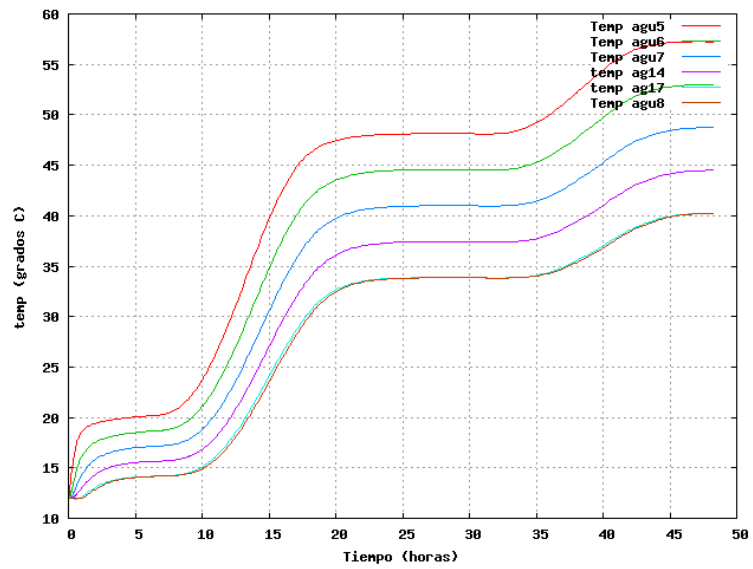


Figura 4.23: Temperatura estanque tibio en Marzo, conexión de estanques en paralelo

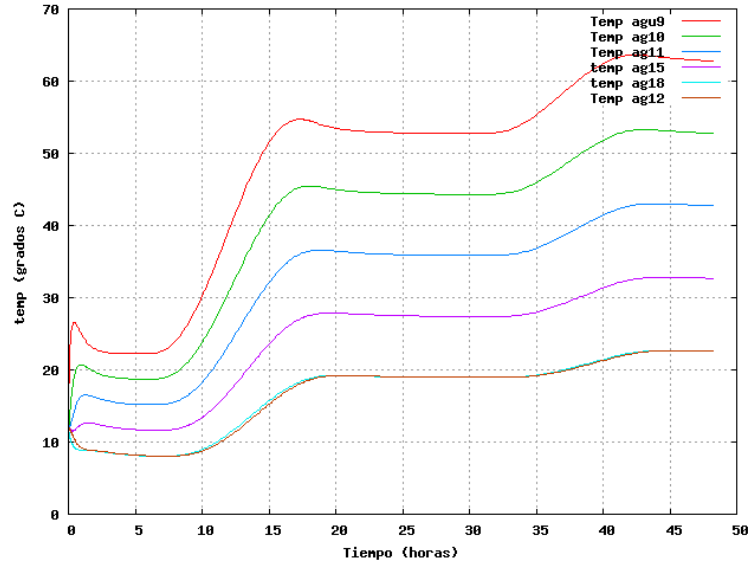


Figura 4.24: Temperatura estanque caliente en Marzo, conexión de estanques en paralelo

Al finalizar el segundo día, se logra una temperatura máxima de 63 [°C] en el estanque caliente, en el estanque medio se alcanzan los 58 [°C] y en el estanque frío se alcanzan los 60 [°C]. El comportamiento del fluido en los estanques es análogo al caso anterior, lográndose la estratificación en cada estanque y con perfiles similares entre ellos, siendo las temperaturas alcanzadas en cada estanque muy parecidas.

En la figura 4.25 se aprecia el gráfico de energía alcanzada al final del segundo día.

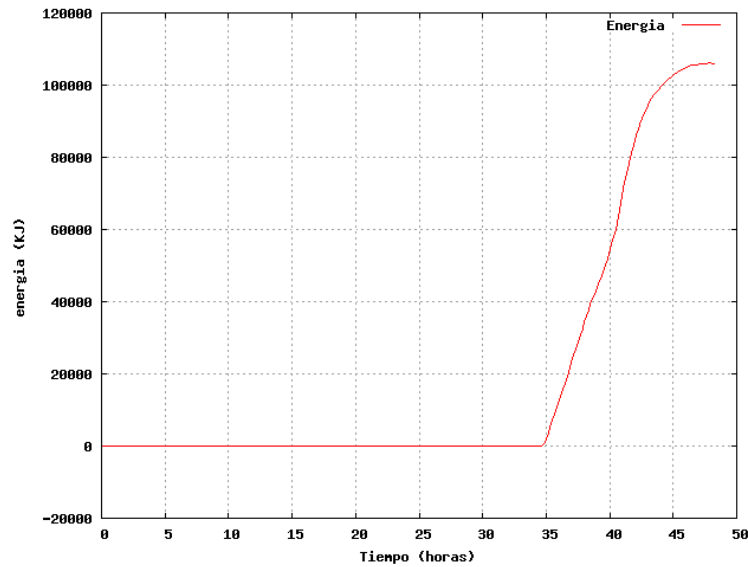


Figura 4.25: Energía acumulada en los estanques después de 2 días de simulación

La energía acumulada al final del segundo día es de 108000 [kJ], lo que equivale a 30 [kWh] y el tiempo que se demora el sistema solar en alcanzar temperaturas utilizables es de 35 [hr].

■ Junio

Al igual que en el caso de estanques conectados en cascada térmica, durante Junio la simulación se realiza durante 3 días, en las figuras 4.26, 4.27 y 4.28 se puede apreciar las temperaturas alcanzadas en los estanques.

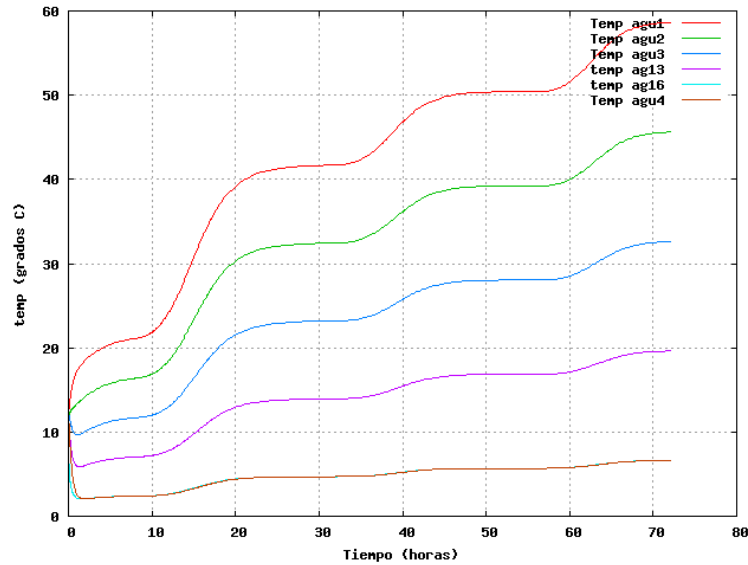


Figura 4.26: Temperatura estanque frío en Junio, conexión de estanques en paralelo

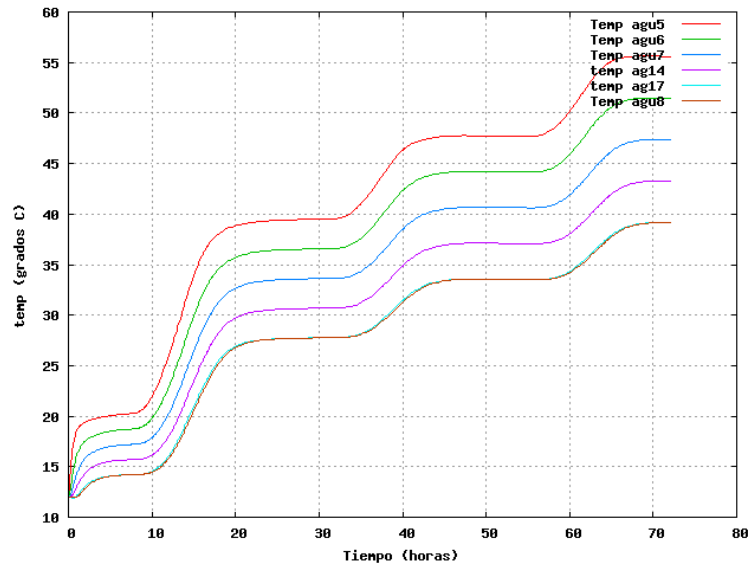


Figura 4.27: Temperatura estanque tibio en Junio, conexión de estanques en paralelo

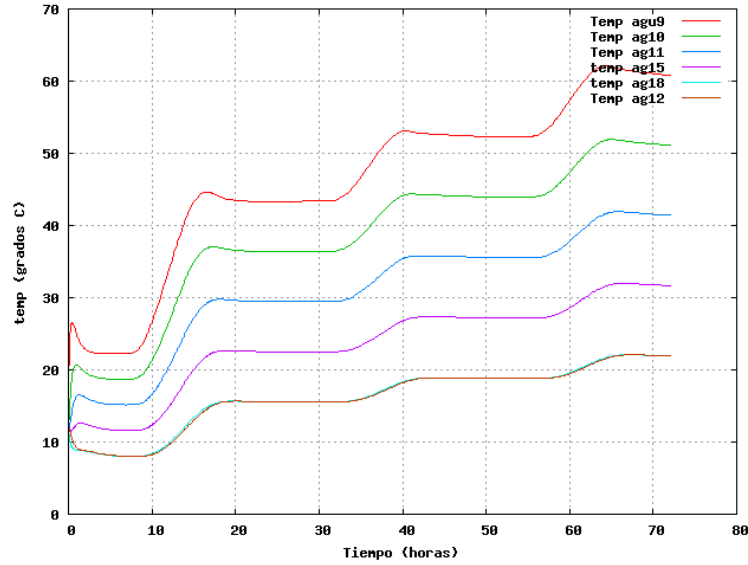


Figura 4.28: Temperatura estanque caliente en Junio, conexión de estanques en paralelo

La temperatura máxima que se alcanza es de 21 [°C], la cual se logra en el estanque caliente. El comportamiento del fluido en los estanques es análogo a los casos anteriormente descritos.

En la figura 4.29 se aprecia el gráfico de energía.

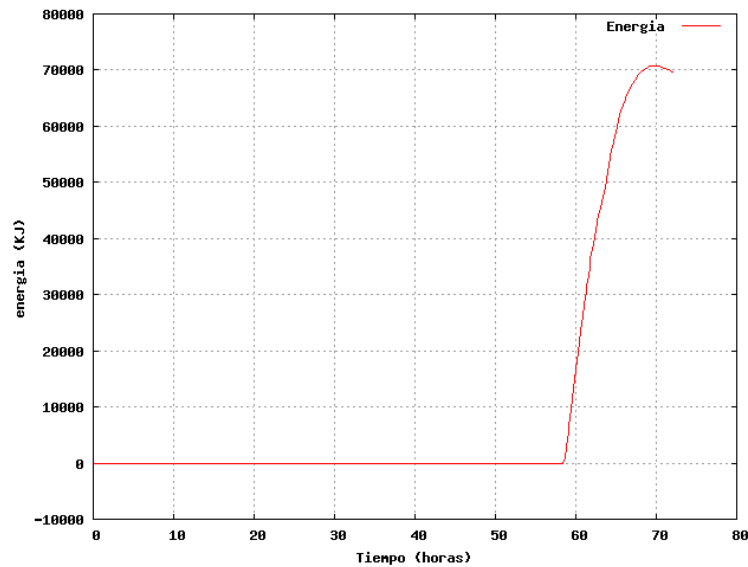


Figura 4.29: Energía acumulada en los estanques durante 3 días de Junio

La energía alcanzada por el sistema al final del tercer día es de 70000 [kJ], lo que equivale a 19.5 [kWh], en este caso el sistema alcanza temperaturas utilizables en 58 [hr] de funcionamiento.

4.3. Circuito primario con totalidad del circuito secundario, estanques conectados en cascada térmica

La totalidad del esquema se muestra en la figura 4.30

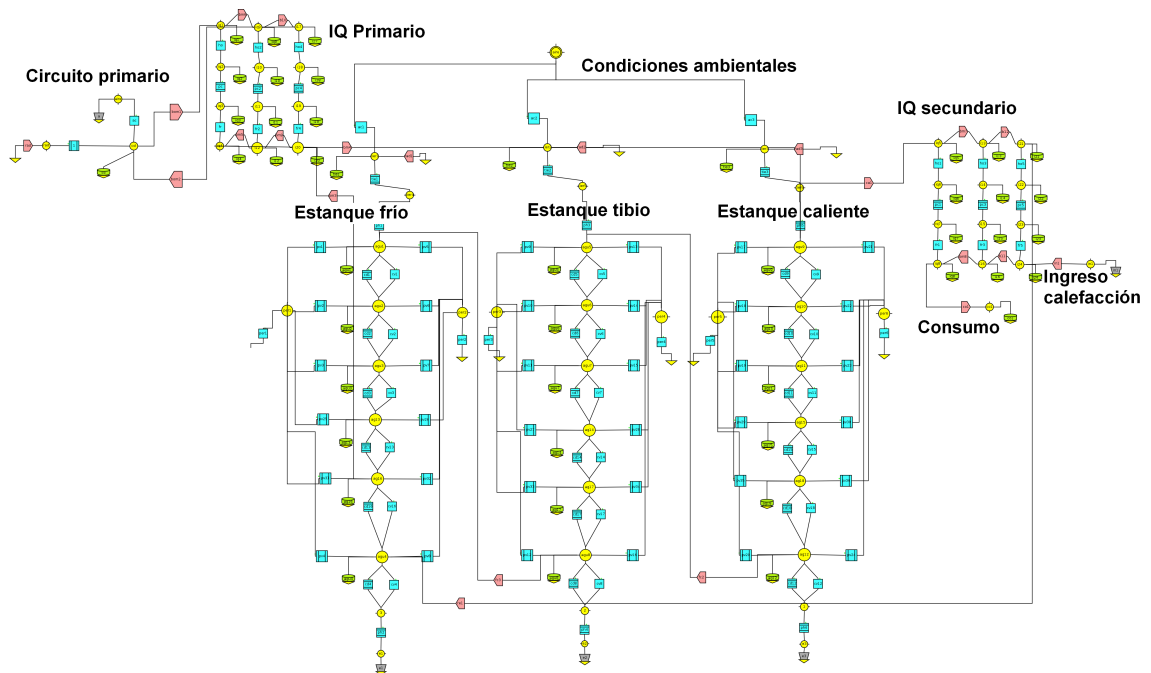


Figura 4.30: Modelo del circuito primario con la totalidad del secundario

Las siguientes simulaciones consisten en ver las temperaturas que se alcanzan en el circuito de calefacción solar, justo en la salida del circuito secundario del intercambiador de calor.

En general las temperaturas de los estanques suelen disminuir en el momento en que hay consumo, pero el comportamiento general de ellos es similar a los casos analizados anteriormente, por lo que sólo se hará énfasis en las temperaturas de entrada del circuito primario y la de salida del circuito secundario del intercambiador de calor.

En la figura 4.31 se aprecia las temperaturas del intercambiador de calor en Diciembre, las de Marzo se pueden ver en la figura 4.32 y las de Junio en la figura 4.33

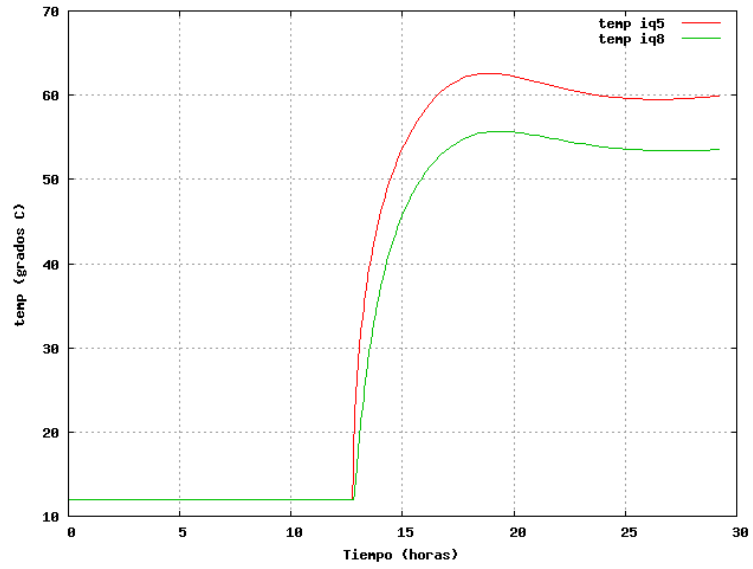


Figura 4.31: Temperaturas del intercambiador de calor secundario durante Diciembre, conexión de estanques en cascada térmica

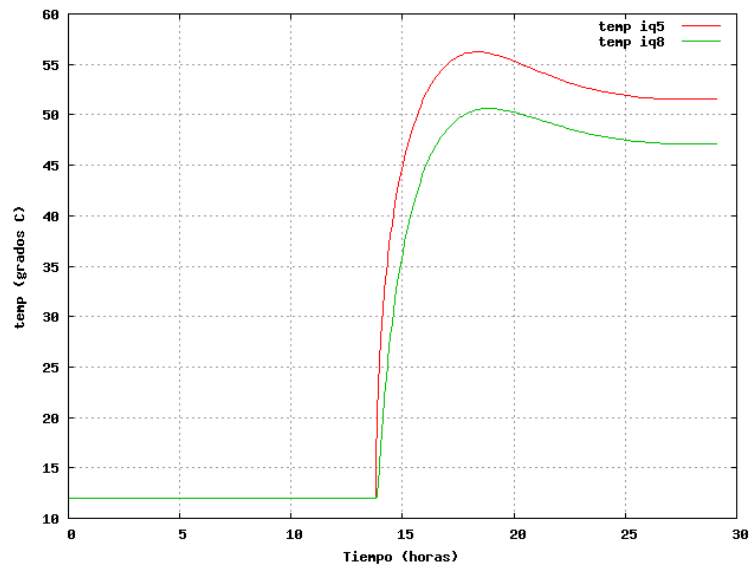


Figura 4.32: Temperaturas del intercambiador de calor secundario durante Marzo, conexión de estanques en cascada térmica

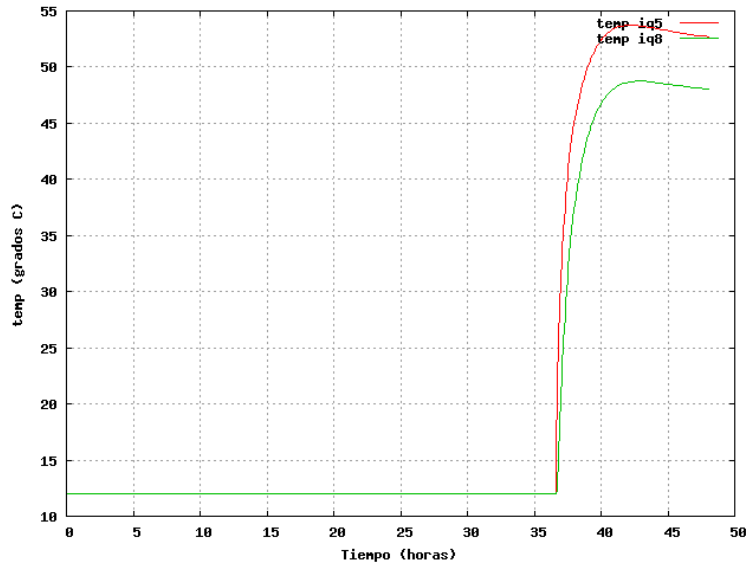


Figura 4.33: Temperaturas del intercambiador de calor secundario durante Junio, conexión de estanques en cascada térmica

Como es de esperar, el tiempo que se demora el sistema solar en alcanzar temperaturas utilizables coincide con el tiempo que se demora el intercambiador de calor secundario en actuar.

Durante Diciembre el circuito primario del intercambiador de calor funciona entre 63 y 60 [°C], por lo que el circuito secundario del intercambiador de calor logra temperaturas de 55 [°C] aproximadamente.

Durante Marzo las temperaturas de trabajo del intercambiador de calor descienden levemente, siendo entre 57 y 52 [°C] en el circuito primario y entre 50 y 48 [°C] en el circuito secundario

Durante Junio la temperatura de trabajo es menor, siendo de 53 [°C] en el circuito primario y de 48 [°C] en el circuito secundario.

4.4. Circuito primario con totalidad del circuito secundario, estanques conectados en paralelo

Igual que en el caso anterior, el análisis se realiza con los estanques conectados en cascada térmica y conectados en paralelo

En este caso se realiza un análisis análogo al anterior, en las figuras 4.34, 4.35 y 4.36 se pueden apreciar las temperaturas en el intercambiador de calor en Diciembre, Marzo y Junio respectivamente.

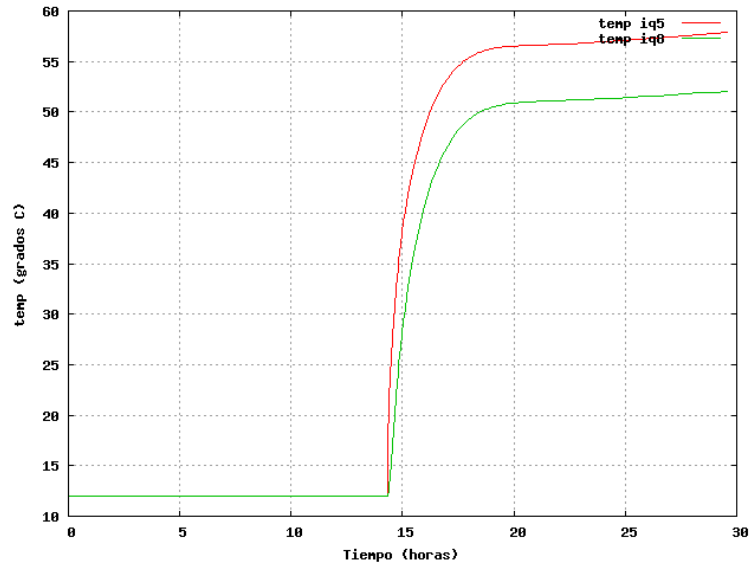


Figura 4.34: Temperaturas del intercambiador de calor secundario durante Diciembre, conexión de estanques en paralelo

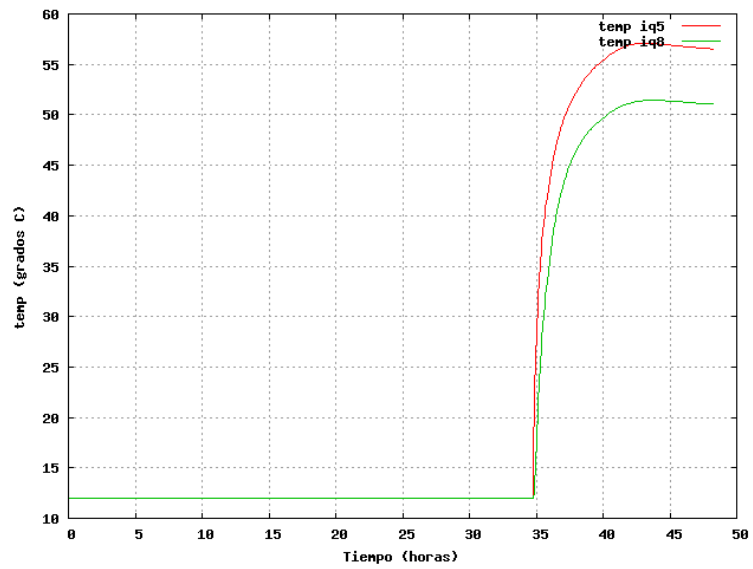


Figura 4.35: Temperaturas del intercambiador de calor secundario durante Marzo, conexión de estanques en paralelo

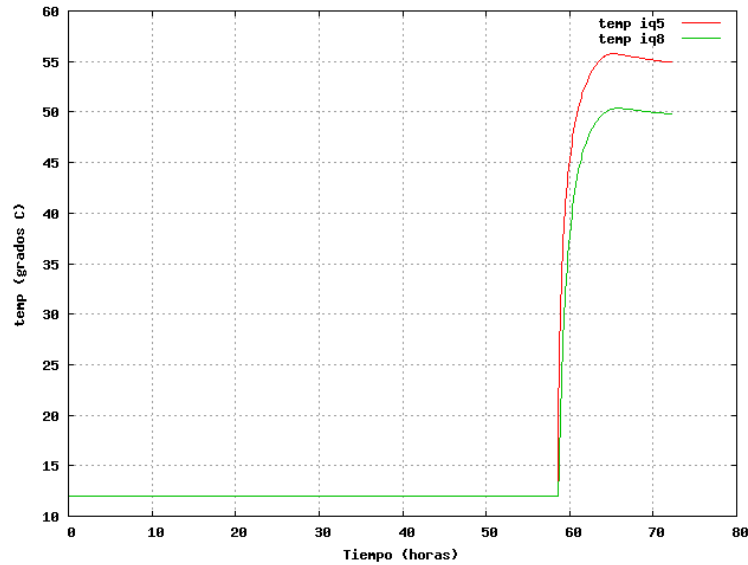


Figura 4.36: Temperaturas del intercambiador de calor secundario durante Junio, conexión de estanques en paralelo

Al tener los estanques conectados en paralelo, se tienen temperaturas de trabajo en el intercambiador de calor similares, siendo la temperatura del circuito primario de 56 [°C] y la del circuito secundario de 50 [°C].

4.5. Intervención del sistema solar

El análisis de la intervención del sistema solar se realiza en estado estacionario, se ocupa una fuente de temperatura constante igual a 50 [°C], esto equivale a la temperatura de accionamiento del sistema solar (55 [°C]) menos una penalización de 5 [°C] dada por el intercambiador de calor que separa los sistemas.

El caso crítico son las maternidades ubicadas en los extremos, las cuales se ubican a una distancia de 60 [m] aproximadamente del intercambiador de calor. Las cañerías que conducen el agua hasta la maternidad son de polipropileno de 3/4" de diámetro nominal.

La caldera se simula como una fuente de temperatura constante de 55 [°C], el intercambiador de calor se simula con 2 volúmenes de control.

El esquema de la totalidad del sistema se aprecia en la figura 4.37

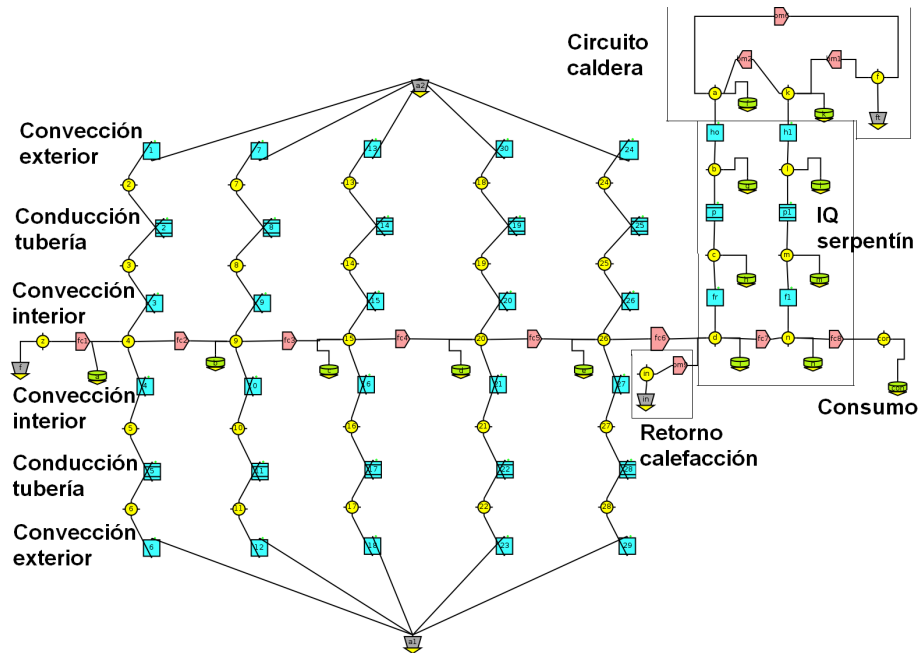


Figura 4.37: Modelo del circuito de caldera junto con intervención solar

El esquema muestra una fuente de temperatura, la cual equivale a la salida del intercambiador de calor del sistema de distribución. Luego se simula la conducción a través de la cañería, esto se realiza con 6 volúmenes de control, los cuales reflejan el largo total de la cañería. Al finalizar la cañería, se tiene el intercambiador de calor de serpentín que une el sistema de caldera con el sistema de calefacción de calefactores, en este caso la cañería del sistema solar interviene el circuito secundario del sistema de calefacción y las bombas de circulación del sistema de caldera no se activan.

En la parte superior se tiene el sistema de caldera conectado al circuito primario del intercambiador de calor.

La primera simulación se realiza considerando sólo la intervención del sistema solar. En la figura 4.38 se puede apreciar la temperatura en el tiempo de los distintos nodos. Cada nodo representa una distancia desde el intercambiador de calor. La simulación dura 2 [hr] y se muestra la temperatura del fluido a una distancia de 10, 20, 30, 40 y 50 [m] desde el intercambiador de calor.

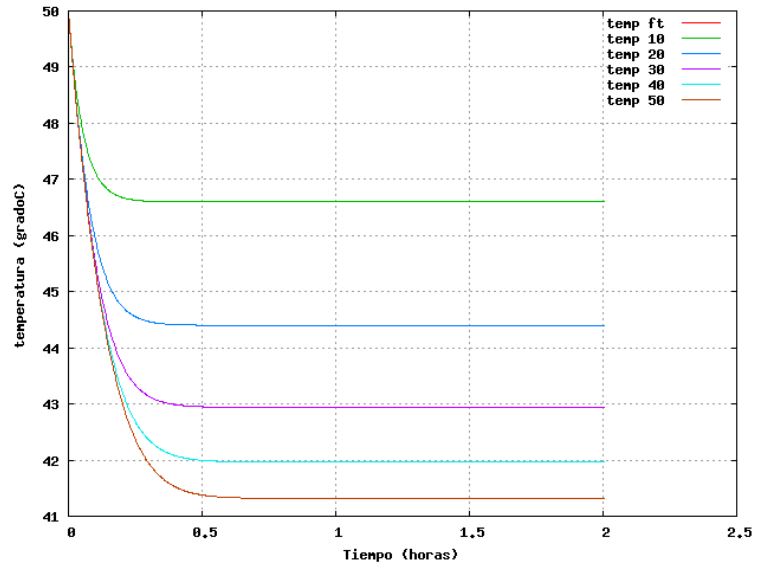


Figura 4.38: Temperaturas obtenidas en circuito de calefacción según la distancia

A una distancia de 50 [m], se tiene una temperatura de 41.3 [°C]

La siguiente simulación se realiza considerando la intervención de la caldera. Como la temperatura máxima requerida en los calefactores es de 42 [°C], se implementa una lógica de control tal que cuando la temperatura a la salida del intercambiador de calor de serpentín sea igual a 42 [°C], la caldera actúe y el circuito de calefacción solar deje de funcionar.

En la figura 4.39 se aprecia el gráfico obtenido.

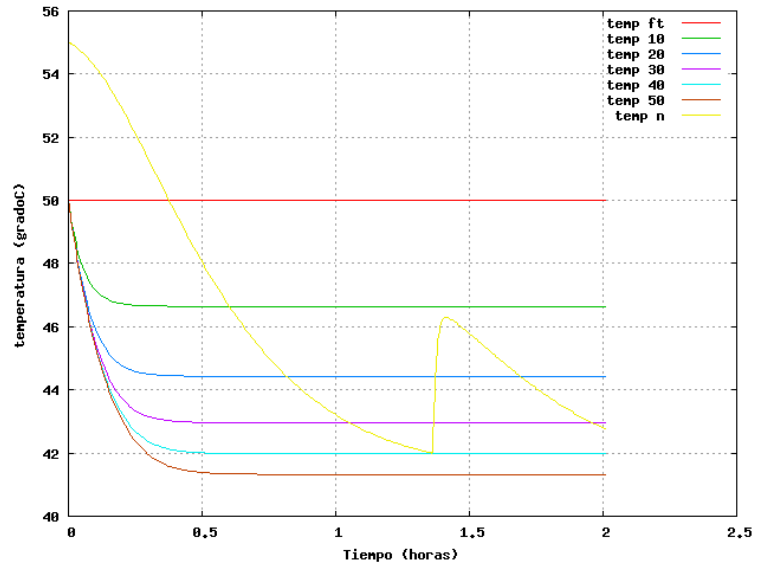


Figura 4.39: Temperaturas obtenidas junto con el sistema de caldera

En el gráfico se ve que la caldera actúa después de 1.3 [hr] de funcionamiento del sistema solar, es decir, el sistema solar no abastece las necesidades energéticas con una temperatura de ingreso de 50 [°C].

Capítulo 5

Análisis de resultados

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones.

5.1. Tiempos de respuesta

En primer lugar se analiza el tiempo de respuesta de los estanques de acumulación, los cuales se resumen en la tabla 5.1

Tabla 5.1: Tiempos de respuesta

| Mes | Tiempo de respuesta [hr] | |
|-----------|--------------------------|-------------------|
| | Conexión cascada térmica | Conexión paralelo |
| Diciembre | 12 | 14.5 |
| Marzo | 13 | 35 |
| Junio | 37 | 58 |

En períodos de gran radiación incidente, se tienen tiempos de respuesta del sistema solar relativamente parecidos, siendo el de la conexión en cascada térmica mayor que en el caso de conexión en paralelo. En el primer caso se tiene un tiempo de respuesta de 12 [hr] y en el segundo caso se tiene un tiempo de respuesta de 14,5 [hr].

En períodos de menor radiación incidente, los tiempos de respuesta varían notoriamente, siendo siempre menores los tiempos cuando se tiene una configuración de estanques conectados en cascada térmica, en Marzo es de 13 [hr] y en Junio es de 37 [hr], en cambio al tener la configuración de estanques en paralelo se tienen tiempos de respuesta de 35 [hr] en Marzo y de 58 [hr] en Junio.

Dado esto se tiene que la configuración de estanques en cascada térmica tiene tiempos de respuesta menores que la configuración en cascada térmica, aunque comparando en períodos en los que existe radiación incidente, en Marzo la diferencia es de 10 [hr] y en Junio también es de 6 [hr]. Cabe recordar que en Marzo como es un equinoccio, el día dura lo mismo que la noche, es decir, cada uno dura 12 [hr], en cambio en

Junio las noches son más largas, teniendo una duración de 14 [hr].

5.2. Energía acumulada

La energía acumulada en cada período se resume en la tabla 5.2

Tabla 5.2: Energía acumulada.

| Mes | Energía acumulada | | | |
|-----------|--------------------------|-------|----------------------|-------|
| | Conexión cascada térmica | | Conexión en paralelo | |
| | [kJ] | [kWh] | [kJ] | [kWh] |
| Diciembre | 265000 | 74 | 170000 | 45 |
| Marzo | 148000 | 41 | 108000 | 30 |
| Junio | 32000 | 10 | 70000 | 19.5 |

En el caso de Marzo, la energía acumulada en la configuración en paralelo corresponde a 2 días, luego para que los datos sean comparables, se considera la energía equivalente una vez que el sistema ha alcanzado temperaturas utilizables. En el caso de estanques conectados en cascada térmica, el tiempo de respuesta es de 12,5 [hr], luego hay una radiación incidente durante 5,5 [hr], lo que equivale a una energía de $10346 \left[\frac{kJ}{m^2} \right]$. En el caso de estanques conectados en paralelo, el tiempo de respuesta es de 35 [hr], luego en las siguientes 2,5 [hr] hay una energía incidente de $10430 \left[\frac{kJ}{m^2} \right]$, luego se considera la simulación de Marzo hasta las 37,5 [hr] de simulación. El mismo procedimiento se aplica en el mes de Junio.

En Diciembre los datos son comparables, ya que los tiempos de simulación son los mismos.

En Diciembre la energía acumulada por la configuración en cascada térmica es notoriamente mayor que en el caso en paralelo, pero revisando las temperaturas de los estanques, se observa que las temperaturas en la configuración en cascada térmica es bastante elevada, por lo que se analizará la energía real que se tiene.

Los calefactores requieren de temperatura exacta, la cual fluctúa entre 37 y 42 [°C], en caso de tener temperaturas más elevadas, antes del conjunto de calefactores existe un dosificador, el cual mezcla el agua caliente con agua tibia para lograr la temperatura exacta. Entre la distribución de agua desde los estanques y el dosificador existe un intercambiador de calor, por lo que el caudal que se extrae de los estanques es el mismo, luego al tener temperaturas sobre los 55 [°C], el aporte real en términos de energía no es significativo, sino que se pierde la energía debido al enfriamiento del fluido en el dosificador.

Dado esto, la energía real que se tiene debe considerar la masa de agua que tiene una temperatura mayor a 55 [°C], independiente de cuan mayor sea esta temperatura, luego la energía real se calcula con la siguiente ecuación.

$$E = m * C_p * \Delta T / 1000 \quad (5.1)$$

donde

- E es la energía en [kJ]
- m es la masa de agua en
- C_p es el calor específico del agua
- ΔT es el delta de temperatura que será igual a 1.

La energía real en cada caso es

Cascada Térmica

- Diciembre: Hay 2 volúmenes de control que tienen temperaturas utilizables, luego se tiene una energía de 13947 [kJ], que equivale a 4 [kWh] .
- Marzo: Nuevamente hay 2 volúmenes de control que tienen temperaturas utilizables, luego se tiene una energía de 13947 [kJ], que equivale a 4 [kWh] .
- Junio: Hay 1 volumen de control que tienen temperaturas utilizables, luego se tiene una energía de 6973 [kJ], que equivale a 2 [kWh]

Paralelo

- Diciembre: Hay 4 volúmenes de control que tienen temperaturas utilizables, luego se tiene una energía de 27895 [kJ], que equivale a 8 [kWh]
- Marzo: A las 37,5 horas de simulación, hay 2 volúmenes de control que tienen temperaturas utilizables, luego se tiene una energía de 13947 [kJ], que equivale a 4 [kWh] .
- Junio: Hay 2 volúmenes de control que tienen temperaturas utilizables, luego se tiene una energía de 13947 [kJ], que equivale a 4 [kWh] .

Los valores se resumen en la tabla 5.3

Tabla 5.3: Energía acumulada real.

| Mes | Energía acumulada real | | | |
|-----------|--------------------------|-------|----------------------|-------|
| | Conexión cascada térmica | | Conexión en paralelo | |
| | [kJ] | [kWh] | [kJ] | [kWh] |
| Diciembre | 13947 | 4 | 27895 | 8 |
| Marzo | 13947 | 4 | 13947 | 4 |
| Junio | 6973 | 2 | 13947 | 4 |

5.3. Utilizabilidad del sistema solar

La temperatura del arreglo de colectores tiene un comportamiento transiente durante el día y durante el año, lo cual se refleja en las distintas temperaturas alcanzadas en Diciembre y en Junio, en los gráficos 5.1, 5.2 y 5.3 se aprecian los intervalos de tiempo en el cual el arreglo de colectores alcanza una temperatura sobre los 55 [°C].

La temperatura de 55 [°C] se elige debido a que es la temperatura con la cual se activa el circuito de distribución del secundario.

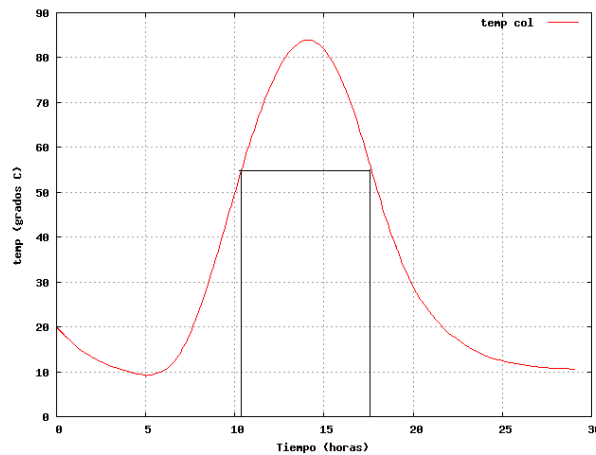


Figura 5.1: Intervalo de tiempo en que el arreglo de colectores supera los 55 [°C] en Diciembre

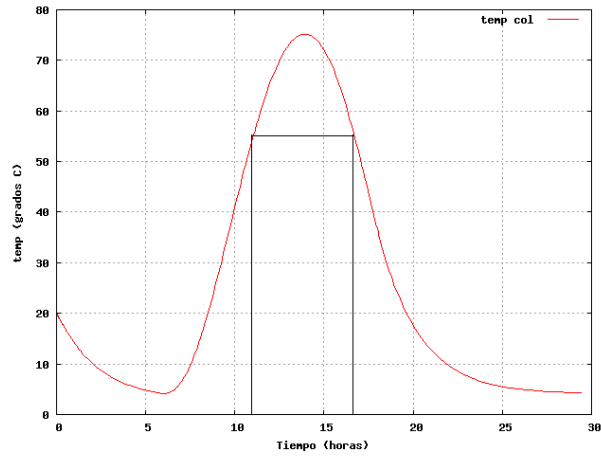


Figura 5.2: Intervalo de tiempo en que el arreglo de colectores supera los 55 [°C] en Marzo

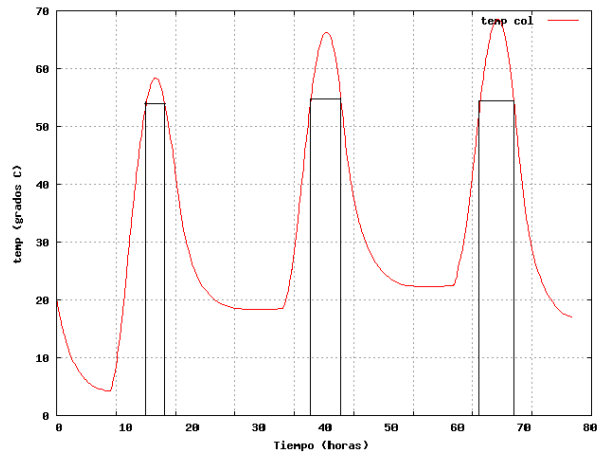


Figura 5.3: Intervalo de tiempo en que el arreglo de colectores supera los 55 [°C] en Junio

En la tabla 5.4, se muestra el resumen de los intervalos de tiempo.

Tabla 5.4: Utilizabilidad del sistema solar

| Mes | Utilizabilidad [hr] |
|-----------|---------------------|
| Diciembre | 8 |
| Marzo | 7 |
| Junio | 2.5 |

Entre Diciembre y Marzo, el tiempo en que el arreglo de colectores alcanza temperaturas sobre 55 [°C] es de 8 [hr], pero en Junio, el tiempo es de 2,5 [hr], lo cual es muy bajo.

La lógica actual del sistema solar es la siguiente

TRANSFORMA → ACUMULA → DISTRIBUYE

La prioridad del sistema solar es acumular energía para luego distribuirla, al utilizar esta lógica se tienen 2 intercambiadores de calor desde que se transforma la energía hasta que se distribuye, considerando que cada intercambiador de calor representa una pérdida de temperatura de 7 [°C] aproximadamente, el arreglo de colectores debe alcanzar temperaturas de 68 [°C] para que exista energía disponible en la distribución. En los meses de verano esta lógica funciona, ya que como se ve los tiempos de utilizabilidad del sistema es de 8 [hr] aproximadamente y el arreglo de colectores alcanza temperaturas de 80 [°C], pero en invierno la temperatura alcanzada después de 3 días de funcionamiento, considerando cielo despejado es de 70 [°C], con una utilizabilidad de 2 [hr], luego el gasto energético relacionado con el funcionamiento de bombas de circulación no compensa el total de energía solar transformada, por lo que es necesario implementar otra lógica de control del sistema solar.

Para evitar pérdidas de temperatura debido a la existencia de intercambiadores de calor, es necesario implementar una lógica más directa, la cual entregue energía al sistema de distribución apenas se cumplan las condiciones de temperatura en el arreglo de colectores. La lógica sería la siguiente

TRANSFORMA → DISTRIBUYE → ACUMULA SI HAY EXCEDENTE

En este caso, entre la transformación de la energía y la distribución, solo existe un intercambiador de calor, ya que se evita el circuito de acumulación. Con esta lógica de funcionamiento, la temperatura del arreglo de colectores debe ser de unos 62 [°C] aproximadamente para lograr temperaturas utilizables en el circuito de distribución, además de que se tiene una bomba de circulación menos al momento de utilizar la energía. En los meses de invierno, la acumulación de la energía será mínima, debido a las temperaturas alcanzadas por el arreglo de colectores, pero en verano, existe la posibilidad de que haya un excedente de energía, el cual se acumularía en estanques, los cuales, debido a una consecuencia directa de la lógica de distribución, serían de menor volumen, ya que la prioridad del sistema solar es distribuir la energía apenas se cumplan las condiciones de temperatura.

El hecho de evitar la acumulación de energía, especialmente en invierno, se debe a las altas temperaturas de funcionamiento del sistema de distribución, siendo ésta de 55 [°C]. Temperaturas menores a 55 [°C] no son utilizables, por lo que no se consideran como energía útil. En el caso de contar con sistemas complementarios, como lo es una caldera modulada, se considera como energía útil cualquier temperatura que se encuentre sobre la temperatura del agua de la red, luego la caldera modulada sólo entrega la diferencia de energía necesaria para lograr la temperatura objetivo. Dado que un criadero de cerdos requiere de procesos de sanitización, la energía acumulada puede ser destinada para estos propósitos, ya que las exigencias de temperatura son menores, siendo del orden de 40 [°C].

En verano se acumula el excedente de energía, luego el estanque de acumulación debe ser dimensionado para que almacene este excedente de energía, el cual puede ser utilizado durante la noche, de tal forma de evitar el consumo de gas licuado la mayor parte del tiempo. La prioridad de la lógica de control sigue siendo satisfacer directamente la demanda de energía, luego se realiza una división de los caudales de tal forma de abastecer la energía necesaria en los consumos y acumular energía en un estanque de acumulación.

En primer lugar, considerando la radiación incidente y la temperatura promedio [Anexo B], se analiza la temperatura media del colector solar plano [Anexo E], cuando la temperatura de descarga del colector es sobre 55 [°C], se tiene energía útil para entregar al consumo, cuando la energía sobrepasa los 60 [°C], se tiene energía útil para entregar al consumo y para acumular, luego en base a esta energía se calcula la masa de agua que se puede almacenar, de tal forma de tener acumulada agua sobre los 55 [°C].

Como se tienen 1408 calefactores, con una potencia optima de 90 [W], la carga térmica del sistema de calefactores es de 127 [kW], considerando el intercambiador de calor existente entre los circuitos, con un rendimiento del 85 %, se tiene una carga térmica a satisfacer de 150 [kW]. Al realizar el balance térmico del colector y calcular el excedente de energía en verano, se estima que con esa energía se pueden calentar 45000 [lt] de agua, lo cual deja en evidencia lo sobredimensionado que se encuentra el sistema solar.

5.4. Distribución de energía

En esta parte se analizan las temperaturas alcanzadas en el intercambiador de calor secundario.

En la tabla 5.5 se muestra un resumen de las temperaturas alcanzadas

Tabla 5.5: Temperaturas intercambiador de calor secundario.

| Mes | Temperaturas intercambiador de calor secundario | | | |
|-----------|-------------------------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | Conexión cascada térmica | | Conexión en paralelo | |
| | T entrada primario | T salida secundario | T entrada primario | T salida secundario |
| Diciembre | 62 | 56 | 57 | 52 |
| Marzo | 56 | 51 | 56 | 51 |
| Junio | 53 | 48 | 56 | 50 |

En el caso de tener los estanques conectados en cascada térmica, se tienen mayores temperaturas de trabajo. En Diciembre se tiene una temperatura en el circuito secundario de 56 [°C], en Marzo es de 51 [°C] y en Junio es de 48 [°C], luego la diferencia de temperatura de trabajo del circuito de calefacción solar durante el año es de 8 [°C].

En el caso de estanques conectados en paralelo, la temperatura de trabajo es más uniforme durante el

año, siendo la temperatura del circuito de calefacción solar de 50 [°C]. Esto es una consecuencia directa de la configuración de los estanques, ya que como se analizó previamente, la temperatura de acumulación en los estanques es menor, pero se tiene mayor masa con temperatura de trabajo adecuada. Dado que la temperatura de trabajo es más uniforme, se tiene una mayor eficiencia en el funcionamiento del sistema solar, ya que no se pierde tanta energía en el dosificador. Con la experiencia del uso, se pueden programar temperaturas de trabajo del sistema solar tal que la pérdida de energía en el dosificador sea mínima.

5.5. Circuito de calefacción solar

Dadas la temperaturas alcanzadas en el inicio del circuito de calefacción, se comprueba que se tienen las temperaturas necesarias para satisfacer la demanda energética de los calefactores. Dado esto se aprecia que el mayor problema térmico se encuentra en el circuito de calefacción solar.

Analizando los gráficos obtenidos en la simulación, se ve que para el caso crítico, que sería la maternidad ubicada más lejos y trabajando a la mayor temperatura, el sistema no alcanza la temperatura necesaria, por lo que los calefactores empezarían a enfriarse. Dadas las distancias existentes entre el intercambiador de calor y la maternidad, se tienen grandes pérdidas por conducción del fluido a altas temperaturas. Cabe destacar que el fluido se conduce por cañerías de polipropileno, el cual es un material aislante, pero dadas las grandes distancias, cercanas a 50 [m], esta cañería debiera ser aislada, de tal forma de minimizar la pérdida de energía por conducción.

En la simulación del sistema solar trabajando junto con la caldera, se ve que la caldera empezaría a funcionar después de 1.3 [hr], pero en la realidad el cambio del funcionamiento del sistema solar al sistema de caldera considerando la temperatura de los calefactores no es automático, sino que lo realizan los operadores del lugar, por lo tanto al detectar un problema, de inmediato dejan sin funcionamiento el sistema solar. Como se vio en los antecedentes, el cambio del funcionamiento de un sistema a otro se realiza de forma automática considerando la temperatura de la parte superior del estanque caliente.

Capítulo 6

Análisis conceptual del sistema solar y propuestas

Una vez que se ha simulado el sistema solar y de que se ha analizado la forma de realizar instalaciones de gran magnitud, se procede a realizar propuestas en los casos en que existen, de lo contrario, se dan argumentos que justifican el correcto diseño de la instalación.

6.1. Fallas conceptuales

La principal falla conceptual del sistema solar, es la forma en que entrega energía al sistema de calefacción usual. En este caso se debe evitar intervenir el sistema de calefacción directamente en serie con el dosificador y el intercambiador de calor de serpentín, esta intervención causa problemas térmicos e hidráulicos.

Los problemas térmicos fueron analizados y demostrados en capítulos anteriores, donde se aprecia que predominan las pérdidas de temperatura por conducción del fluido a altas temperaturas sin una aislación de la cañería que minimice las pérdidas.

Los problemas hidráulicos son causados por una intervención directa del circuito de calefacción, donde se interviene un circuito que es atmosférico con otro circuito que funciona con una presión de trabajo mayor.

Dado esto, se propone intervenir la caldera de calefacción, esto se explica en detalle a continuación.

La caldera de calefacción se encuentra conectada en serie con el sistema de calefacción de las maternidades. La conexión en serie es indirecta, ya que el traspaso de energía desde el circuito de caldera al circuito de calefacción es a través del intercambiador de calor de serpentín. La intervención de la caldera significa que el sistema solar de calefacción queda conectado indirectamente en serie con el circuito de calefacción de las maternidades y al mismo tiempo queda conectado directamente en serie con la caldera de calefacción. La prioridad del sistema debe ser aprovechar al máximo la energía solar, luego la modificación debe tomar en cuenta este hecho.

Para intervenir la caldera, se ocupa una válvula de 3 vías, la válvula de 3 vías es accionada por un

servomotor, el cual actúa según una señal eléctrica.

En este caso se deben distinguir 2 formas de funcionamiento, cuando la energía la entrega la caldera de calefacción y cuando la energía la entrega el sistema solar.

- **Caldera:** El funcionamiento de la caldera no se ve afectado por la intervención en serie del sistema solar. Si la acumulación del sistema solar no tiene la temperatura suficiente para funcionar, la válvula de 3 vías se encuentra desenergizada, luego se encuentra en la posición que se muestra en la figura 7.1

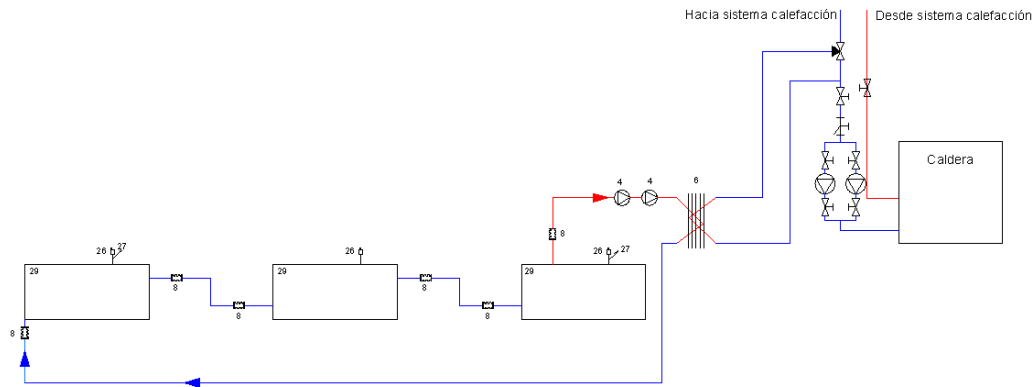


Figura 6.1: Funcionamiento normal de la caldera

Al encontrarse en esta posición, el flujo circula por la caldera, en donde aumenta su temperatura y luego circula por el intercambiador de calor de serpentín, donde cede energía al sistema de calefacción de las maternidades. Luego circula nuevamente impulsado por la bomba

- **Sistema solar:** Cuando la parte superior del sistema de acumulación tiene $55 [^{\circ}\text{C}]$, es posible realizar el aporte energético con el sistema solar, en este caso la válvula de 3 vías se energiza, por lo cual se acciona el servomotor y su posición cambia a la que se muestra en la figura 7.2

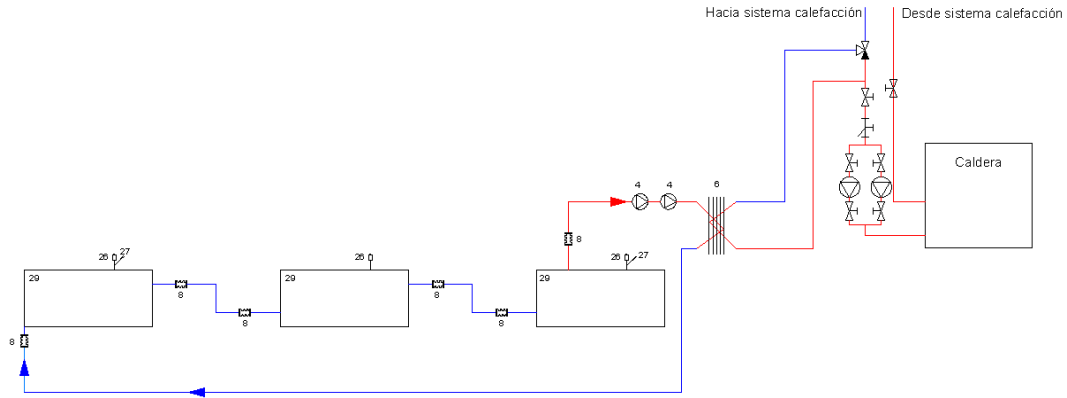


Figura 6.2: Intervención del sistema solar

Al mismo tiempo de energizarse la válvula de 3 vías, se energizan las bombas que extraen el fluido de la parte superior del estanque de acumulación y hacen circular el agua por el circuito primario del intercambiador de placas.

Al encontrarse en esta posición la válvula de 3 vías, obliga al fluido a circular por el intercambiador de calor, luego el agua circula por el circuito secundario del intercambiador de calor y aumenta su temperatura. El agua se hace circular con la misma bomba que se ocupa en el sistema de caldera. Una vez que aumenta su temperatura, el agua circula por la bomba de la caldera y luego circula por la caldera, pero ésta se encuentra apagada, por lo que no hay ganancia de calor en esta etapa. Una vez que circula por la caldera, el agua entrega energía al sistema de calefacción a través del intercambiador de calor de serpentín. De esta forma el sistema solar interviene indirectamente el sistema de calefacción de las maternidades, por lo que no hay problemas hidráulicos ni térmicos relacionados por el funcionamiento de sistemas conectados directamente en serie que trabajan a distinta presión.

6.2. Fallas de diseño

■ Bomba de circulación

La bomba de circulación está ubicada en la zona caliente del circuito, lo cual la somete diariamente a una fatiga térmica. Lo correcto es ubicar la bomba de circulación del sistema en la zona fría, entre la salida del primario del intercambiador de calor y los colectores solares

Dado que en el lugar de la instalación se trabaja con agua de pozo, se tiene riesgo de formación de incrustaciones, sobre todo en los elementos que trabajan a mayor temperatura, luego la bomba se puede ver afectada por esto. Además al actuar con fluido a mayor temperatura, aumentan las probabilidades de que la bomba cavite.

Para analizar en el tiempo el funcionamiento de la bomba de circulación, se propone instalar un manómetro en paralelo a la bomba, de esta forma se mide la pérdida de carga del sistema. El dato del valor de la pérdida de carga del sistema es muy valioso, ya que, sabiendo la componente estática y dinámica de la instalación, se puede obtener el punto de trabajo de la bomba, con lo que se sabe el caudal de entrega de la bomba. Analizando el punto de trabajo de la bomba en el tiempo, se sabe si las incrustaciones en el intercambiador de calor o las impurezas en los filtros, están afectando de manera importante en el sistema, ya que éstas aumentan la pérdida de carga del sistema.

■ Colector solar

La conexión de los colectores solares es la adecuada dada la temperatura que se busca alcanzar en la acumulación. La conexión de paralelo en canales permite minimizar las pérdidas de carga del sistema, lo cual beneficia directamente el consumo eléctrico de la bomba de circulación. Se recomienda la conexión de no más de 4 colectores en paralelo, ya que al haber muchos colectores conectados en paralelo, empiezan a haber problemas de presión en los colectores ubicados en la parte media de la batería.

La instalación debe ser lo más simétrica posible, en la imagen 7.3 se observa que esto no se cumple en su totalidad.

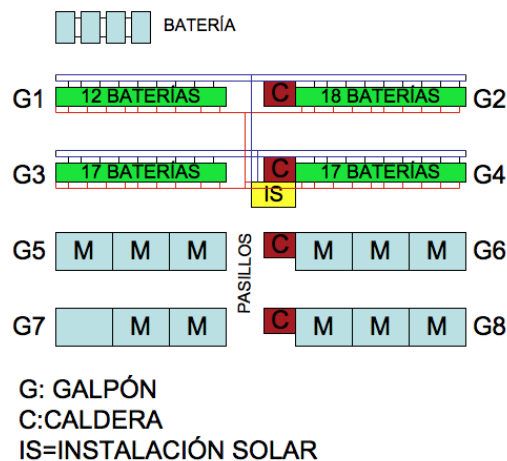


Figura 6.3: Ubicación de los colectores en los galpones

La simetría del sistema no se cumple en todos los sentidos, ya que como se analizó en la sección anterior, la bomba de circulación no se encuentra en la mitad de los galpones que se ubican paralelamente, sino que se ubica exactamente bajo uno de ellos. Dada la baja pérdida de carga que tienen las cañería de polipropileno, además de un diseño de entrega sin mayores obstáculos como codos o válvulas de

paso, se tiene un flujo estable, por lo que se estima que la diferencia de caudales entre galpones no es significativa.

La no simetría que es significativa es la que existe en el galpón 1, donde se tienen 12 baterías en un lado y en el otro extremo se tienen 18 baterías. En el galpón 2 se tienen 17 baterías en cada lado, dado esto se tienen 30 baterías en el galpón 1 y 34 baterías en el galpón 2, luego no existe la misma resistencia al flujo entre cada galpón. Como se vio en los antecedentes, al disminuir el caudal recomendado en los colectores, se ve afectada su curva de rendimiento. En este caso se tienen 64 baterías, por lo que en cada galpón se deben instalar 32 baterías y 16 baterías en cada extremo de los galpones.

La forma de alimentar los colectores solares es correcta, realizando una alimentación invertida para lograr un equilibrio hidráulico en ellos, de tal forma que trabajen bajo las mismas condiciones.

- Vaso de expansión

Dado que la bomba de circulación se ubicó en la parte caliente del circuito, el vaso de expansión quedó ubicado en la descarga de la bomba y no en la succión. Esto afecta el proceso de estagnación de los colectores, ya que, como se explica en el anexo [1], el agua expulsada durante la estagnación de los colectores ingresa al vaso de expansión.

6.3. Fallas operacionales

- Válvula de llenado automático

En instalaciones de energía solar, y en general en instalaciones hidráulicas de circuito cerrado, no se recomienda el uso de válvulas de llenado automático, ya que ocultan defectos del sistema como fugas del fluido.

El circuito primario es un circuito cerrado, por lo que no debería tener pérdidas de masa. El correcto funcionamiento del circuito debe ser sin válvula de llenado automático y con los purgadores de aire cerrados, de esta forma no hay forma de perder masa, a no ser que existan fugas en otros componentes, lo cual equivale a una reparación del circuito. Los purgadores sólo deben abrirse en el momento en que se carga con fluido el sistema solar, de tal forma que no queden burbujas en su interior.

- Fluido de trabajo

El fluido de trabajo es agua de pozo, lo cual no es lo ideal pero dadas las características de ubicación de la instalación no es posible utilizar agua potable.

Para evitar la incrustación de los componentes del sistema solar, la renovación de agua debe ser la menor posible, por esto se recomienda utilizar el sistema sin válvula de llenado automático y con los purgadores de aire cerrados. El fluido de trabajo depositará los minerales en las zonas de trabajo

a mayor temperatura, por lo que los componentes con mayor riesgo de sufrir incrustaciones son el intercambiador de calor, los colectores solares, la bomba de circulación, las termocuplas, válvulas y cañerías. La cañería de polipropileno tiene muy baja rugosidad, por lo que el riesgo de sufrir incrustaciones es menor.

Las incrustaciones en los elementos de transferencia térmica, como los colectores solares y el intercambiador de calor, forman una capa que actúa como aislante, lo que disminuye el rendimiento de intercambio térmico de forma notoria.

Dadas las temperaturas mínimas promedio que se tienen en la zona, se debe ocupar un fluido anti-congelante o una lógica de control que evite el congelamiento de las cañerías. En este caso la central de mando hace funcionar la bomba de circulación del circuito primario cuando la temperatura de los colectores es de 2 [°C].

Capítulo 7

Conclusiones

7.1. Conclusiones generales

Se puede ver que el trabajo realizado ha estado acorde a los objetivos planteados. Se ha realizado un profundo análisis de un sistema solar térmico de colectores planos de gran superficie. Se ha recopilado gran información de aspectos básicos a considerar en el diseño de sistemas de gran superficie para luego realizar un paralelo con el sistema que se ha estudiado y proponer mejoras.

Se ha comprendido aspectos básicos en el diseño y posterior instalación de sistemas solares térmicos, analizando de que manera afectan el futuro comportamiento de la instalación. En especial, se ha comprendido que cada sistema requiere de un diseño específico, según sea la aplicación, ya que cada aplicación determina temperaturas de trabajo, capacidades necesarias de acumulación y otras variaciones que necesariamente deben ser consideradas desde la concepción del sistema solar.

Se han detectado errores conceptuales en el diseño del sistema solar estudiado. En especial, se ha realizado un breve análisis de una nueva lógica de control del sistema solar, tal que la entrega de energía disponible sea más directa, evitando pérdidas de temperatura debido a conexión de circuitos mediante intercambiadores de calor.

Se ha comprobado que en esta aplicación específica, acumular energía en invierno es ineficiente, debido a la alta temperatura de activación del circuito de distribución del sistema solar. En estos casos es recomendable destinar la energía acumulado a otras aplicaciones, como procesos de sanitización, los cuales son fundamentales en un criadero de cerdos y que demandan temperaturas de 40 [°C].

Se ha realizado un análisis y posterior comparación de configuraciones de estanques de acumulación. En particular se tienen estanques conectados en cascada térmica, luego se ha simulado esta conexión y una conexión en paralelo, obteniendo gráficamente temperaturas obtenidas para poder realizar una posterior comparación entre ellos.

En general, se ha analizado en profundidad un sistema solar que se encuentra instalado, pero que ha tenido problemas de funcionamiento. Con el programa utilizado, se ha podido analizar posibles causas que provocan problemas de funcionamiento, lo cual complementado con un análisis técnico-operativo, ha permitido realizar propuestas que permitirán al sistema instalado funcionar de mejor forma.

7.2. Conclusiones específicas

Los tiempos de respuesta son levemente mayores en el caso de tener una configuración de estanques en paralelo. Una configuración en cascada térmica tiene tiempos de respuesta más rápidos, pero sólo 1 estanque alcanza temperaturas utilizables, en cambio, una configuración de estanques en paralelo al alcanzar temperaturas utilizables son los 3 estanques los que tienen temperaturas utilizables.

Al considerar la energía acumulada sobre los 55 [°C], se tiene mayor energía con una conexión de estanques en cascada térmica, salvo en los meses de baja radiación, donde la configuración de estanques en paralelo logra acumular más energía. La energía lograda por la configuración en cascada térmica proviene de altas temperaturas, siendo éstas sobre los 75 [°C], en cambio, la energía lograda por la configuración de estanques en paralelo proviene de una gran cantidad de masa que tiene energía sobre los 55 [°C], pero que no alcanzan temperaturas sobre los 60 [°C], luego al analizar la energía de los estanques considerando un ΔT de 1 [°C] y la masa que tiene temperaturas sobre 55 [°C], se comprueba que durante todo el año una configuración de estanques en paralelo tiene más energía utilizable.

La utilizabilidad del sistema solar es baja debido a las temperaturas que se deben lograr, siendo éstas sobre los 55 [°C], en invierno la utilizabilidad es cercana a las 2 [hr], luego se deben evitar pérdidas de temperatura en intercambiadores de calor, por lo que la lógica de control debe aprovechar de la forma más directa la energía disponible en los colectores solares. Por ello se ha realizado un análisis conceptual de una lógica de control que entrega energía a los consumos de una forma directa, evitando estanques de acumulación en la distribución de energía y ocupándolos sólo en los casos en que exista excedente de energía.

La distribución de energía es más eficiente en el caso en que se tiene una conexión de estanques en paralelo, debido a la entrega de energía a una temperatura cercana a la requerida por los consumos, evitando de esta manera un enfriamiento excesivo del fluido. Las temperaturas de trabajo de la configuración en paralelo son más estables durante el año, por lo que el sistema es más eficiente.

7.3. Recomendaciones

La ubicación de la bomba de circulación en los circuitos térmicos en general siempre debe ser en la parte fría del circuito, de tal manera de protegerla de cambios de temperatura y disminuir el riesgo de cavitación.

El hecho de no realizar simetría en la instalación de los colectores afecta el rendimiento de la instalación, en especial, se tiene una distribución no uniforme del caudal a través de las distintas baterías de colectores, lo cual afecta el rendimiento individual de los mismos, luego se debe priorizar una distribución de colectores que mantenga una simetría entre ellos.

Aunque se ocupen materiales de baja conductividad térmica en cañerías, éstas deben ser aisladas, sobre todo en los casos que sean relativamente largas, en particular, se puso en evidencia la gran pérdida de temperatura de una cañería de polipropileno de 50 [m] de largo, lo cual afecta la distribución de energía e impidiendo que el sistema solar cumpla con las condiciones mínimas de trabajo.

El uso de dispositivos de llenado automático no es recomendable, debido a que ocultan fugas del fluido. El sistema instalado es cerrado, luego cualquier pérdida de fluido equivale a una reparación de algún componente.

Anexo A

Implementación de simulaciones

En este capítulo se explica la implementación del sistema solar en el programa Simusol.

A continuación, se detalla como se simula cada componente de los circuitos.

A.1. Circuito primario

En primer lugar, utilizando el método de Perrin de Brichambaut, se crean tablas de radiación incidente con un ángulo de inclinación de 17° , la tabla de radiación abarca un período de 29 horas, lo que equivale a un análisis partiendo a las 4 am hora solar y terminando a las 9 am del día siguiente, junto con esto, se crea una tabla de temperatura basado en registros históricos de la zona. La tabla de radiación es de intervalos de 30 minutos y la tabla de temperatura es de intervalos de 1 hora.

Dado el balance térmico del colector solar, se tiene una energía disponible de

$$Q_{util} = 645,16 * (I * 0,7132 - 4,39 * (T_e - T_a)) \quad (A.1)$$

Donde

- 645.16 es el área total de captación
- 0,7132 es el factor óptico del colector que se utiliza
- 4,39 es el factor de remoción de calor del colector
- T_e es la temperatura de entrada del colector
- T_a es la temperatura ambiente

Así como la temperatura ambiente, la radiación I se implementa en una tabla, en cambio, la temperatura de entrada al colector la va calculando el programa. Esta energía se aplica como un flujo de calor a una masa

de agua equivalente a la que contienen los colectores solares, cada colector tiene una capacidad de 5 litros, luego el acumulador es de 1270 litros. Para simular las bombas, se ocupan flujos de calor por transporte de masa, se ocupa un flujo másico de $8.8 \left[\frac{kg}{s} \right]$ lo que equivale a un caudal de $32 \left[\frac{m^3}{hr} \right]$. Se implementa una bomba de ida al intercambiador de calor y una bomba de retorno hacia el acumulador de agua.

El esquema del circuito primario sin el intercambiador de calor se aprecia en la figura A.1

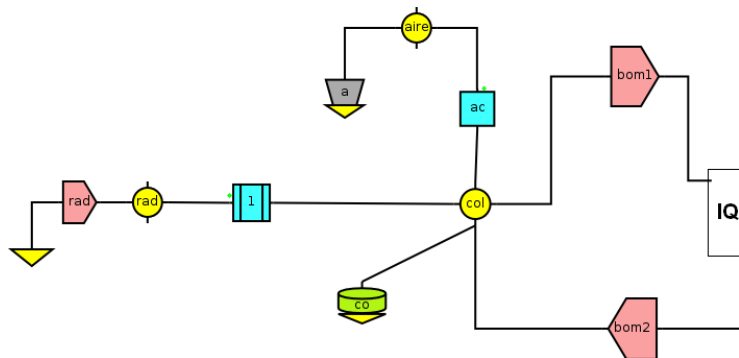


Figura A.1: Modelo del circuito primario

La implementación del intercambiador de calor se realiza por partes, se utilizan 3 volúmenes de control. Un esquema del intercambiador se aprecia en la figura A.2

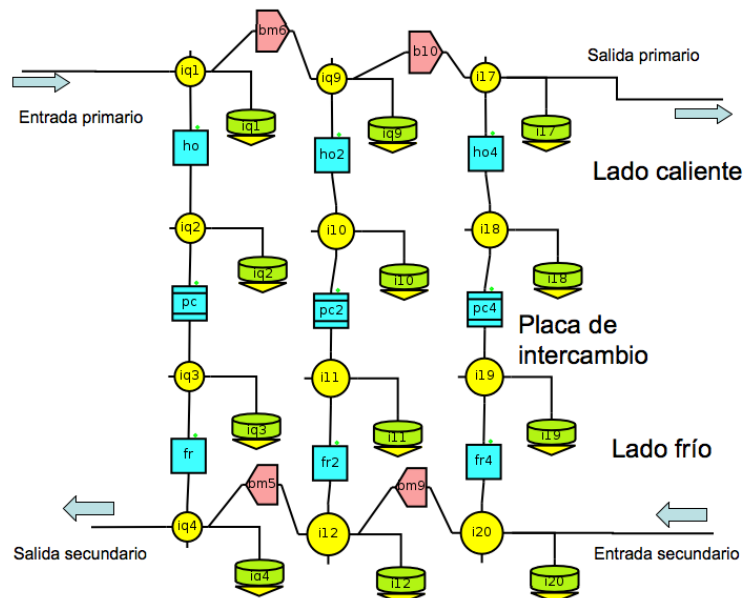


Figura A.2: Modelo del intercambiador de calor

El intercambiador de calor se simula considerando los fenómenos de convección y conducción que suceden en el interior de él. En la sección media se tienen resistencias conductivas, lo cual simula las placas de intercambio térmico y separa el circuito primario del secundario. A cada lado de la placa se tienen resistencias convectivas, las cuales representan la convección producida por la circulación forzada del fluido en su interior.

En este caso, dadas las características geométricas del intercambiador de calor, se tiene que en el interior de cada circuito hay 6 litros de agua, luego cada acumulador térmico representa 1 litro.

Las resistencias conductivas son de acero inoxidable, con un coeficiente de conductividad térmica de $54 \left[\frac{W}{m^{\circ}C} \right]$, en total se tienen 33 placas, pero la primera y la última no realizan intercambio térmico, luego el área de intercambio es de $1300[cm^2] * 31$ y como se tienen 3 volúmenes de control, cada resistencia conductiva actúa sobre un área de $1300[cm^2] * 31/3$.

Las resistencias convectivas actúan en ambos lados del intercambiador de calor. En el lado caliente se ocupa un coeficiente convectivo de $1200 \left[\frac{W}{m^2oC} \right]$ y en el lado frío se ocupa un coeficiente convectivo de $1400 \left[\frac{W}{m^2oC} \right]$, ambos valores recomendados por el fabricante. El área sobre la que actúa la convección es la misma sobre la que actúa la conducción.

Entre cada volumen de control, se ocupan flujos de calor por transporte de masa, con el mismo caudal correspondiente al circuito, en este caso ambos circuitos tienen un flujo másico de $8.8 \left[\frac{kg}{s} \right]$.

A.2. Circuito de acumulación del secundario

En primer lugar se explica la manera en que se implementan los estanques de acumulación del circuito secundario.

En un principio se simula el circuito primario junto con el circuito secundario de acumulación. Este circuito cuenta con 3 estanques conectados en cascada térmica, de una capacidad de 10000 [lt] cada uno. Para analizar correctamente la estratificación del agua en los estanques, se ocupan 6 volúmenes de control en cada estanque, luego cada volumen de control considera 1666 [lt]. En la figura A.3 se aprecia la implementación de 1 estanque de acumulación.

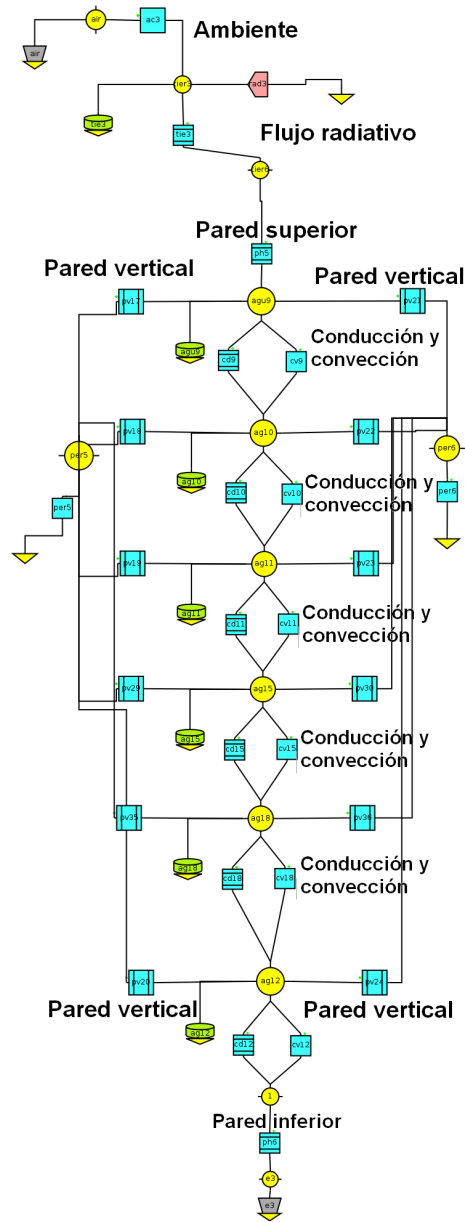


Figura A.3: Modelo de 1 estanque de acumulación

En el esquema, se puede apreciar un flujo de radiación que incide sobre un acumulador térmico, que en este caso es la tierra, sobre este acumulador se tiene una disipación por convección con el medio ambiente. También se ha simulado la conducción a través de la tierra y luego se tiene la conducción a través de la pared superior del estanque, la cual es de poliuretano expandido, material aislante con un coeficiente de conducción térmica de $0.004 \left[\frac{W}{mK} \right]$. En los extremos de cada volumen de control, se observan resistencias conductivas, que simulan las paredes laterales de los estanques, que también son de poliuretano expandido y luego se tienen las resistencias conductivas por la tierra.

De forma descendente, se simula el intercambio térmico entre cada volumen de control, el cual se produce por conducción y por convección.

Para realizar la circulación del fluido, nuevamente se implementan las bombas como flujos de calor con transporte de masa, ocupando un flujo másico de 8.8 [kg/s].

En la actualidad, se tienen los estanques conectados en cascada térmica, esta conexión se aprecia en la figura A.4

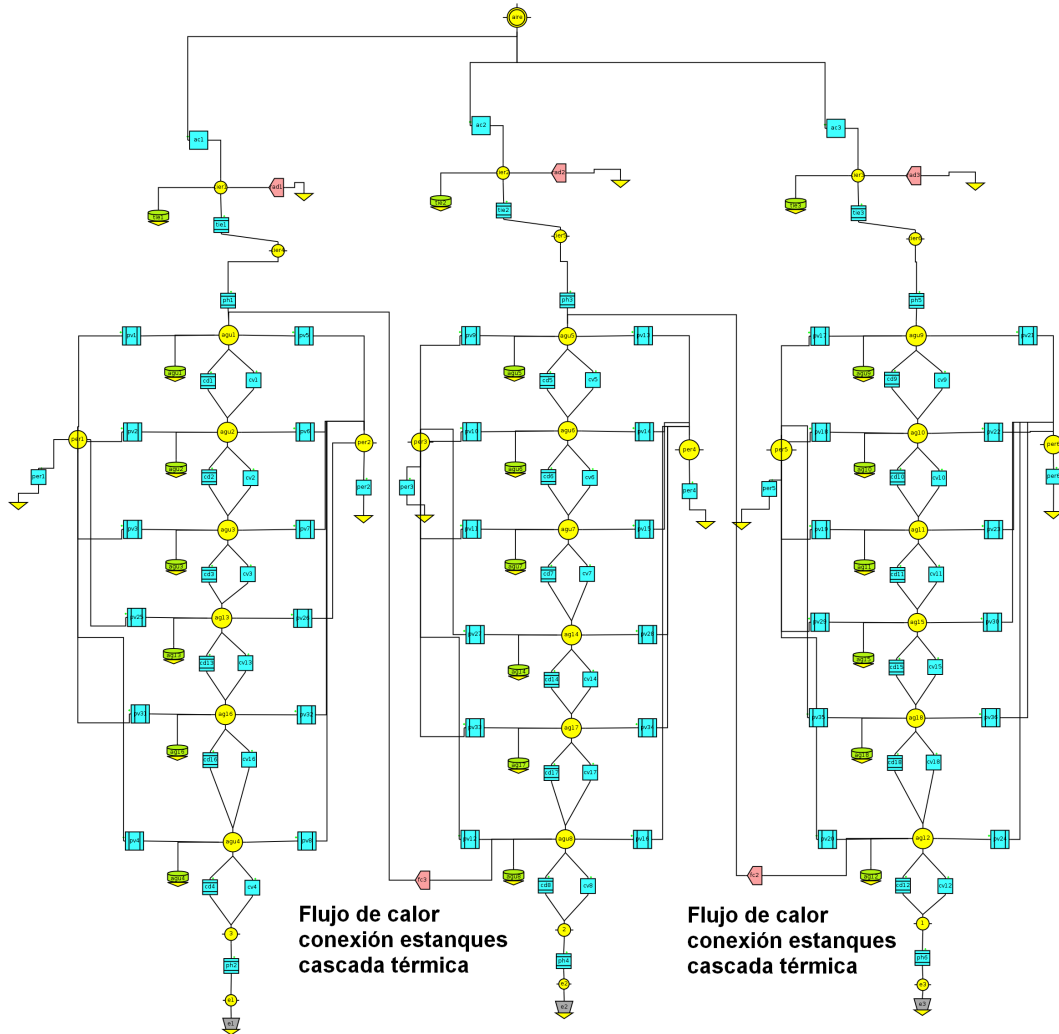


Figura A.4: Modelo de estanques conectados en cascada térmica

La inyección del fluido proveniente del intercambiador de calor se realiza en la parte superior del estanque de la derecha, luego este es el estanque de mayor temperatura. La extracción del fluido se realiza en la parte inferior del estanque de la izquierda, ya que es el estanque de menor temperatura. El estanque de la

derecha se conecta con el estanque del medio con un flujo de calor por transporte de masa. La extracción desde el estanque de la derecha se realiza en la parte inferior, la cual vendría siendo la zona mas fría del estanque. La inyección en el estanque del medio se realiza en la parte superior. De manera análoga se conecta el estanque del medio con el estanque de la izquierda.

En la implementación de los estanques conectados en paralelo, se ocupan flujos de calor por transporte de masa, los cuales unen el segundo y el cuarto volumen de control de cada estanque. La simulación se realiza análogamente a la anterior, salvo con los estanques de acumulación conectados en paralelo. El esquema se puede apreciar en la figura A.5

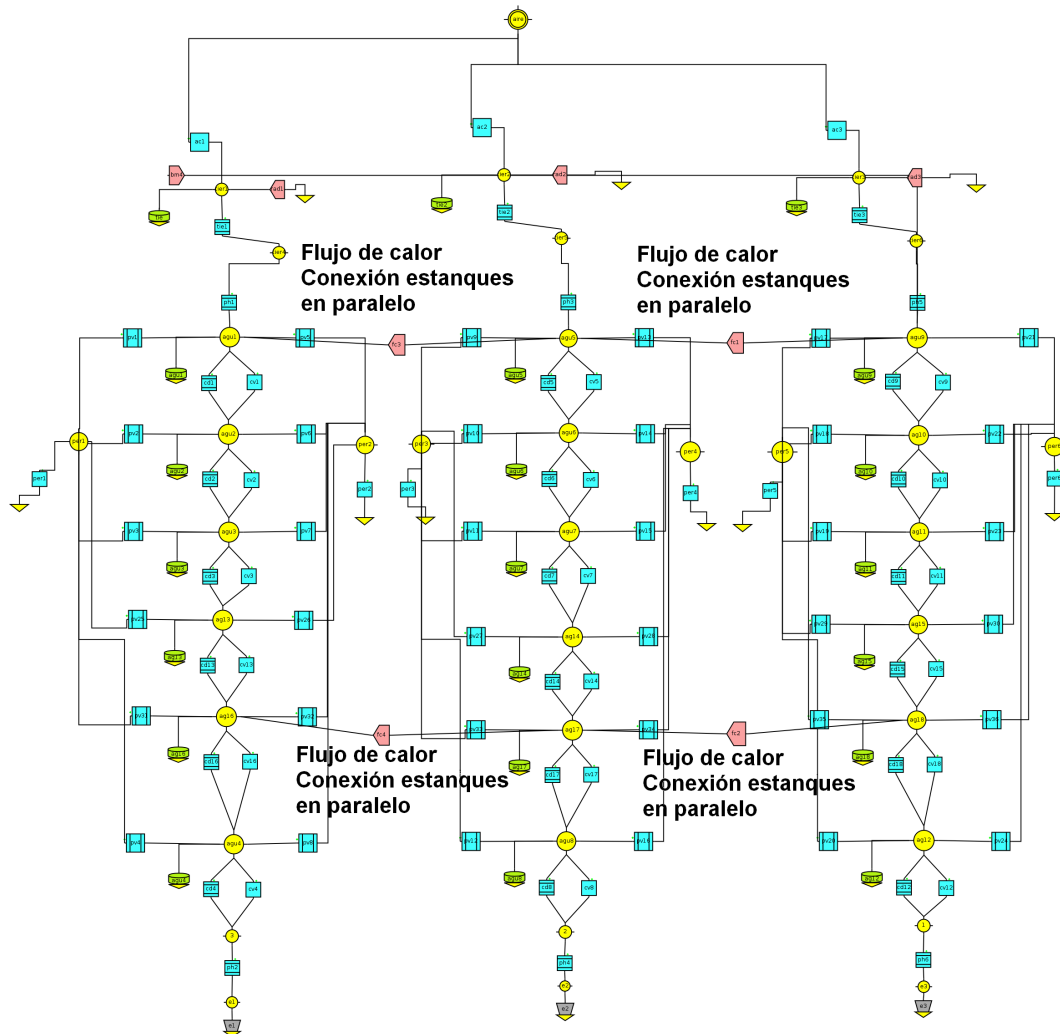


Figura A.5: Conexión de estanques en paralelo

A.3. Circuito primario con totalidad del circuito secundario, estanques conectados en cascada térmica

El circuito de distribución del secundario es el que entrega la energía disponible en los estanques de acumulación, la temperatura de partida del sistema es de 55 [°C]. En total hay 4 circuitos de distribución, los cuales conectan los estanques de acumulación con 4 intercambiadores de calor, todos ellos de iguales características.

Un diagrama de como es el circuito de distribución se observa en la figura A.6

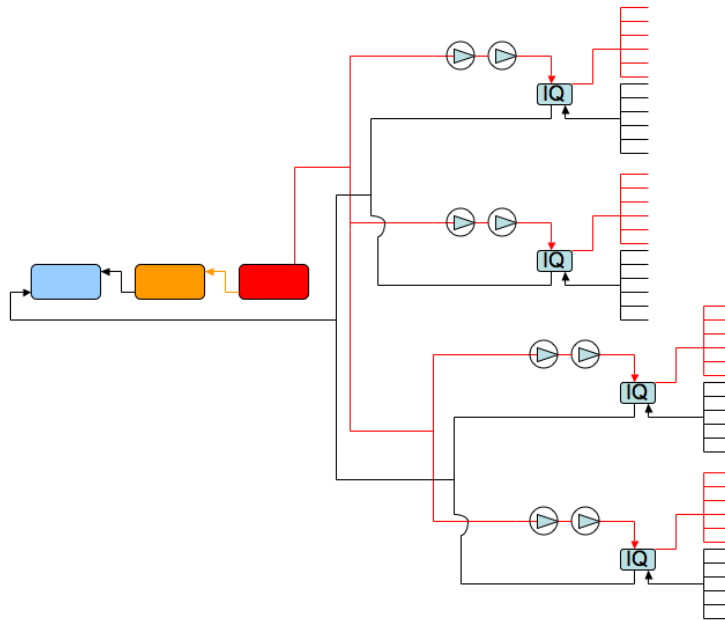


Figura A.6: Esquema del circuito secundario de distribución

Dado que se tienen 4 salidas desde el estanque caliente y 4 entregas en el estanque frío, todas ellas en paralelo, se dificulta el correcto funcionamiento del programa Simusol, por lo tanto el análisis se realiza considerando 1 intercambiador de calor equivalente a los 4, con esto se simula el funcionamiento del sistema solar. A continuación se detallan las características de 1 intercambiador de calor y luego las características del intercambiador de calor equivalente que se ha ocupado.

El intercambiador de calor que se utiliza tiene 19 placas de 340 [cm²] cada una, de las cuales 17 realizan intercambio térmico, luego el área de intercambio de cada resistencia conductiva y convectiva es de 340 [cm²]*17/3. En este caso nuevamente se han ocupado los coeficientes convectivos de 1200 [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$] en el lado caliente y de 1400 [$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$] en el lado frío. En el circuito primario del intercambiador de calor el fluido se

hace circular con 2 bombas conectadas en serie de $2,5 \left[\frac{m^3}{hr} \right]$, luego se tiene un caudal de $5 \left[\frac{m^3}{hr} \right]$, en el circuito secundario se tiene una bomba de $3,2 \left[\frac{m^3}{hr} \right]$. En este caso dentro del intercambiador en todo momento hay 1 [lt] de agua.

El intercambiador de calor equivalente que se ocupa tiene 4 veces el área de intercambio, 4 veces el caudal en cada circuito y 4 veces la cantidad de fluido en su interior.

Anexo B

Tablas de radiación y temperatura

Tabla B.1: Temperaturas promedio de en un día de Marzo, Junio y Diciembre. Localidad: Tantehue VI Región de Chile

| | Marzo | Junio | Diciembre |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| Hora | Temperatura | Temperatura | Temperatura |
| | [°C] | [°C] | [°C] |
| 00:00 | 13 | 5 | 20 |
| 01:00 | 13 | 5 | 20 |
| 02:00 | 12 | 4 | 18 |
| 03:00 | 11 | 3 | 16 |
| 04:00 | 10 | 2 | 15 |
| 05:00 | 9 | 2 | 14 |
| 06:00 | 10 | 3 | 15 |
| 07:00 | 11 | 4 | 17 |
| 08:00 | 12 | 5 | 18 |
| 09:00 | 14 | 7 | 20 |
| 10:00 | 16 | 9 | 21 |
| 11:00 | 17 | 9 | 22 |
| 12:00 | 18 | 10 | 24 |
| 13:00 | 20 | 11 | 26 |
| 14:00 | 22 | 12 | 28 |
| 15:00 | 24 | 14 | 30 |
| 16:00 | 25 | 14 | 31 |
| 17:00 | 27 | 12 | 32 |
| 18:00 | 24 | 10 | 30 |
| 19:00 | 22 | 10 | 29 |
| 20:00 | 20 | 9 | 27 |
| 21:00 | 17 | 8 | 25 |
| 22:00 | 15 | 6 | 23 |
| 23:00 | 14 | 5 | 22 |

Tabla B.2: Radiación promedio de en un día de Marzo, Junio y Diciembre, plano inclinado de 17 °. Localidad: Tantehue VI Región de Chile

| | Marzo | Junio | Diciembre |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Hora | Radiación | Radiación | Radiación |
| | $[\frac{W}{m^2}]$ | $[\frac{W}{m^2}]$ | $[\frac{W}{m^2}]$ |
| 04:00 | 0 | 0 | 0 |
| 04:30 | 0 | 0 | 0 |
| 05:00 | 0 | 0 | 24.8 |
| 05:30 | 0 | 0 | 52.9 |
| 06:00 | 13.5 | 0 | 76.5 |
| 06:30 | 77.2 | 0 | 159.2 |
| 07:00 | 178.5 | 0 | 374.9 |
| 07:30 | 302.0 | 78.5 | 374.9 |
| 08:00 | 430.3 | 201.1 | 488.2 |
| 08:30 | 554.6 | 328.7 | 597.4 |
| 09:00 | 669.7 | 446.3 | 698.6 |
| 09:30 | 772.1 | 549.6 | 788.8 |
| 10:00 | 859.1 | 636.4 | 865.5 |
| 10:30 | 928.7 | 705.4 | 927.0 |
| 11:00 | 979.5 | 755.4 | 971.7 |
| 11:30 | 1010.3 | 785.7 | 998.8 |
| 12:00 | 1020.6 | 795.8 | 1007.9 |
| 12:30 | 1010.3 | 785.7 | 998.8 |
| 13:00 | 979.5 | 755.4 | 971.7 |
| 13:30 | 928.7 | 705.4 | 927.0 |
| 14:00 | 859.1 | 636.4 | 865.5 |
| 14:30 | 772.1 | 549.6 | 788.8 |
| 15:00 | 669.7 | 446.3 | 698.6 |
| 15:30 | 554.6 | 328.7 | 597.4 |
| 16:00 | 430.3 | 201.1 | 488.2 |
| 16:30 | 302.0 | 78.5 | 374.9 |
| 17:00 | 178.5 | 0 | 374.9 |
| 17:30 | 77.2 | 0 | 159.2 |
| 18:00 | 13.5 | 0 | 76.5 |
| 18:30 | 0 | 0 | 52.9 |
| 19:00 | 0 | 0 | 24.8 |
| 19:30 | 0 | 0 | 0 |
| 20:30 | 0 | 0 | 0 |

Anexo C

Características de los componentes

C.1. Colector Solar

- Medidas 2.19*1.29*90 [mm]
- Superficie total 2.83[m²]
- Superficie absorvedor 2.54[m²]
- Peso en vacío 51 [kg]
- Capacidad de fluido 5 [lt]
- Presión máxima de trabajo 8 [bar]
- Caída de presión $0,1 * q^2 + 2,05 * q$ [m.m.c.a] q en [lt/min]
- Factor óptico Ft=0,7132
- Factor de pérdidas Fu=4,39 [$\frac{W}{m^2K}$]
- Caudal recomendado 80 [$\frac{lt}{m^2hr}$]

Dados el factor óptico y el factor de pérdidas, se calcula la temperatura de estagnación del colector utilizado.

$$T_{estag} = \frac{Ft}{Fu} * I + T_{amb} \quad (C.1)$$

Donde I es la radiación incidente, que se toma constante e igual a 1000 [$\frac{W}{m^2}$] y se utiliza una temperatura ambiente de 20 [°C]. Con esto se obtiene una temperatura de estagnación del colector ocupado de 186 [°C], por lo que el sistema solar puede producir evaporación del fluido de trabajo.

C.2. Bombas de circulación e intercambiadores de calor

Tabla C.1: Características de las bombas de circulación.

| Elemento | Tipo | Caudal | Altura elevación | Fluido |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------|
| | | $[\frac{m^3}{hr}]$ | [m.c.a] | |
| Bomba primaria | Horiz. centrífuga | 36 | 93 | Agua |
| Bomba secundaria | Horiz. centrífuga | 36 | 36 | Agua |
| Bomba distribución | Rotor encapsulado | 2.5 | 30 | Agua |
| Bomba calefacción | Rotor encapsulado | 3.2 | 25 | Agua |
| Bomba IQ serpentín | Rotor encapsulado | 2.8 | 5 | Agua |
| Bomba dosificadora | Rotor encapsulado | 2.8 | 8 | Agua |

Tabla C.2: Características de los intercambiadores de calor.

| Elemento | Tipo | Nº placas | A intercambio | Medidas |
|---------------|--------|-----------|------------------------|---------|
| | | | $[\frac{cm^2}{placa}]$ | [mm] |
| IQ primario | Placas | 33 | 1300 | 340*780 |
| IQ secundario | Placas | 19 | 340 | 180*480 |

Anexo D

Programa Simusol

El programa Simusol facilita las simulaciones numéricas de circuitos que representan distintos sistemas físicos, ya sean térmicos, eléctricos, mecánicos o una combinación de ellos.

Es un programa de uso libre que funciona bajo la plataforma Linux, para funcionar correctamente, utiliza otros programas de uso libre: Dia, Sceptre y Gnuplot

Los datos de entrada consisten en diagramas que representan el sistema a simular. Los diagramas se realizan utilizando el programa Dia, con menús especialmente creados para Simusol.

Simusol traduce el diagrama y lo usa como archivo de entrada para Sceptre, luego este programa es el encargado de realizar la simulación numérica. Simusol analiza los resultados de Sceptre y produce con ellos resultados de interés, en especial, usando Gnuplot muestra gráficos con resultados.

En este trabajo se realizan diagramas térmicos, pero se dibuja el diagrama eléctrico equivalente. A continuación se muestran los elementos básicos que se utilizan para realizar los diagramas y los parámetros que los definen.

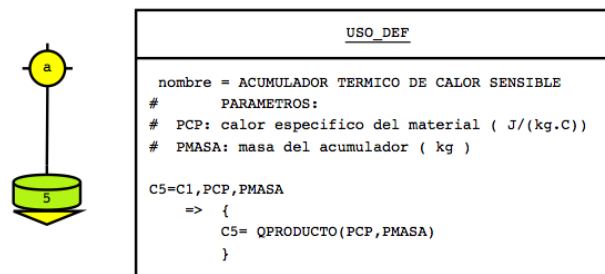


Figura D.1: Acumulador térmico, Fuente [7]

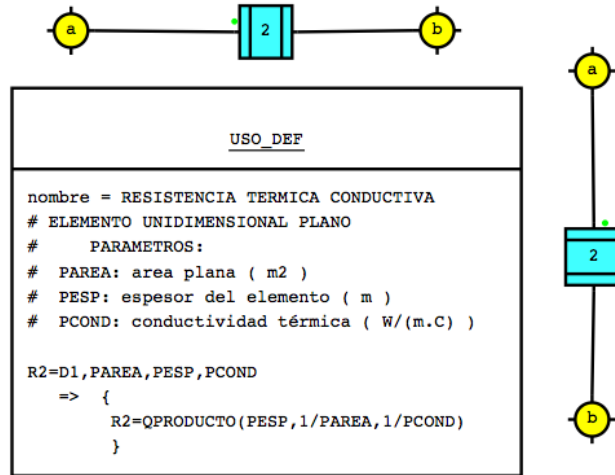


Figura D.2: Resistencia térmica conductiva, elemento plano, Fuente [7]

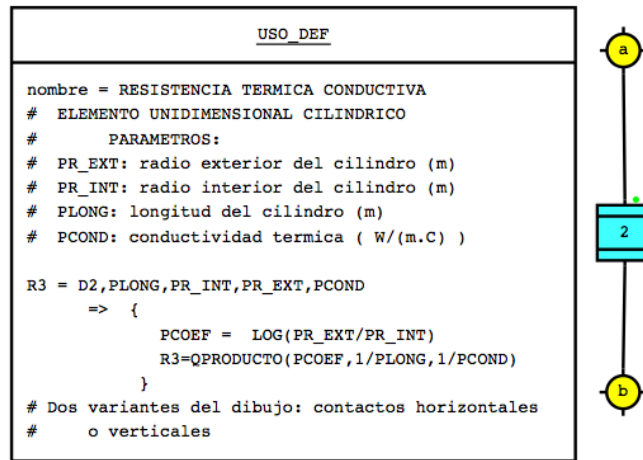


Figura D.3: Resistencia térmica conductiva, elemento cilíndrico, Fuente [7]



| USO_DEF |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre> nombre = RESISTECIA TERMICA RADIATIVA # ENTRE SUPERFICIES A TEMPERATURA UNIFORME # PARAMETROS: # PAREA: area de una de las sup. (m2) # PEMIS: emisividad de las superficies # (adimensionada) # PFFORMA: factor de forma entre las dos # superficies (adimensionada) # TEMP(a): temp. primer superficie (K) # TEMP(b): temp. segunda superficie (K) R4=R1,PAREA,PEMIS,PFFORMA => { FUNCIONESDENODOS = TEMP PF=QPRODUCTO(5.67E-8,PAREA,PEMIS,PFFORMA) R4= QRAD(PF, TEMP(a),TEMP(b)) } </pre> |

Figura D.4: Resistencia térmica radiativa, Fuente [7]

| USO_DEF |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre> nombre = FLUJO DE CALOR # PARAMETROS: # PFLUJO: flujo de calor # (W/m2) # PAREA: superficie (m2) J7=JQ,PAREA,PFLUJO => { J7 = QPRODUCTO(PAREA,PFLUJO) } </pre> |

Figura D.5: Flujo de calor, Fuente [7]

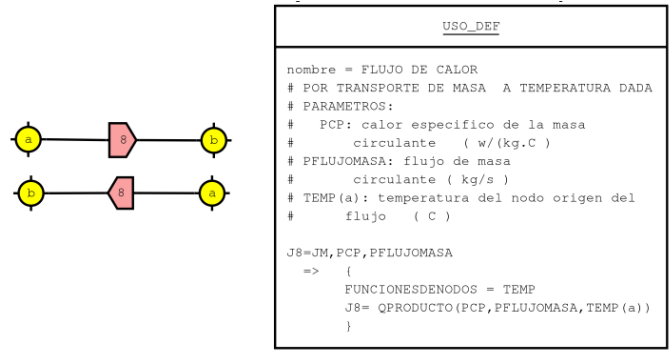


Figura D.6: Flujo de calor con transporte de masa, Fuente [7]

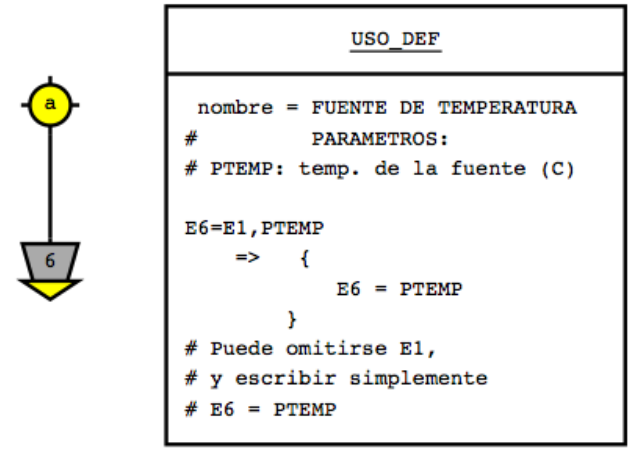


Figura D.7: Fuente de temperatura, Fuente [7]

Anexo E

Balance térmico de colectores solares planos

El funcionamiento de un colector solar plano se basa en el efecto invernadero. Al utilizar una cobertura de vidrio sobre una superficie absorbidora se produce dicho efecto, donde el vidrio permite el paso de la radiación incidente que proviene del sol, pero dificulta la radiación emitida por la superficie absorbidora, es decir, el vidrio tiene gran transmisividad frente a la radiación solar, pero baja transmisividad frente a la radiación que emite la superficie absorbidora. Un esquema del efecto invernadero se aprecia en la figura E.1

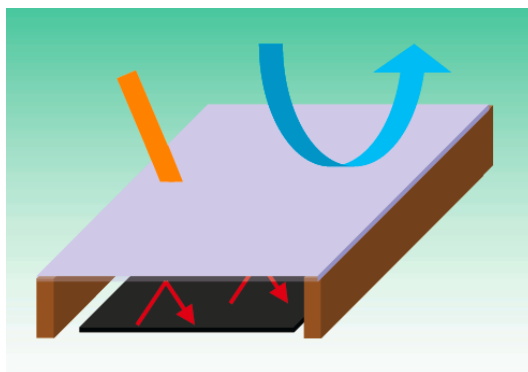


Figura E.1: Efecto invernadero en colector solar plano, Fuente [13]

El balance térmico de un colector se aprecia en la figura E.2

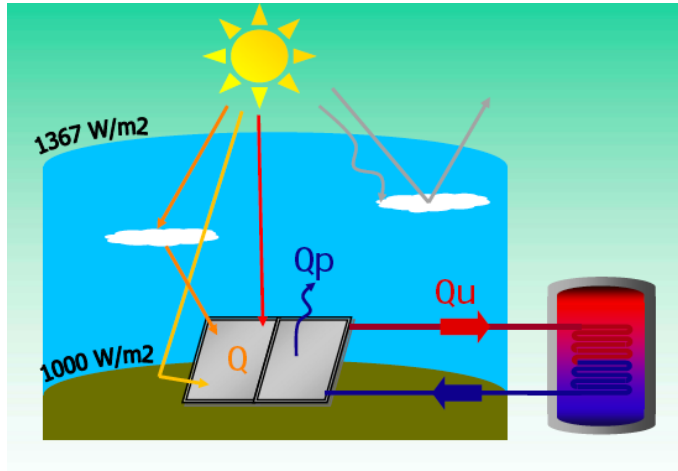


Figura E.2: Balance térmico de colector sometido a radiación solar, Fuente [13]

Acá se aprecia que el calor útil es la diferencia entre la radiación incidente y las pérdidas debido a la reflexión del vidrio. La energía incidente por unidad de tiempo que aprovecha el colector está dada por la irradiación global que incide sobre el colector, por la transmisividad de la cubierta y la absorptividad de la superficie absorbadora. Gráficamente se puede apreciar en la figura E.3

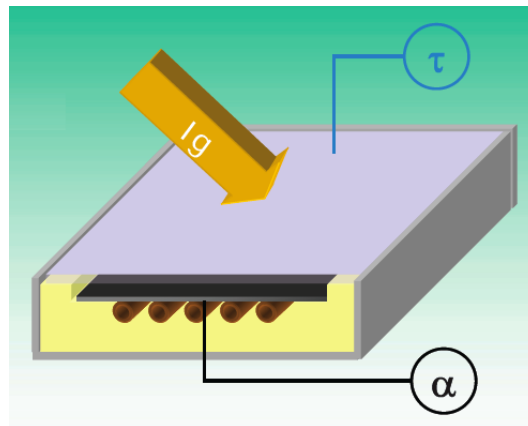


Figura E.3: Energía incidente en colector solar

Al multiplicar esto por el área de captación, se tiene la energía total incidente

$$P_i = A * I * \tau * \alpha \quad (E.1)$$

La potencia perdida al exterior depende del coeficiente global de pérdidas térmicas, la temperatura media del absorbedor, la temperatura ambiente y el área de captación.

$$P_p = A * U_L * (t_c - t_a) \quad (E.2)$$

Luego la potencia útil se expresa de la siguiente forma

$$P_u = P_i - P_p = A[I * \tau * \alpha - U_L * (t_c - t_a)] \quad (E.3)$$

Dada la dificultad de medir la temperatura del absorbedor, se define una temperatura media del fluido

$$T_f = \frac{t_{ent} + t_{sal}}{2} \quad (E.4)$$

Por lo que la potencia útil se define como

$$P_u = F' * A[I * \tau * \alpha - U_L * (t_f - t_a)] \quad (E.5)$$

Donde F' es el factor de irrigación.

Luego es posible definir el rendimiento del colector con la siguiente expresión.

$$\eta = \frac{P_u}{A * I} = F' * \tau * \alpha - F' * U_L * \frac{(t_f - t_a)}{I} \quad (E.6)$$

donde el valor $F' * \tau * \alpha$ se define como el rendimiento óptico del colector, y el valor $F' * U_L$ se define como el factor de pérdidas del colector. Por normas todos los fabricantes de colectores deben realizar ensayos a los colectores que ofrecen y entregan el valor de estos factores, los cuales son esenciales al momento de calcular la energía que se puede obtener en las condiciones de diseño.

Anexo F

Estagnación de colectores solares planos

La estagnación de un colector solar plano ocurre cuando el fluido calotransportador alcanza elevadas temperaturas, suele darse en períodos en los cuales no se le extrae energía al sistema de acumulación. La estagnación se da en etapas, las cuales se describen a continuación

- En un principio ocurre la dilatación el fluido, se produce evaporación en la parte superior de los colectores y hay un leve aumento de presión en el circuito.
- Se produce la expulsión del líquido de los colectores, entra gran cantidad de fluido al vaso de expansión debido a la formación de vapor al interior de los colectores.
- El colector se vacía por ebullición del fluido, el líquido residual se evapora y transporta energía a otros componentes en forma de vapor. El vapor condensado calienta otros componentes hasta la temperatura de ebullición local. La energía se deposita en otros componentes y finalmente se transfiere al medio ambiente por la formación de condensado.
- El colector se termina de vaciar por medio de vapor sobrecalentado.

El aspecto más crítico de la estagnación del colector es el transporte de calor a través de vapor saturado producido en los colectores. El vapor saturado condensa a temperaturas elevadas en los puntos más fríos de la red de alimentación, lo cual puede dañar los componentes que se ubican después de los colectores, como el vaso de expansión.

Una vez que se completa la vaporización del fluido, el colector tiende a alcanzar la temperatura de estagnación y deja de transferir energía al sistema.

Bibliografía

- [1] *“Energía Solar, aplicaciones e ingeniería”*, Pedro Sarmiento, Ediciones universitarias, 3ª edición. 1995
- [2] *“Entrance effects in solar storage tanks”*, Louise Jivan Shah and Simon Furbo, Solar Energy, 2003, Vol. 75, pp. 337-348
- [3] *“Multilayer fabric stratification pipes for solar tanks”*, Elsa Andersen, Simon Furbo and Jianhua Fan, Solar Energy, artículo en presentación
- [4] *“Performance improvement by discharge from different levels in solar storage tanks”* Simon Furbo, Elsa Andersen, Alexander Thur, Louise Jivan Shah and Karin Andersen, Solar Energy, Vol. 79 2005, pp. 431-439
- [5] *“Experimental study of temperature stratification in a ICSSWH with two horizontal tanks”*, A. Madhlopa, R Mgawi and J. Taulo, Solar Energy, Vol. 80, 2006, pp. 989-1002
- [6] *“Extended Sceptre, Manual del usuario”*, David Becker, GTE Sylvania
- [7] *Manual Simusol*, Dolores Alía de Saravia, Luis Saravia y Diego Saravia, Facultad de Ciencias Exactas, U.N.Sa
- [8] *“Plantas de Colectores Solares Planos”*, A. Arata, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile, 1987
- [9] *“Elementos para la creación de un manual de buenas prácticas para instalaciones solares térmicas domiciliarias”*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Hans Petersen Oehninger, Universidad de Chile, 2007
- [10] www.weatherbase.com, Temperaturas promedio.
- [11] www.zilmet.com, Información intercambiadores de calor
- [12] www.chromagen.com, Información colector solar plano
- [13] *Curso Taller de Energía Solar Térmica*, realizado en la Ciudad Imperial del Cusco, Dr. Jorge Cruz Costa, Ineti, Portugal.

- [14] *Conversación Privada*, Empresa Energía Solar a cargo del proyecto
- [15] *Conversación Privada*, Empresa a cargo del criadero de cerdos
- [16] *Juicio Experto*, Ingeniero Roberto Román, Profesor Departamento Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile, Santiago, Chile