
Capítulo 1

Antecedentes

1.1. 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.

1.1.1. 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

$$\eta = \frac{Pu}{A * I_g} \quad (1.1)$$

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

$$\eta = F' * \tau\alpha - F' * U_L \frac{t_f - t_a}{I_g} \quad (1.2)$$

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.

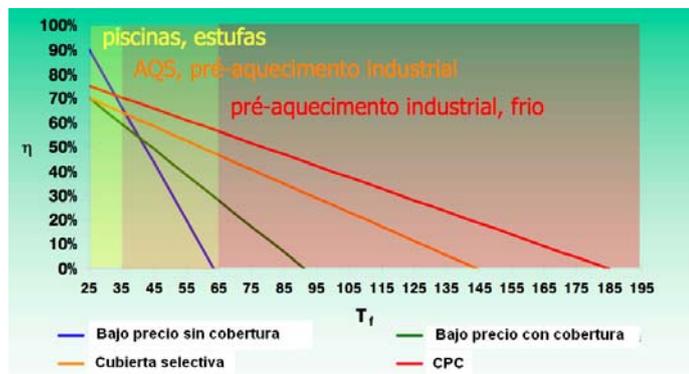


Figura 1.1: Curvas de rendimiento para distintos colectores, Fuente [13]

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.

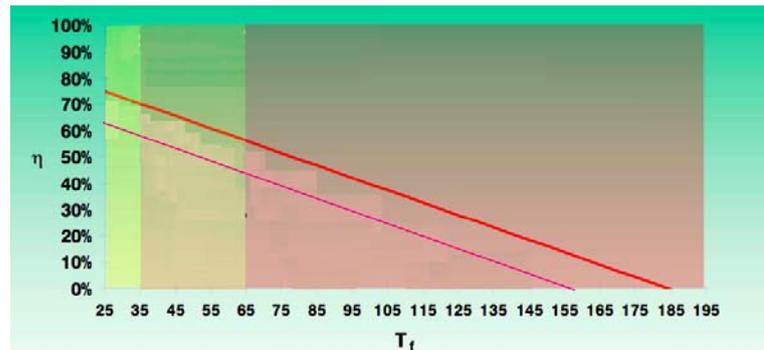


Figura 1.2: Variación de la curva de rendimiento con el caudal, Fuente [13]

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

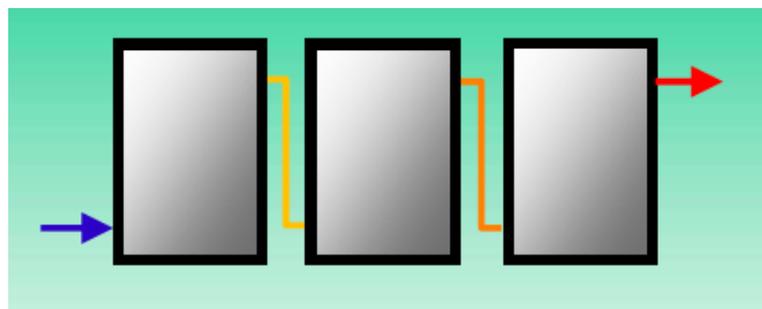


Figura 1.3: Conexión de colectores en serie, Fuente [13]

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

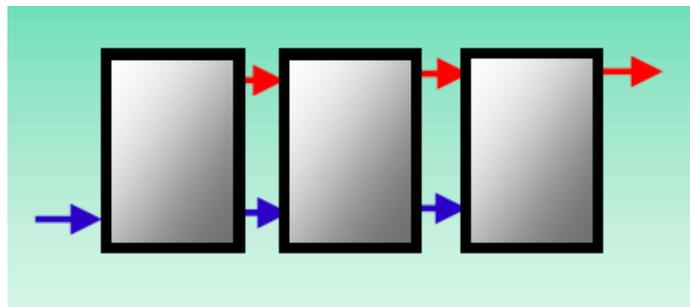


Figura 1.4: Conexión de colectores en paralelo, Fuente [13]

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

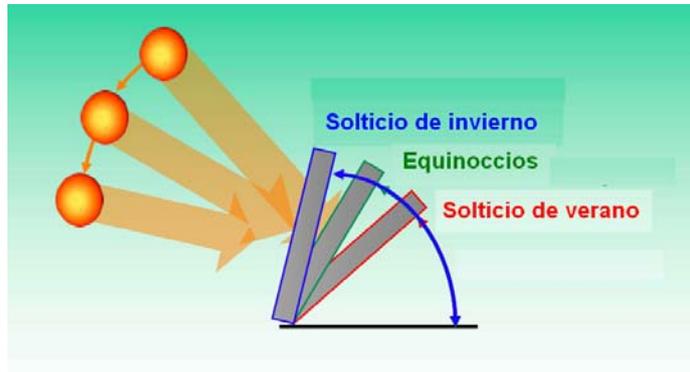


Figura 1.5: Inclinación óptima durante el año, Fuente [13]

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

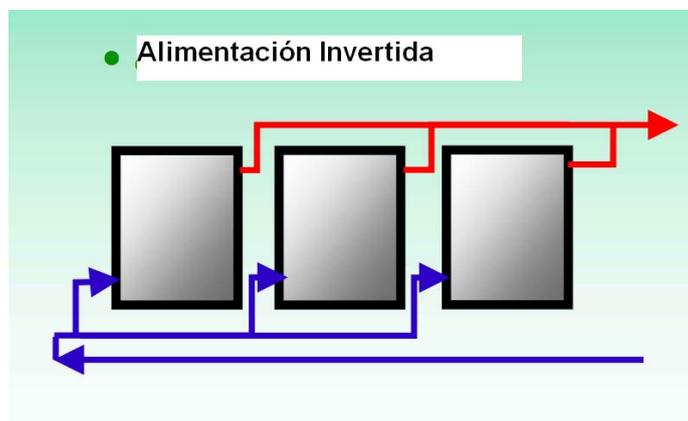


Figura 1.6: Alimentación invertida, Fuente [13]

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.

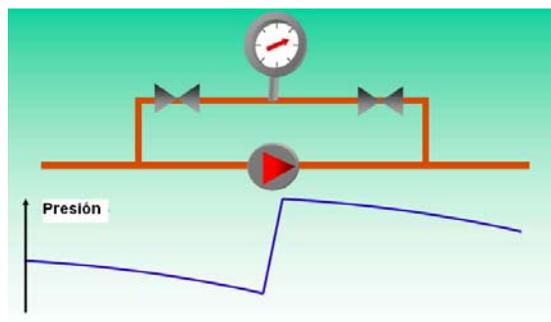


Figura 1.7: Esquema de instalación de manómetro en paralelo, Fuente [13]

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.

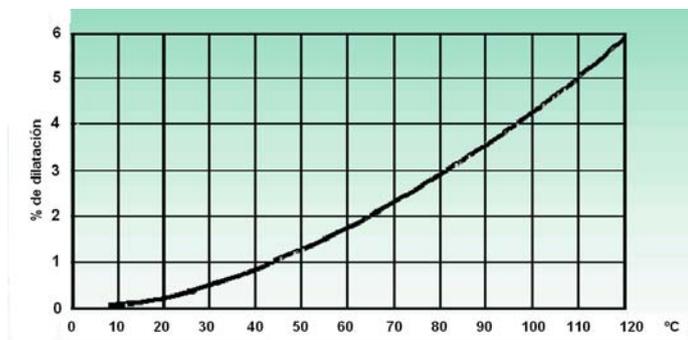


Figura 1.8: % de dilatación vs temperatura, Fuente [13]

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.

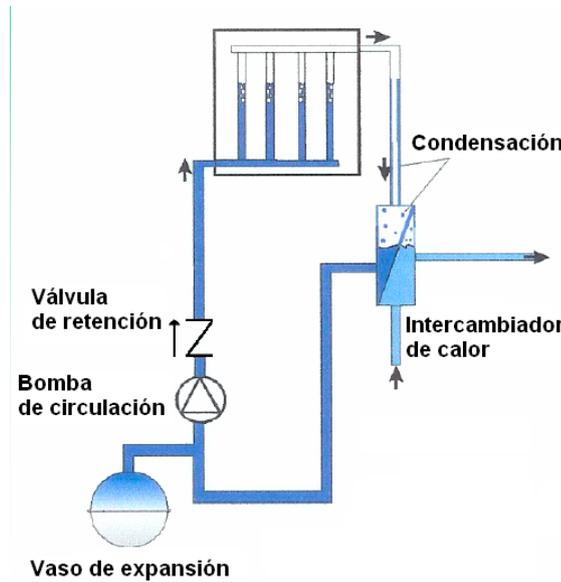


Figura 1.9: Correcta ubicación del vaso de expansión en el circuito primario, Fuente [13]

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.

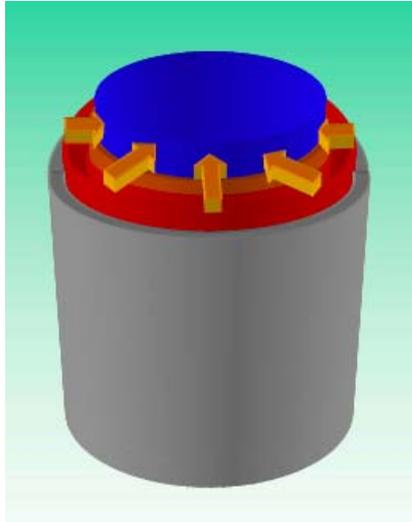


Figura 1.10: Esquema de intercambiador de calor con camisa, Fuente [13]

- 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

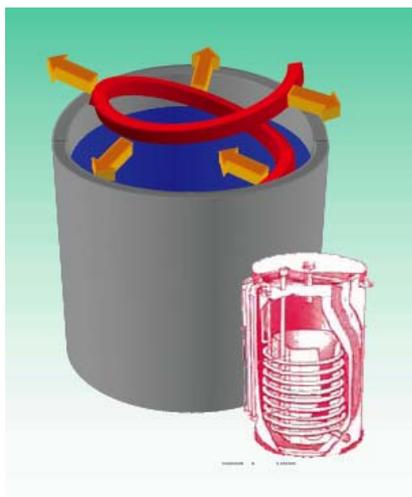


Figura 1.11: Esquema de intercambiador de calor con serpentín, Fuente [13]

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.

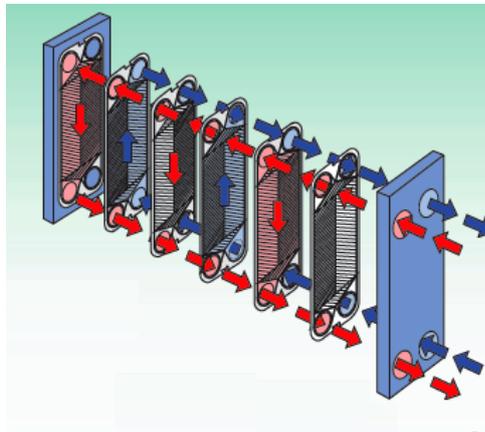


Figura 1.12: Esquema de intercambiador de calor de placas, Fuente [13]

- 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 1.13: 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 [W/m² 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 [°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 [°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 [°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.

1.1.2. 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

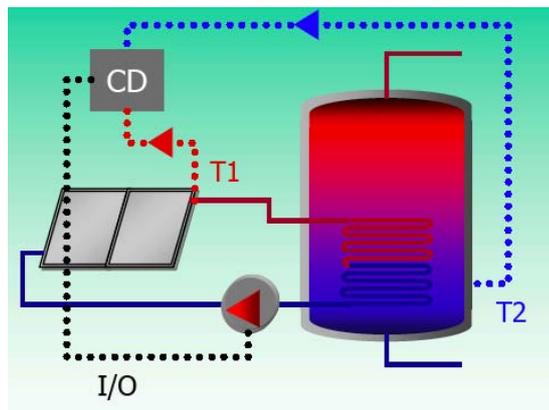


Figura 1.14: Puntos de control en instalación de energía solar térmica, Fuente [13]

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 más 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.

1.1.3. 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.

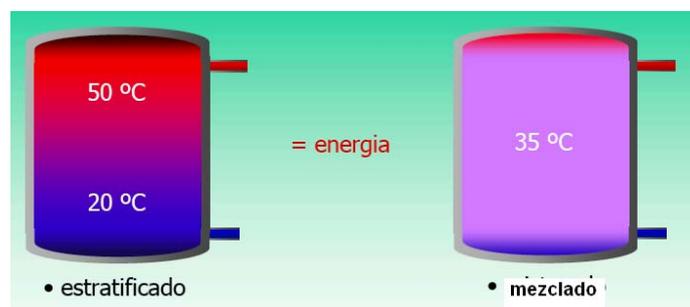


Figura 1.15: Estanques con misma energía, Fuente [13]

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

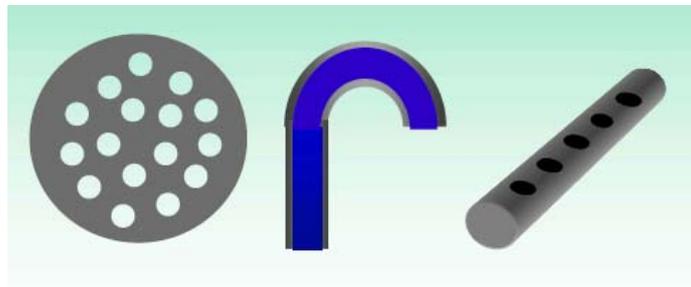


Figura 1.16: Difusores utilizados para promover la estratificación, Fuente [13]

1.1.4. 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.

1.1.5. 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.