



**Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar**

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación y actuación sobre una instalación solar térmica
experimental con tecnología de tubos de vacío*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Salvador Paredes Ballester

DIRECTORES: Antón Cacabelos Reyes
Araceli Regueiro Pereira

CURSO ACADÉMICO: 2020-2021

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación y actuación sobre una instalación solar térmica
experimental con tecnología de tubos de vacío*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universidad de Vigo

RESUMEN

Con el paso del tiempo la inversión en métodos y técnicas para obtener energía renovable ha ido aumentando. Hay muchos métodos que pueden ser utilizados en la obtención de energía renovable para una misma fuente. En este TFG se ha apostado por la tecnología de tubos de vacío que es un método cuya finalidad es aprovechar la energía procedente del Sol.

El objetivo principal de este TFG es simular el comportamiento de un colector solar con la tecnología de tubos de vacío en un programa térmico. Para llevar a cabo este objetivo se ha utilizado el programa TRNSYS, programa en el que se ha introducido el archivo meteorológico de Pontevedra, las características de los distintos componentes que intervienen en la simulación y la posibilidad de que los colectores solares puedan actuar en serie o en paralelo.

Una vez introducidos los parámetros, se ha llevado a cabo un estudio de los rendimientos de los colectores para cada distribución variando temperaturas de consigna y caudales en distintos meses del año. Se puede afirmar que la temperatura de salida en la distribución en serie es siempre mayor que la obtenida en la distribución paralelo y que el rendimiento de los colectores es mayor en los meses de verano.

PALABRAS CLAVE

Energía renovable, colector solar, tubos de vacío, serie/paralelo, simulación térmica, rendimiento.

AGRADECIMIENTOS

Mis primeras palabras de agradecimiento van hacia mis padres y mis hermanos, siempre han estado a mi lado en cada paso que he dado en la vida y sin ellos no hubiera conseguido llegar hasta aquí.

En segundo lugar, quiero agradecer especialmente a mi hermana Raquel los consejos y las recomendaciones que me ha dado para enfocar este trabajo.

Por último, quiero agradecer a mi tutor, D. Antón Cacabelos Reyes, el interés y la ayuda que siempre he recibido por su parte resolviéndome todas las dudas que he ido teniendo, sin él hubiera sido imposible la realización de este trabajo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
2 Antecedentes	1
2.1 La necesidad de las energías renovables.....	1
2.1.1 Clasificación de energías renovables.....	2
2.2 Radiación solar	3
2.2.1 Distribución espectral de la radiación solar	3
2.2.2 Tipos de radiación solar	4
2.3 Situación energética en España	5
2.4 Situación energética en Galicia	6
3 Estado del arte	9
3.1 Clasificación de colectores solares	9
3.1.1 Captadores solares térmicos.....	9
3.1.2 Colectores solares fotovoltaicos.....	9
3.2 Clasificación de colectores solares térmicos.....	10
3.2.1 Formas de transmisión de calor entre los colectores y el fluido	10
3.2.2 Colectores de placa plana.....	10
3.2.3 Colectores de tubos de tubos de vacío	11
3.3 Diferencias entre colectores con tubos de vacío y colectores de placa plana	14
3.4 Tipo de colectores de tubo de vacío	15
3.4.1 Flujo directo	15
3.4.2 Flujo indirecto	16
3.5 Influencia del ángulo de incidencia	17
3.6 Distribución de colectores solares	18
3.6.1 Distribución en serie	18
3.6.2 Conexionado en paralelo.....	19
3.6.3 Distribución mixta	20
3.7 Normas UNE y normativa de aplicación	20
3.8 Programas de simulación de sistemas solares	21

3.8.1 T*SOL	21
3.8.2 Greenius	22
3.8.3 Polysun.....	23
3.8.4 COLsim.....	24
3.8.5 TRNSYS	24
4 Desarrollo del TFG	29
4.1 Ubicación actual	29
4.2 Descripción de la instalación.....	30
4.2.1 Funcionamiento de la instalación	32
4.2.2 Captador solar Escosol.....	33
4.2.3 Depósito interacumulador	34
4.2.4 Vaso de expansión	36
4.2.5 Aerodisipador	38
4.2.6 Sistema hidráulico	38
4.2.7 Centralita solar resol del tasol CS/4	41
4.2.8 Centralita resol WMZ	41
4.3 Análisis y simulación de la instalación con TRNSYS.....	42
4.3.1 Explicación de los elementos que intervienen en la simulación	43
5 Resultados / Validación / Prueba.....	52
5.1 Introducción	52
5.1 Variación de la temperatura de salida del tanque	52
5.2 Rendimiento de los colectores.....	54
5.2.1 Rendimientos en marzo	54
5.2.2 Rendimientos en junio	57
5.2.3 Rendimientos en agosto	59
5.2.4 Rendimientos en noviembre.....	60
5.3 Variación del rendimiento en función del caudal de la bomba	62
5.3.1 Simulación 29 de junio	62
5.3.2 Simulación 23 de marzo	64
5.4 Energía generada	66
6 Conclusiones y líneas futuras	70
6.1 Conclusiones	70
6.2 Líneas futuras	71
7 Bibliografía.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Clasificación colectores solares	1
Figura 2-1 Diagrama de clasificación de energías	2
Figura 2-2 Distribución del espectro electromagnético [4]	3
Figura 2-3 Radiaciones que inciden en el captador solar [6]	4
Figura 2-4 Balance de consumo energético en España 2018 [9]	5
Figura 2-5 Balance de producción de energía renovable en Galicia [10]	6
Figura 2-6 Distribución de energía importada en Galicia [10]	6
Figura 2-7 Representación de la energía primaria total en Galicia [10]	7
Figura 2-8 Diagrama de consumo energético en Galicia [10]	7
Figura 3-1 Captador placa plana [11]	11
Figura 3-2 Funcionamiento tubos de vacío [12]	12
Figura 3-3 Colector de tubos de vacío [14].....	13
Figura 3-4 Funcionamiento de tubos en U [16]	15
Figura 3-5 Transmisión de calor de tubos de vacío [16]	16
Figura 3-6 Esquema de calentamiento del fluido [16]	17
Figura 3-7 Generación de calor en el interior del tubo de vacío heat pipe [17].....	17
Figura 3-8 Influencia de radiación solar en tubos de vacío con ángulo de 0° [15]	18
Figura 3-9 Influencia de radiación solar en tubos de vacío con ángulo de 40° [15]	18
Figura 3-10 Diagrama de placas solares colocadas en serie	19
Figura 3-11 Diagrama de placas solares colocadas en paralelo	19
Figura 3-12 Diagrama mixto de placas solares	20
Figura 3-13 Logotipo programa T*SOL.....	21
Figura 3-14 Logotipo programa Greenius	22
Figura 3-15 Logotipo programa polysun	23
Figura 3-16 Logotipo programa TRNSYS	24
Figura 3-17 Librerías de TRNSYS	26
Figura 3-18 Conexión de dos componentes en TRNSYS	26
Figura 3-19 Icono para realizar simulación en TRNSYS	27
Figura 3-20 Gráfica resultado de simulación con TRNSYS	27
Figura 4-1 Ubicación centro de investigación. [20]	29
Figura 4-2 Cubierta superior del edificio donde se encuentra el captador solar. [20].....	30
Figura 4-3 Captador solar con tubos de vacío.....	30
Figura 4-4 Conjunto de componentes que conforman la instalación solar	31
Figura 4-5 Esquema de conexión de la instalación.....	32

Figura 4-6 Esquema de funcionamiento de la instalación [21]	33
Figura 4-7 Colector solar de tubos de vacío [21]	34
Figura 4-8 Interacumulador de la instalación.....	35
Figura 4-9 Esquema explicativo de funcionamiento del interacumulador [23]	36
Figura 4-10 Vaso de expansión conectado al grupo hidráulico	37
Figura 4-11 Vaso de expansión conectado al interacumulador	37
Figura 4-12 Aerodisipador de la instalación	38
Figura 4-13 Grupo hidráulico de la instalación.....	39
Figura 4-14 Diagrama explicativo de funcionamiento grupo hidráulico [25]	39
Figura 4-15 Depósito fluido calor-portante	40
Figura 4-16 Bomba grupo hidráulico	40
Figura 4-17 Centralita solar resol del tasol CS/4 [26]	41
Figura 4-18 Centralita Resol WMZ [21]	41
Figura 4-19 Instalación de tubos de vacío en TRNSYS	43
Figura 4-20 Icono datos meteorológicos	43
Figura 4-21 Archivo meteorológico de Pontevedra	43
Figura 4-22 Parámetros enlazados entre el archivo meteorológico y el colector solar	44
Figura 4-23 Icono colector solar	45
Figura 4-24 Parámetros del colector solar	45
Figura 4-25 Icono válvula de tres vías con control	45
Figura 4-26 Función válvula V3V1	46
Figura 4-27 Función válvula V3V2.....	46
Figura 4-28 Icono Interacumulador.....	47
Figura 4-29 Icono Controlador de temperatura.....	48
Figura 4-30 Cuadro entradas monitor de temperatura.....	48
Figura 4-31 Icono aerodisipador	48
Figura 4-32 Parámetros enlazados entre el aerodisipador y el laboratorio	49
Figura 4-33 Icono laboratorio de mecánica	49
Figura 4-34 Parámetros laboratorio	49
Figura 4-35 Icono ventilador aerodisipador.....	50
Figura 4-36 Icono termostato aerodisipador	50
Figura 4-37 Icono válvula de tres vías.....	50
Figura 4-38 Icono bomba.....	50
Figura 4-39 Icono centralita solar.....	51
Figura 4-40 Parámetros de la centralita solar.....	51
Figura 5-1 Simulación año completo colectores en serie	52

Figura 5-2 Gráfica Activación de la bomba.....	53
Figura 5-3 Gráfica funcionamiento aerodispador	53
Figura 5-4 Gráfica rendimiento marzo para 40°C	55
Figura 5-5 Gráfica rendimiento marzo para 50°C	55
Figura 5-6 Gráfica rendimiento marzo para 60°C	56
Figura 5-8 Gráfica rendimiento junio para 40°C.....	57
Figura 5-9 Gráfica rendimiento junio para 50°C.....	57
Figura 5-10 Gráfica rendimiento junio para 60°C	58
Figura 5-12 Gráfica rendimiento agosto para 40°C.....	59
Figura 5-13 Gráfica rendimiento agosto para 50°C.....	59
Figura 5-14 Gráfica rendimiento agosto para 60°C.....	60
Figura 5-16 Gráfica rendimiento noviembre para 40°C	61
Figura 5-17 Gráfica rendimiento noviembre para 50°C	61
Figura 5-18 Gráfica rendimiento noviembre para 60°C	62
Figura 5-20 Rendimiento 29 de junio Serie 1	63
Figura 5-21 Rendimiento 29 de junio Serie 2	63
Figura 5-22 Rendimiento 29 de junio Paralelo	63
Figura 5-24 Rendimiento 23 de marzo Serie 1	64
Figura 5-25 Rendimiento 23 de marzo Serie 2	65
Figura 5-26 Rendimiento 23 de marzo Paralelo.....	65
Figura 5-28 Gráfica energía generada para 40°C	66
Figura 5-30 Balance energía obtenida 40°C.....	67
Figura 5-31 Gráfica energía generada para 50°C	67
Figura 5-33 Balance energía obtenida 50°C.....	68
Figura 5-34 Gráfica energía generada para 60°C	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Diferencias entre paneles solares de placa plana y paneles solares con tubos de vacío [15]	1
	4
Tabla 4-1 Especificaciones técnicas colector solar Escosol	33
Tabla 4-2 Especificaciones técnicas serpentín inferior interacumulador	34
Tabla 4-3 Especificaciones técnicas serpentín superior interacumulador	35
Tabla 4-4 Especificaciones técnicas vaso de expansión grupo hidráulico	37
Tabla 4-5 Especificaciones técnicas vaso de expansión depósito fluido calor-portante	38
Tabla 4-6 Especificaciones técnicas grupo hidráulico Escosol.....	39
Tabla 5-1 Comparación rendimientos marzo	56
Tabla 5-2 Comparación rendimientos junio.....	58
Tabla 5-3 Comparación rendimientos agosto	60
Tabla 5-4 Comparación rendimientos noviembre	62
Tabla 5-5 Comparación caudales 29 de junio	64
Tabla 5-6 Comparación caudales 23 de marzo	65
Tabla 5-7 Datos energía generada para 40°C	66
Tabla 5-8 Datos energía generada para 50°C	68
Tabla 5-9 Datos energía generada para 60°C	69

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Las energías renovables cada vez están teniendo mayor importancia en la sociedad actual ya que no son contaminantes y su obtención está disponible. Debido a esto también se están desarrollando diferentes métodos y mecanismos para obtener la energía de medios como el agua, el sol, el viento y la tierra. Este Trabajo de fin de grado consiste en aprovechar la energía procedente del sol mediante unos colectores solares que generan energía térmica.

La producción de energía térmica tiene lugar cuando el fluido que circula por el interior de los colectores solares se calienta.

Hay diferentes formas de obtener energía térmica, por un lado, están los colectores de placa plana en los que suele circular agua por su interior calentándose a medida que avanza. Por otro lado, también existen los colectores de tubos de vacío, objeto de este estudio, que se dividen en: colectores de tubos de vacío con flujo directo y colectores de vacío de flujo indirecto.

En los colectores de tubos de vacío con flujo directo, el fluido que circula por el interior de estos colectores suele ser un fluido calor-portante con unas características específicas que varían en función de la ubicación en la que se encuentren los colectores.

Mientras que en los colectores de tubos de vacío con flujo indirecto el fluido calor-portante circula por el interior de los tubos en circuito cerrado dentro del tubo. El fluido se calienta y se vaporiza hasta que llega al condensador donde se enfría y vuelve a bajar. Cuando el fluido vaporizado alcanza el condensador, transmite el calor al fluido que circula por su exterior.

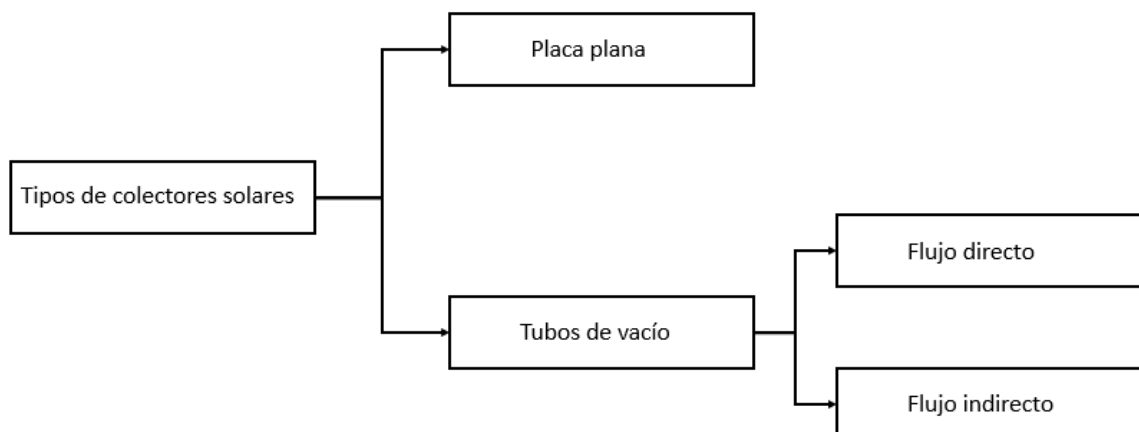


Figura 1-1 Clasificación colectores solares

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es conseguir simular con el programa TRNSYS la instalación solar térmica que se encuentra en el edificio de investigación del centro universitario de la defensa situado en la Escuela Naval Militar de Marín, España.

La simulación de la instalación implica añadir los parámetros reales que se dan en los diferentes componentes que conforman la instalación en el programa de simulación térmico TRNSYS.

Adicionalmente, otro objetivo es conseguir cambiar la distribución de los colectores solares y hacer simulaciones con ellos cuando están dispuestos en serie y en paralelo. De esta forma se podrá realizar el análisis de diferentes parámetros tales como: estudio del rendimiento de los colectores cuando están en serie y en paralelo para distintas temperaturas de consigna del acumulador, cantidad de energía que el intercambiador cede al depósito y la cantidad de energía que el aerodisipador disipa al ambiente. Otro objetivo será la obtención de los rendimientos de los colectores en función del caudal de la bomba.

2 ANTECEDENTES

2.1 La necesidad de las energías renovables

Los combustibles fósiles son los causantes de la producción de gases de efecto invernadero que afectan directamente al cambio climático, este es un motivo por el cual deben ir ganando importancia las energías renovables en nuestro planeta ya que son fuentes de energía limpias e inagotables. Debido a su gran disponibilidad, el coste de obtener energía a través de estas fuentes va disminuyendo con el paso del tiempo mientras que, en el caso de las energías no renovables va aumentando ya que cada vez hay menos recursos que se puedan explotar para contribuir a ese tipo de energías. [1]

Los acuerdos de París entraron en vigor en 2016 y fue la primera vez que se logró un objetivo común para muchos países, fueron casi 200 países los que firmaron y con esta firma se comprometieron a reducir sus emisiones con la finalidad de reducir la temperatura media del planeta por debajo de los dos grados, siendo éste el límite en el que los efectos del cambio climático son más notorios.

La inversión y el estudio en energías renovables es vital para luchar contra el cambio climático debido a que en los últimos años ha ido aumentando la temperatura media del planeta siendo el 2020 el año más cálido del mundo superando las temperaturas registradas en 2016 las cuales eran las más altas hasta la fecha.

El avance en tecnologías renovables traerá consigo prosperidad económica a nivel mundial. La agencia internacional de energías renovables (IRENA) impone duplicar la inversión en renovables que produzcan energía eléctrica hasta establecerla en el 57% en todo el mundo en 2030 con el fin de alcanzar los acuerdos de París.

Con el empleo de energías renovables estaremos eliminando la producción de CO₂ que es un gas que influye en el calentamiento global, trayendo consigo sequías, deshielos, la extinción de distintas especies y fenómenos meteorológicos cada vez más radicales. También el Dióxido de Azufre y los Óxidos de Nitrógeno tienen un gran impacto sobre nuestra salud, desde ayudar a que se genere cáncer hasta producir alergias y asma. Estos gases suelen tener su origen en fuentes de energía no renovables, en concreto, en la combustión a altas temperaturas. Eliminando estos gases estaremos ahorrando mucho dinero en el sector sanitario y ambiental. El cambio climático pone en peligro a los ecosistemas del planeta y es algo que debemos frenar. [2]

2.1.1 Clasificación de energías renovables

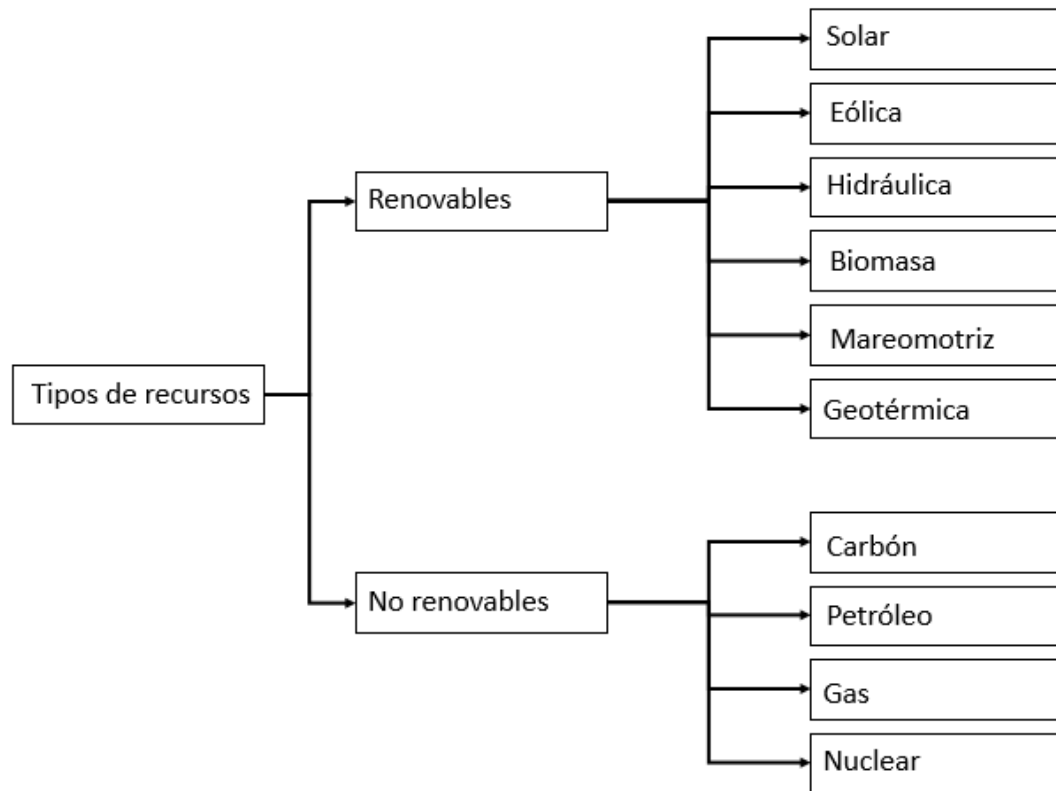


Figura 2-1 Diagrama de clasificación de energías

Energía solar: La energía solar es la que obtenemos del sol, mediante placas solares se absorbe la radiación procedente del sol y se genera electricidad que podemos almacenar o administrar a la red eléctrica. Existen otras placas que se pueden utilizar para calentar fluidos, este tipo de placas son las solares térmicas, las cuales serán objeto de nuestro trabajo. Dependiendo del tipo de placa solar también tenemos la energía termoeléctrica cuya finalidad es emplear la radiación solar para calentar un fluido, este genera vapor de agua y el vapor de agua acciona una turbina que produce electricidad. [3]

Energía eólica: La energía eólica procede de la fuerza del viento. A través de los molinos de viento situados en los parques eólicos se genera electricidad. Los molinos están conectados a generadores de electricidad y producen electricidad al mover sus aspas debido a la acción del viento.

Energía Hidráulica: La energía hidroeléctrica o hidráulica aprovecha la fuerza del agua para generar energía eléctrica, normalmente este tipo de energía se obtiene en presas.

Biomasa: Este tipo de energía es una de la más económicas y ecológicas de generar energía eléctrica en una central térmica. Consiste en la combustión de residuos orgánicos de origen animal y vegetal con productos biodegradables.

Mareomotriz: La mareomotriz o undimotriz según si aprovecha la fuerza de las mareas o de las olas, es la producción de energía eléctrica gracias a la fuerza del mar.

Geotérmica: Energía alternativa que nace en el corazón de la tierra, la energía geotérmica es aquella que aprovecha las altas temperaturas de yacimientos bajo la superficie terrestre (normalmente volcánicos) para la generación de energía a través del calor, pues suelen encontrarse a 100 o 150 grados centígrados.

2.2 Radiación solar

La radiación solar es la transferencia de energía procedente del sol mediante ondas electromagnéticas. La energía que emite el sol es radiación en forma de onda corta, al pasar por la atmósfera esta radiación se ve atenuada debido a fenómenos como la difusión, reflexión en las nubes y la absorción de partículas en suspensión. Después de sufrir esta atenuación logra llegar a la superficie terrestre.

2.2.1 Distribución espectral de la radiación solar

La oscilación o aceleración de cargas eléctricas genera ondas que constituyen la radiación electromagnética. Las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio de propagación pudiendo llegar a la superficie terrestre desde el sol o las estrellas. [4]

La longitud de onda (l) y la frecuencia (m) de las ondas electromagnéticas se relacionan mediante la ecuación: $C = l \times m$ (donde C es la velocidad de la luz), alguna de las cualidades que obtenemos de estos parámetros son: determinar la energía de las ondas, su poder de penetración, su visibilidad y otras características. Las ondas electromagnéticas se desplazan a la velocidad de la luz ($C = 299.792 \text{ km/s}$) en el vacío, independientemente del valor de su frecuencia o longitud de onda.

Como hemos mencionado anteriormente, el sol emite una radiación en forma de onda corta, la longitud de esta onda suele venir dada en nanómetros (nm). Esta radiación suele estar en el intervalo de 150 a 4000 nm.

Dentro de la radiación electromagnética podemos distinguir distintas longitudes de onda correspondientes a frecuencias muy altas (rayos gama) o longitudes de onda correspondientes a frecuencias muy bajas (ondas radio). El conjunto de todas ellas constituye lo que conocemos como espectro solar o electromagnético.

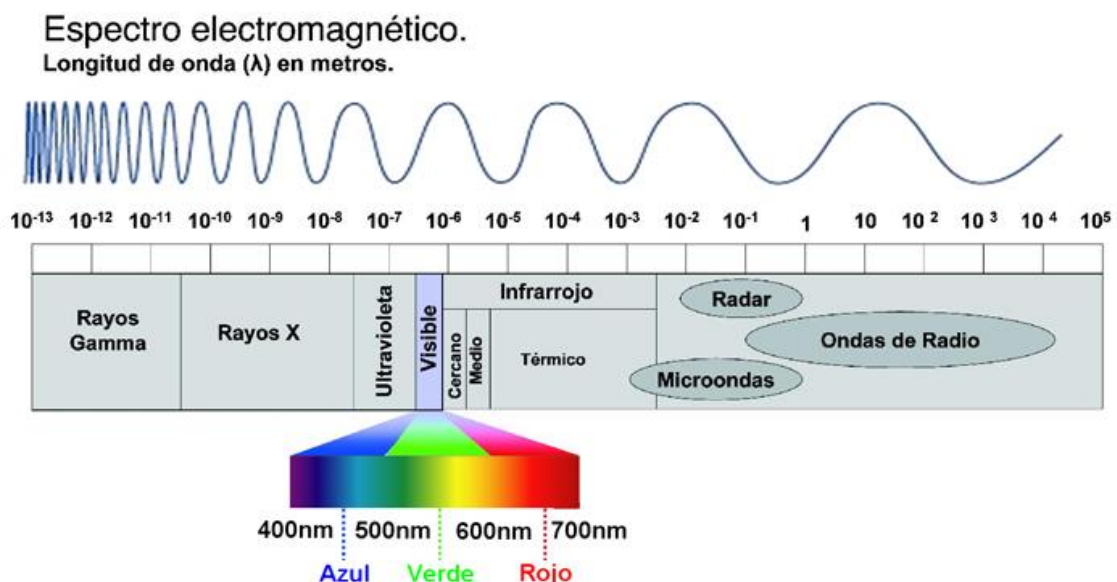


Figura 2-2 Distribución del espectro electromagnético [4]

2.2.2 Tipos de radiación solar

- a) **Radiación directa:** Llamamos radiación directa a los rayos que consiguen atravesar la atmósfera sin verse alterados por las partículas en suspensión. Este tipo de radiación disminuye en días nublados. [5]
- b) **Radiación Difusa:** La radiación difusa, también conocida como indirecta, es la que procede de algún choque con partículas de la atmósfera y que acaba llegando a la superficie después de esta colisión. Cuanta más presencia haya de nubes, mayor será la radiación difusa. Supone un tercio de la radiación anual que se recibe en la superficie terrestre.
- c) **Radiación Reflejada:** está formada por aquellos rayos que han sido reflejados por otros elementos (incluida la superficie terrestre) y que son aprovechados a su vez por otros objetos. Al cociente entre la radiación reflejada y la radiación incidente le llamamos albedo.

A la suma de los tres tipos de radiación se le llama **radiación total**.

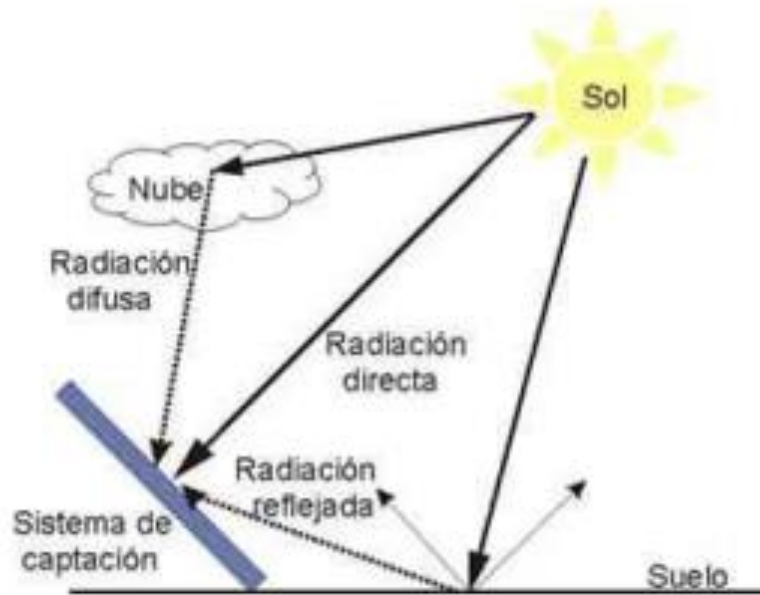


Figura 2-3 Radiaciones que inciden en el captador solar [6]

2.3 Situación energética en España

España es un país que depende en gran medida de las energías importadas, esta dependencia genera un gran gasto económico para el país que se podría reducir si potenciáramos nuestros propios recursos, especialmente los renovables. La energía primaria que más se utiliza en España proviene del petróleo, del carbón y del gas, estos combustibles fósiles son no renovables además de muy contaminantes. [7]

La Unión Europea ha fijado unos objetivos comunes para todos los países que la conforman con el fin de reducir las emisiones contaminantes y en estos objetivos participa directamente España, que además se fija unos objetivos propios en lo que al sector energético se refiere. Algunos de estos retos son los siguientes:

- España fija por ley sus objetivos nacionales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a 2030 en un 20% respecto a los niveles de 1990. De esta forma España cumple con el marco establecido por la unión Europea y también estaría cumpliendo los acuerdos de París mencionados en La necesidad de las energías renovables. [8]
- Conseguir la neutralidad de emisiones antes de 2050, adelantándose a los acuerdos de París y consolidando los objetivos de la Unión Europea. Con esto se pretende que el sistema eléctrico en España sea 100% renovable antes de mitad de siglo y que el consumo energético total sea como mínimo un 35% renovable. Se espera que el sector eléctrico sea renovable en 2030 al menos un 70%.
- En el actual marco de recuperación frente al COVID-19, una fuente de generar actividad económica es la transición energética, trayendo a inversores con el fin de generar prosperidad económica inclusiva. El PNIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima) estima que esta transición traerá consigo más de 200.000 millones de euros y una generación de 300.000 empleos.

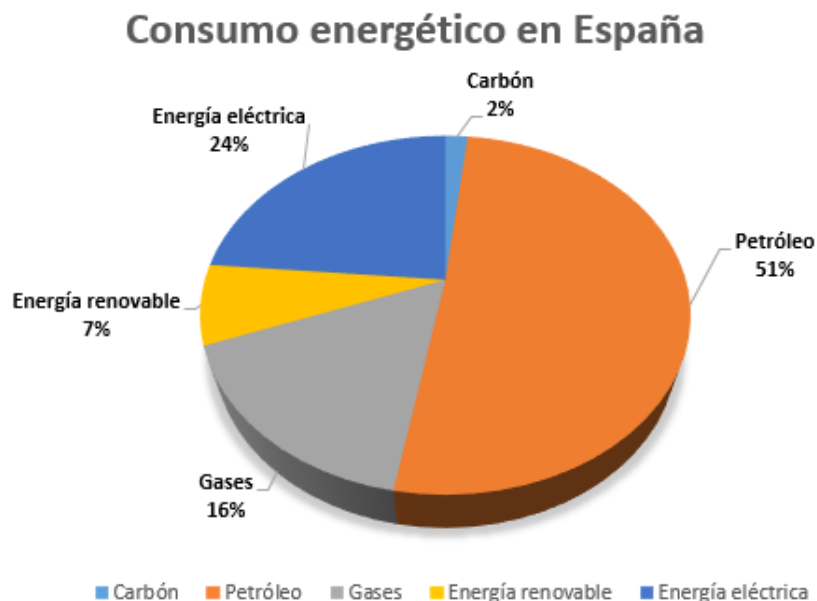


Figura 2-4 Balance de consumo energético en España 2018 [9]

2.4 Situación energética en Galicia

En este apartado desarrollaremos el consumo de energía en la Comunidad de Galicia. También hablaremos de la energía que Galicia es capaz de producir y la energía que Galicia, de forma irremediable, tiene que importar. Basándonos en el último balance energético proporcionado por el INEGA (Instituto Energético de Galicia) 2018. [10]

La energía primaria gallega es el resultado de la energía producida por el conjunto de agentes naturales originarios de Galicia. Una de las energías primarias más importantes como era el carbón dejó de explotarse debido al cierre de las minas por la legislación medioambiental en el año 2008.

La energía total procede de la suma de la energía primaria más la energía importada que más tarde se transforman en electricidad, calor y combustibles para su posterior consumo.

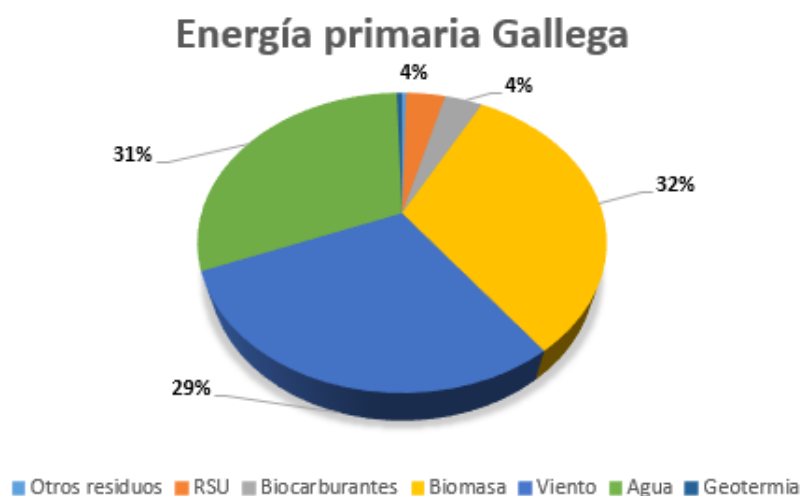


Figura 2-5 Balance de producción de energía renovable en Galicia [10]

Durante el año 2018 la biomasa fue el mayor aporte de energía primaria con un 32% sobre el total seguida por el agua con un 31% y el viento con un 29%.

La energía importada es el resultado de aquellos recursos autóctonos insuficientes para satisfacer la demanda energética en Galicia. En este gráfico podemos observar la cantidad energía importada:

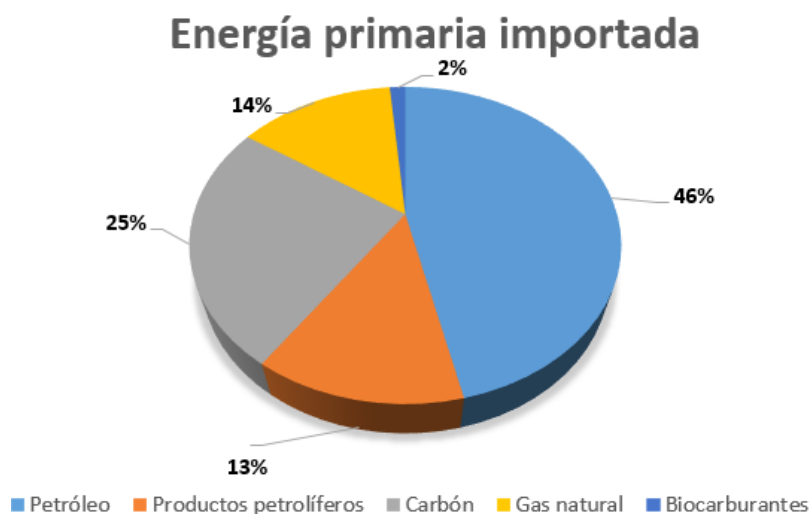


Figura 2-6 Distribución de energía importada en Galicia [10]

La energía importada supone un 81% de la energía total mientras que la energía primaria gallega constituye solo un 19%. En el siguiente gráfico se puede apreciar claramente la contribución de cada energía:

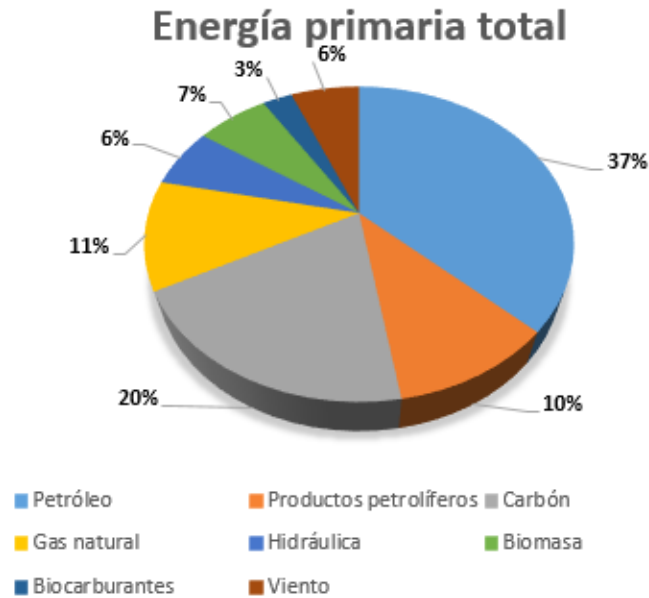


Figura 2-7 Representación de la energía primaria total en Galicia [10]

El consumo de energía en Galicia está liderado por el combustible para transporte siendo este un 34% seguido de la electricidad con un 26% y el combustible para uso térmico con un 25%.

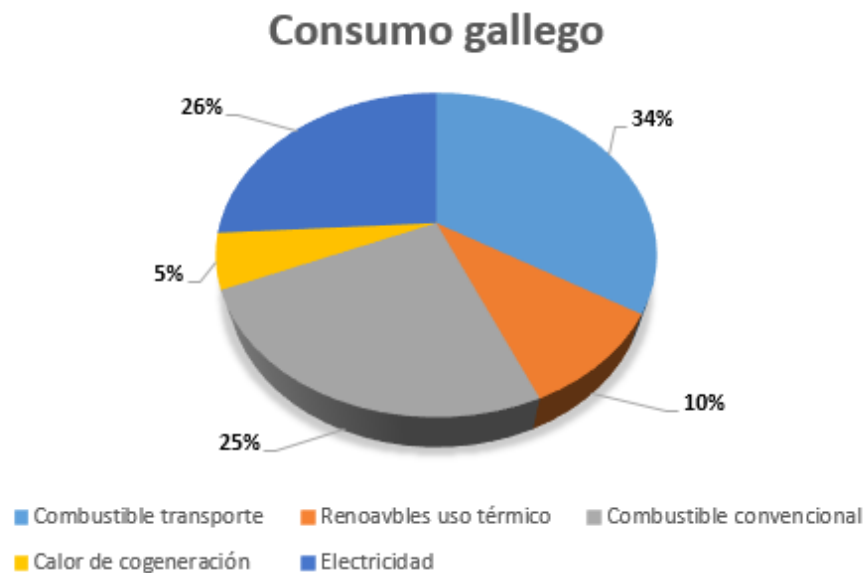


Figura 2-8 Diagrama de consumo energético en Galicia [10]

El sector energético gallego también tiene unos objetivos con la Unión Europea con la fecha marcada de 2030:

- Reducir un 40% los efectos de gases invernadero.
- Lograr una participación del 32% en el consumo de energías renovables, este es un objetivo que se revisará en 2023.
- Conseguir que el 15% de la electricidad generada logre llegar a otros estados miembros.

3 ESTADO DEL ARTE

A continuación se van a exponer los principales tipos de colectores solares que existen centrándonos en los colectores solares térmicos. Dentro de los colectores solares térmicos existen dos tipos de colectores: de placa plana y de tubos de vacío. Se hará una comparativa de ambos tipos de colectores.

Posteriormente se va a desarrollar el funcionamiento de los colectores solares térmicos de tubos de vacío. Este funcionamiento puede ser de flujo directo o indirecto.

Otro aspecto del que se hablará será la influencia del ángulo de incidencia en los colectores y las posibles distribuciones que se pueden dar en los colectores.

Por último se hablará de la normativa que regula la energía solar térmica y los posibles programas que se pueden utilizar para hacer simulaciones térmicas.

3.1 Clasificación de colectores solares

En función de si la radiación incidente del sol se utiliza para generar energía térmica o eléctrica utilizaremos distintos tipos de captadores solares, térmicos o fotovoltaicos.

3.1.1 Captadores solares térmicos

La finalidad del colector solar térmico es aprovechar la radiación solar que incide en él para generar energía térmica que se transfiere a un fluido de forma que aumente su temperatura. Dentro de este trabajo se analizan dos tipos de colectores solares térmicos como son: los colectores de placa plana y de tubos de vacío, siendo estos últimos objeto de la simulación.

Este tipo de colectores constituye el componente más importante en las instalaciones solares térmicas ya que consiguen lograr su objetivo gracias a ellos. Además de realizar la función de generar calor de manera eficiente, deben estar preparados para soportar diferentes situaciones climatológicas como podrían ser la lluvia, nieve, granizo, polvo, etc. Otro aspecto que hay que tener en cuenta es que deben soportar temperaturas extremas tanto altas como bajas. [9]

3.1.2 Colectores solares fotovoltaicos

El principal objetivo de la energía solar fotovoltaica es aprovechar la radiación solar transformándola en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico cuyo funcionamiento consiste en

transmitir electrones por un material cuando es iluminado por radiación electromagnética como la emitida por el sol.

Dentro de los captadores solares fotovoltaicos podemos diferenciar distintas tecnologías: las instalaciones fijas, seguimiento solar a un eje y seguimiento solar a dos ejes. Además, estas instalaciones se pueden clasificar en: instalaciones aisladas, están orientadas a la comunicación y al suministro de electricidad en los ambientes rurales y las instalaciones conectadas a la red cuya finalidad es la venta de energía eléctrica y el autoconsumo.

Existe una gran diversidad de aplicaciones que podemos lograr con estos colectores desde unas simples como podrían ser el funcionamiento de una calculadora o relojes solares hasta algunas más complejas como satisfacer grandes plantas de generación eléctrica.

3.2 Clasificación de colectores solares térmicos

Dentro de los colectores solares térmicos, se pueden distinguir dos tipos bien diferenciados: colectores de placa plana y colectores de tubos de vacío.

Los dos se encargan de aprovechar la energía procedente del sol pero la superficie y el funcionamiento que se emplea para obtener esta energía es diferente. El colector de placa plana recibirá la energía en un panel plano mientras que el colector de tubos de vacío recibirá esta energía a través de los distintos tubos que residen en él.

La finalidad de ambos colectores será la de calentar un fluido.

3.2.1 Formas de transmisión de calor entre los colectores y el fluido

Existen 3 formas para transmitir el calor entre el colector y el fluido que circula por su interior:

a) Por conducción: El calor se transmite entre dos cuerpos que están en contacto directo y a distinta temperatura. El flujo de transmisión dependerá del tamaño de la superficie de contacto y de la diferencia de temperaturas existente entre ambos cuerpos.

b) Por convección: Transmisión de calor que ocurre entre dos fluidos, ocurre cuando un fluido se calienta perdiendo densidad y ascendiendo sobre el medio más frío y denso al que transfiere el calor.

c) Por radiación: No requiere que los cuerpos estén en contacto, permitiendo incluso el vacío entre ambos. Cualquier cuerpo que se encuentre a una temperatura más elevada que cero absoluto (-273°C) emite radiación electromagnética. Emitirá mayor radiación electromagnética cuanto mayor sea su temperatura.

3.2.2 Colectores de placa plana

Es un mecanismo que se encarga de recoger la radiación procedente del sol y transmitirla a un fluido. Aunque existe una gran variedad de estos, el más común para conseguir agua caliente es el colector solar plano con placa de vidrio. [11]

Su funcionamiento está relacionado con el efecto invernadero ya que la radiación solar (onda corta) atraviesa la cubierta e incide en la placa absorbente haciendo que esta aumente su temperatura. Cuando

se calienta genera una radiación de onda larga que queda retenida en el interior de la estructura ya que es opaca a este tipo de radiación.

En la Figura 3-1 se puede observar un colector plano típico con cubierta de vidrio, la radiación pasa a través de esta cubierta transparente y llega a la placa absorbente (normalmente de color oscuro) que absorbe esta energía para, posteriormente, transferirla a los conductos que contienen el fluido calor-transportante que serán los encargados de llevar esta energía hasta su uso o almacenamiento.

La placa absorbente y la carcasa están aislados térmicamente para evitar los efectos de la conducción. Los conductos por los que circula el fluido pueden estar inmersos dentro de la placa absorbente o soldados a la misma.

La cubierta superior puede estar formada por distintas capas hechas de algún material que presente alta transmisibilidad de la radiación de onda corta y de baja transmisibilidad de onda larga con el objetivo de reducir los efectos de convección y también las pérdidas por irradiación debido al efecto invernadero.

Estos colectores presentan mayor rendimiento en días soleados y en climas cálidos, perdiendo gran eficiencia cuando las condiciones meteorológicas no son favorables.

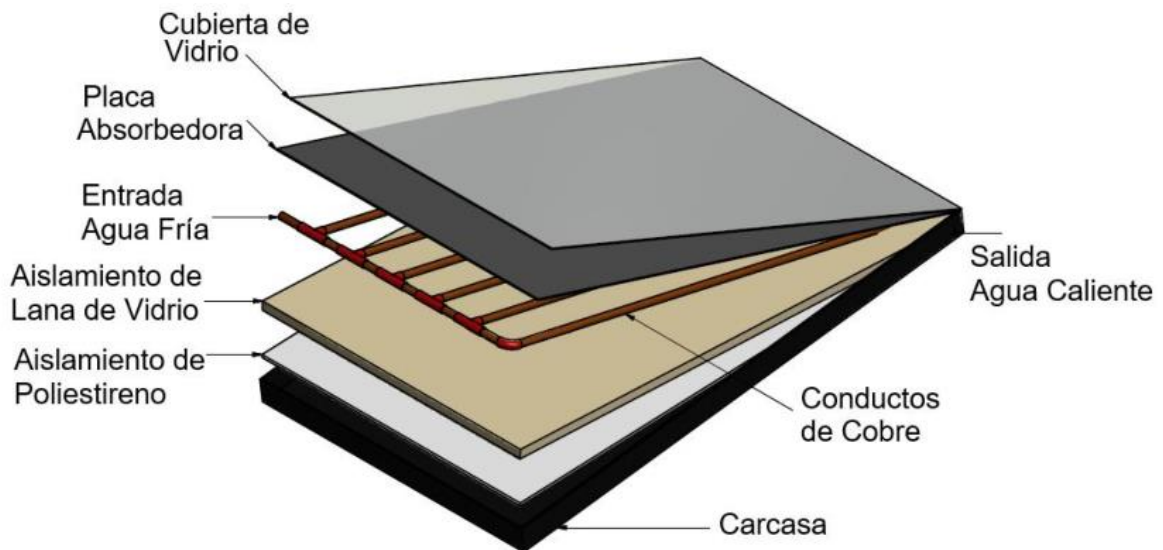


Figura 3-1 Captador placa plana [11]

3.2.3 Colectores de tubos de tubos de vacío

En función de cómo obtenga calor el fluido que circula por el interior de estos colectores, se diferencian en dos tipos: flujo directo y flujo indirecto.

En el flujo directo el fluido calor-transportante circula por el interior del tubo de vacío mientras que en el flujo indirecto el fluido se calienta al pasar por un tubo de cobre que está conectado al tubo de vacío.

3.2.3.1 Principio de funcionamiento

Un panel de tubos de vacío es un tipo de colector solar térmico. Su funcionamiento consiste en absorber la radiación solar y transformarla en energía térmica. Según el recorrido que siga el fluido calor-transportante, la forma en la que adquiere calor dicho fluido será diferente. Los tubos están paralelos unos

con otros conformando el panel. En la parte superior del panel se encuentra un mástil que contiene el fluido calor- portante y los tubos paralelos son los encargados de recibir la radiación solar.

Algunos paneles suelen incorporar una placa reflectante debajo de los tubos de manera que se consigue aprovechar más la radiación solar.

Los tubos están formados por un doble tubo de vidrio y entre sus superficies se ha realizado un vacío muy elevado (sobre 0,005 pascales), la superficie del vidrio interior suele tratarse con un metal pulverizado para aumentar su rendimiento permitiéndole una mayor absorción de la radiación. Por el interior de estos tubos circula el fluido calor-portante que, al calentarse, se evapora absorbiendo el calor latente de vaporización. Ese vapor se desplaza hacia la zona de menor temperatura dentro del tubo y se produce su condensación liberando así el calor latente al circuito primario. El líquido vuelve a descender debido a la gravedad y comienza de nuevo el ciclo de evaporación-condensación. [5]

Otro funcionamiento que tienen este tipo de colectores consiste en que el fluido puede circular de manera directa por el interior de los tubos de vacío calentándose a medida que va recorriendo el interior de estos.

En función de la forma en la que el fluido adquiere calor, los tubos de vacío se pueden clasificar en tubos de vacío de flujo indirecto o tubos de vacío de flujo directo.

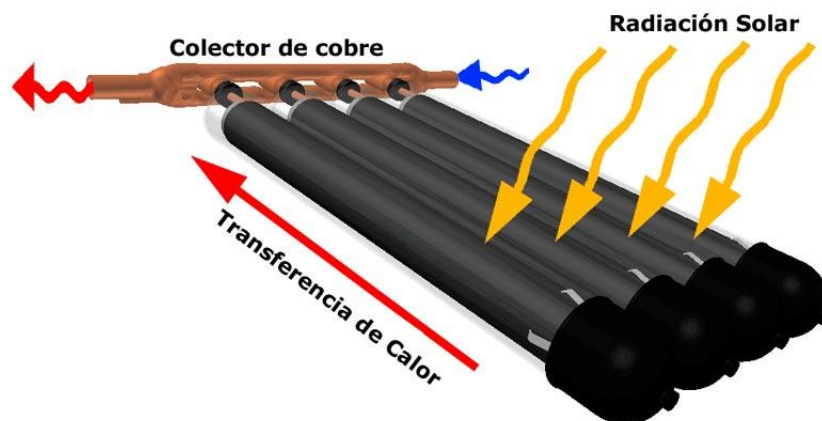


Figura 3-2 Funcionamiento tubos de vacío [12]

3.2.3.2 Características

La tecnología de tubos de vacío es actualmente la que mayor rendimiento ofrece en el campo de los colectores solares térmicos. Esto es debido a unos procesos físicos.

En los colectores solares existen diferentes relaciones de transmisión de calor, al incidir el sol en el colector, este sube de temperatura y ese calor es el que se busca para calentar el fluido que corresponde. De forma irremediable parte de ese calor generado se perderá en calentar el aire que está en contacto con el colector (convección y conducción). También otra fracción de ese calor se pierde por radiación ya que al aumentar la temperatura, el colector emite con más energía que el ambiente en el que se encuentra y por lo tanto genera pérdidas en ese sentido. [13]

En función de la relación entre la energía que los colectores consiguen captar del sol y las pérdidas que sufren, habrá unos colectores mejores que otros. Dos opciones que tenemos para mejorar esa

eficiencia son: aumentar la ganancia de energía que procede del sol o disminuir las pérdidas que se producen en ellos.

Una mejora importante que se consigue con los tubos de vacío es evitar las pérdidas por conducción y convección. Estas pérdidas necesitan de un medio material para que se produzcan, colocando un absorbedor dentro del tubo de vacío conseguimos mitigar esas pérdidas. Sin embargo, en el caso de la radiación no se podrán reducir las pérdidas ya que esta se puede transmitir en el vacío.

Si conseguimos evitar las pérdidas por convección y conducción perderemos menos calor y dispondremos de más calor para calentar nuestro fluido, consiguiendo una mayor eficiencia que conlleva un mejor rendimiento.



Figura 3-3 Colector de tubos de vacío [14]

3.3 Diferencias entre colectores con tubos de vacío y colectores de placa plana

Tubo de vacío	Placa plana
El colector está protegido de la condensación y corrosión por el propio vacío, lo que le hace duradero, fiable y de fácil mantenimiento.	Son propensos a presentar condensación, dando lugar a corrosiones y afectando al rendimiento y longevidad.
Dos tubos concéntricos herméticamente cerrados, con una cámara de vacío entre ellos, fabricados con cristal de boro silicato de alta resistencia. El vacío elimina las pérdidas por conducción y convección, aislándolo del medio ambiente, sin que las inclemencias del tiempo afecten apenas a su rendimiento. Aprovechan la radiación difusa de los días nublados o poco lluvioso. Tienen mejor rendimiento.	Están contruidos dentro de una sólida estructura de metal debidamente aislada y protegida por un cristal. Sin embargo, al contener aire en su interior, presentan pérdidas de calor por convección y conducción, especialmente los días nublados, de lluvia, de frío o viento. Tienen peor rendimiento.
El fluido no circula por el panel, eliminando la corrosión, las incrustaciones de cal, evitando congelaciones y roturas del colector. Apenas presentan inercia, haciendo entrega de calor desde el principio.	El fluido circula por el colector, siendo muy proclive a la corrosión interna e incrustaciones de cal, afectando al rendimiento y durabilidad. El fluido puede llegar a congelarse, deteriorando el colector que deberá ser sustituido. Tienen peor arranque de inercia debido a que tienen que calentar previamente el fluido que contienen.
Peso ligero y estructura modular, lo que hace que sean más fáciles de instalar en cualquier superficie, sobre todo en tejados inclinados. Los tubos de vacío son instalados independientemente de la estructura, pudiendo ser reemplazado un solo tubo en caso de rotura, sin tener que parar la instalación.	Deben ser elevados al tejado e instalados como una sola unidad de gran peso y dimensiones, con los problemas que ello conlleva. En caso de rotura del cristal, el colector entero debe ser reemplazado, teniendo que ser parada la instalación.
Los rayos de sol atrapados eficazmente durante todo el día, debido a la forma circular de los tubos de vacío entregando máxima potencia incluso con ángulos de sol desfavorables.	Entregan su máxima potencia con los rayos del sol perpendiculares al colector, siendo casi nula su eficiencia el resto del día.
El viento circula libremente entre ellos haciéndolos más resistentes a los vendavales, por la separación existente entre tubos de vacío, sin necesidad de anclajes reforzados, particularmente cuando se montan en azoteas planas. Son más limpios ya que acumulan menos polvo y suciedad.	Acumulan polvo y suciedad, afectando su rendimiento y elevando los costes de mantenimiento, debido a su diseño plano. Presentan gran resistencia al viento, debiendo instalar anclajes de seguridad en previsión de vendavales.

Tabla 3-1 Diferencias entre paneles solares de placa plana y paneles solares con tubos de vacío [15]

3.4 Tipo de colectores de tubo de vacío

3.4.1 Flujo directo

El funcionamiento de los tubos que incorporan el flujo directo se basa en que el fluido calor-portante es calentado por el sol a lo largo del recorrido del tubo. Los tubos pueden colocarse de forma paralela al plano horizontal.

Como se puede apreciar en la Figura 3-4, consiste en un tubo de vacío que alberga en su interior una capa absorbente cuya función es transmitir el calor del tubo de vacío a una aleta circular de cobre que está en contacto directo con los dos tubos de cobre (tubo en U) soldados o insertados en ambos lados de la aleta circular. [16]

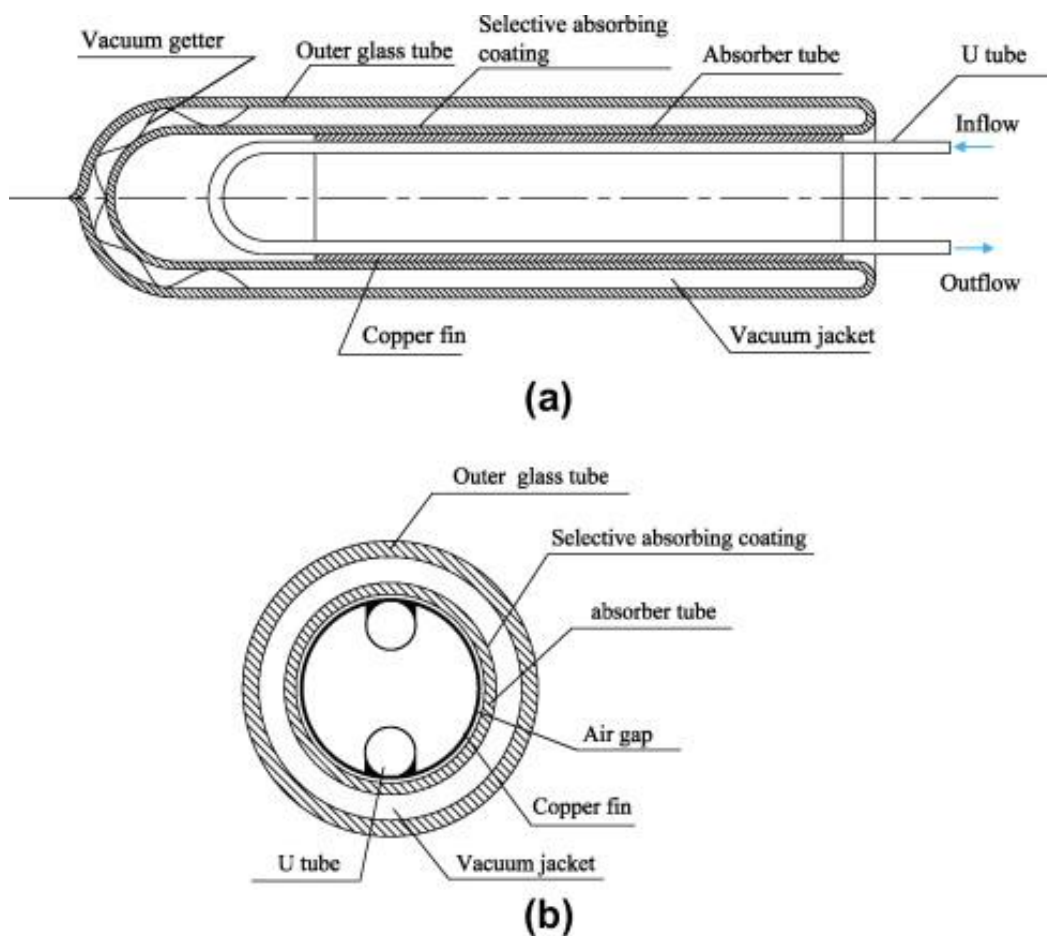


Figura 3-4 Funcionamiento de tubos en U [16]

La radiación solar atraviesa el tubo de vidrio exterior siendo recogida por la capa absorbente, parte de la energía solar absorbida se transfiere al fluido calor-portante. Esta energía que se transfiere genera un gradiente de temperatura en la dirección del flujo. Por el efecto de la radiación incidente en la superficie de la capa absorbente se disipa un poco de energía.

Los tubos de vacío en forma de U y los tubos de vacío heat pipe son los más empleados en los colectores solares térmicos. El tubo en U tiene una estructura simple, es económico y es capaz de soportar grandes presiones.

3.4.2 Flujo indirecto

El mecanismo denominado heat pipe lo incorporan los tubos de vacío con flujo indirecto haciendo que sean una estructura de alta conductividad térmica y escasas pérdidas. Un factor importante a tener en cuenta es que los tubos que incorporan este tipo de flujo deben tener una inclinación mínima de 15° para que haya una circulación del fluido. Su funcionamiento consiste en:

En el interior del tubo de cristal exterior, se encuentra un tubo de cobre sellado que contiene el fluido calor-portante, a su vez, este tubo está adosado a un componente que absorbe la radiación solar. La función que realiza se puede ver en la Figura 3-5: La radiación solar incide sobre el absorbedor (1) que, al estar adosado al tubo de cobre (2) le transmite el calor que recibe haciendo que el fluido contenido en el interior de este tubo se evapore y ascienda (calor latente) (3). El fluido que se ha evaporado, cuando alcanza la parte superior del tubo, cede el calor al fluido más frío que circula por su exterior y al hacer esto se condensa de nuevo (4). Este proceso se repite sucesivamente mientras continúe incidiendo radiación solar en el absorbedor o hasta que el captador llegará a unos valores muy altos (en torno a 130°).

Como se puede apreciar en la Figura 3-6 Esquema de calentamiento del fluido, los captadores que incorporan este mecanismo están compuestos de una batería de tubos de vacío heat pipe que se disponen de forma paralela y están conectados todos ellos a un circuito principal. La energía que se logra en los tubos se transfiere al circuito principal y el fluido contenido en este circuito la recogerá para posteriormente ser almacenado o consumido.

Una gran mejora que incorpora este mecanismo es que en verano, al evaporarse todo el fluido que se encuentra en el interior del tubo, absorbe menos calor y esto ayuda a que los tubos no estallen o no se fisuren.

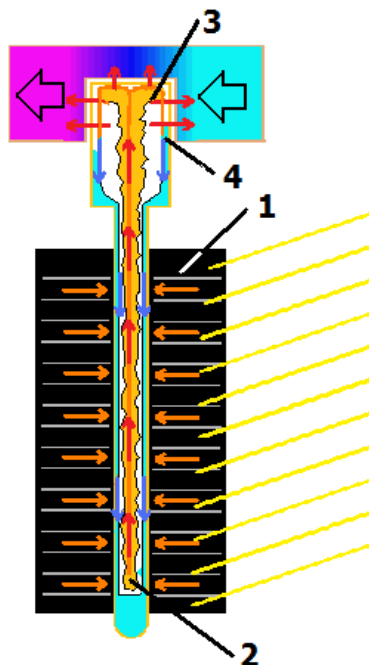


Figura 3-5 Transmisión de calor de tubos de vacío [16]

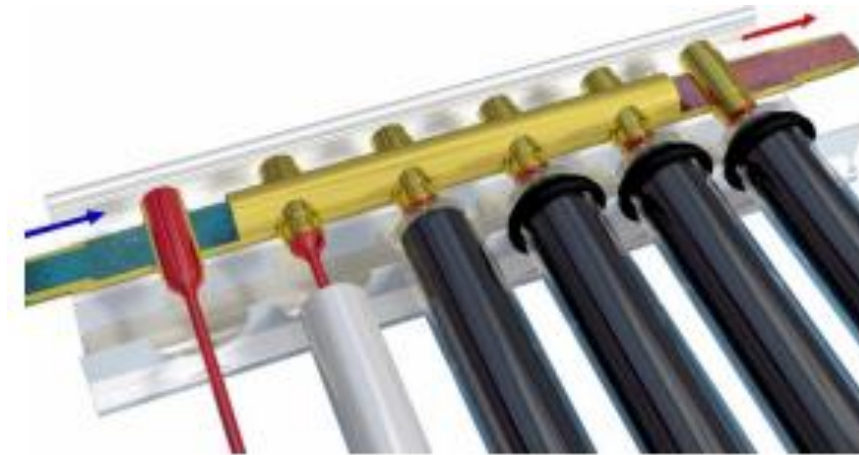


Figura 3-6 Esquema de calentamiento del fluido [16]

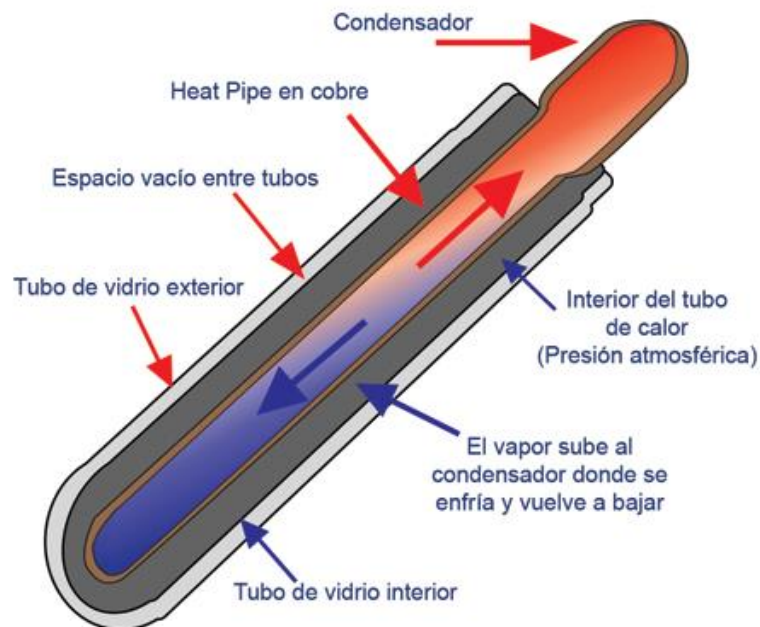


Figura 3-7 Generación de calor en el interior del tubo de vacío heat pipe [17]

3.5 Influencia del ángulo de incidencia

El ángulo con el que el sol incide en el colector solar va cambiando a lo largo del día y también a lo largo del año. Por lo tanto, también irá variando la cantidad de radiación que el absorbedor es capaz de retener. [15]

Debido a la cilindridad de los tubos de vacío, estos son capaces de aprovechar la radiación solar durante más tiempo a lo largo del día ya que incide durante más tiempo de forma perpendicular en los tubos obteniendo un rendimiento superior al 30% con respecto a un colector de placa plana.

El IAM (Incidence Angle Modifier) es el parámetro que se encarga de medir como incide la radiación en función del ángulo en el que se encuentra el sol.

Cuando los rayos de sol inciden de manera perpendicular al colector (mediodía) el parámetro IAM=1 estaría recibiendo la radiación máxima. El IAM será <1 a primera hora de la mañana y a última de la tarde cuando el sol no es perpendicular a la superficie del colector.

Para comprender la mejora de eficiencia entre un colector de tubos de vacío y uno de placa plana se pueden observar estas imágenes que muestran la influencia de los rayos de sol de manera que va avanzando el día.



Figura 3-8 Influencia de radiación solar en tubos de vacío con ángulo de 0° [15]

A las 12:00 pm, los tubos de vacío tienen un ángulo de 0° con respecto al sol y de esta manera la superficie de cada tubo es claramente visible. Están expuestos a la máxima cantidad de luz del sol (IAM=1). En esta situación la eficiencia de los colectores solares de tubos de vacío es máxima.



Figura 3-9 Influencia de radiación solar en tubos de vacío con ángulo de 40° [15]

La mejora de eficiencia se da sobre todo cuando el sol alcanza un ángulo de 40°, los tubos de vacío solares siguen estando completamente visibles sin espacios vacíos entre ellos siendo el IAM >1

3.6 Distribución de colectores solares

La disposición en la que se agrupan los colectores solares es un aspecto a tener en cuenta a la hora de trabajar con este tipo de instalaciones. Normalmente estarán agrupadas por unidades del mismo modelo y de la forma más uniforme posible.

Hay dos opciones o tipologías básicas en las que podemos agrupar los colectores: en serie o en paralelo. También, podemos combinar ambas tipologías dando como resultado a lo que llamaremos distribución mixta. [18]

3.6.1 Distribución en serie

Llamaremos distribución en serie a la conexión de la salida de un colector con la entrada del siguiente colector de forma directa. En esta configuración, la temperatura que entra en los colectores

sucesivos va aumentando y gracias a esto, en la salida del último colector de esta configuración, tendremos una temperatura más elevada que la que obtendríamos si tuviéramos un colector solo.

La distribución en serie tiene la desventaja de que el rendimiento de cada colector va disminuyendo debido al aumento de la temperatura de trabajo. Por lo tanto, su empleo estará limitado a aplicaciones muy particulares. Si nos fijamos en su comportamiento hidráulico, el caudal total a la salida del último colector será equivalente al de un solo colector, mientras que la pérdida de carga que se produce será equivalente a la suma de las pérdidas de cada colector solar.

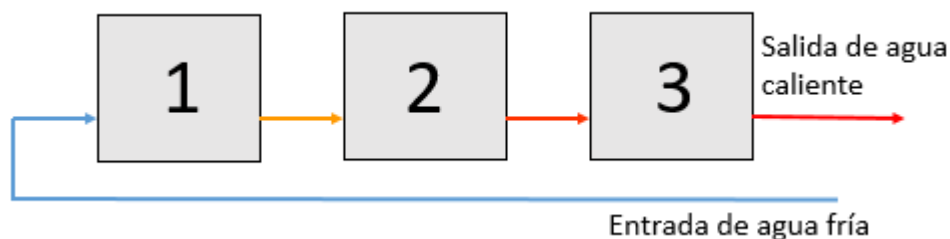


Figura 3-10 Diagrama de placas solares colocadas en serie

3.6.2 Conexión en paralelo

En la distribución en paralelo tanto la entrada como la salida están conectadas a los colectores solares. Con esta configuración lograremos que las temperaturas del fluido en las entradas y en las salidas de los colectores sean las mismas, a la salida del grupo de colectores obtendremos la misma temperatura que la que se obtendría si de un solo colector se tratase.

Este tipo de distribución tiene la ventaja de que todos los colectores trabajan en el mismo punto de la curva de rendimiento. Esta configuración se emplea en instalaciones solares térmicas de baja temperatura. Hidráulicamente nos ofrece un caudal que es la suma del caudal total, es decir, la suma de los caudales parciales de cada colector solar. Por otro lado, la pérdida de carga que se produzca será prácticamente equivalente a la de un solo colector térmico.

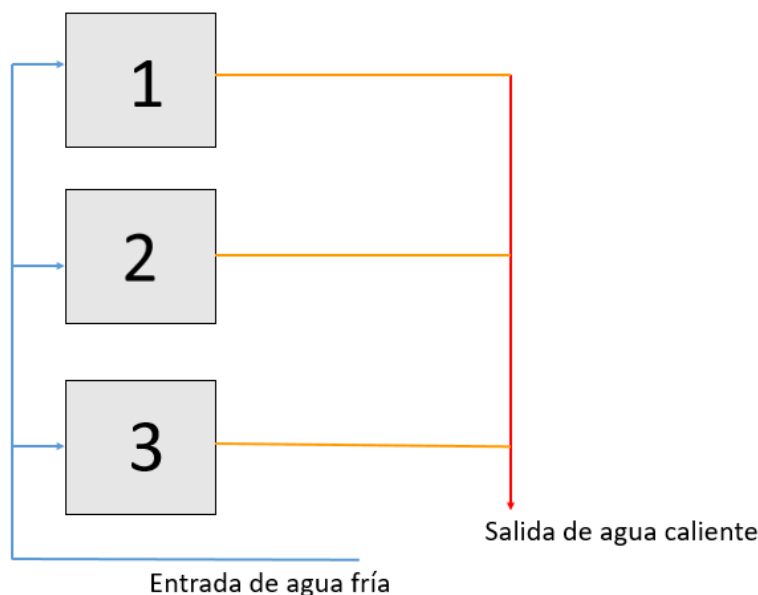


Figura 3-11 Diagrama de placas solares colocadas en paralelo

3.6.3 Distribución mixta

En ocasiones, necesitamos disponer de temperaturas más elevadas por lo que combinando ambas tipologías lograremos alcanzar estas temperaturas. También, podemos combinar ambas tipologías para conseguir un volumen determinado. A la combinación de estas dos configuraciones la llamaremos distribución mixta.

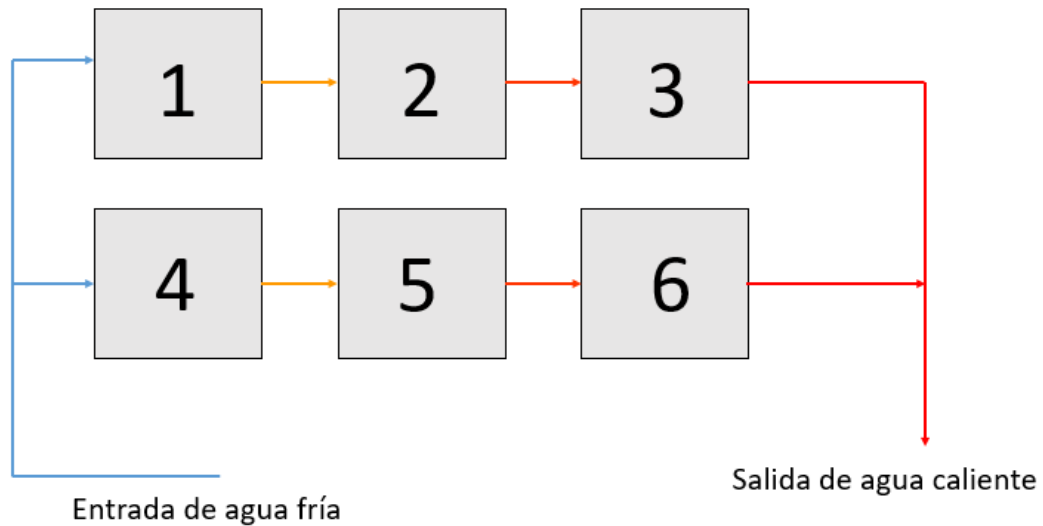


Figura 3-12 Diagrama mixto de placas solares

3.7 Normas UNE y normativa de aplicación

La energía solar térmica se regula por las normas elaboradas por el comité técnico de normalización CTN 94. Este comité impone normas sobre los componentes y materiales que conforman un colector solar, sistemas de calentamiento de agua sanitaria y vocabulario sobre energía solar. [18]

Normas UNE elaboradas por el comité CTN 94:

- UNE-EN ISO 9806:2020. Energía solar. Captadores solares térmicos. Métodos de ensayo.
- UNE-EN ISO 22975-1:2020. Energía solar. Componentes y materiales del captador. Parte 1: Tubos de vacío. Durabilidad y prestaciones.
- UNE-EN ISO 22975-2:2020. Energía solar. Componentes y materiales del captador. Parte 2: Tubo de vacío para aplicaciones de energía solar térmica. Durabilidad y prestaciones.
- UNE-EN 12976-1:2020. Sistemas solares térmicos y sus componentes. Sistemas prefabricados. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE-EN 12976-2:2020. Sistemas solares térmicos y componentes. Sistemas prefabricados. Parte 2: Métodos de ensayo.
- UNE-EN 12977-1:2019. Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 1: Requisitos generales para los calentadores de agua solares y las instalaciones solares combinadas.
- UNE-EN 12977-2:2019. Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 2: Métodos de ensayo para los calentadores de agua solares y las instalaciones solares combinadas.

- UNE-EN 12977-3:2019. Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 3: Métodos de ensayo del rendimiento de los acumuladores de agua de calentamiento solar.
- UNE-EN 12977-4:2019. Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 4: Métodos de ensayo del rendimiento para las instalaciones solares combinadas.
- UNE-EN 12977-5:2019. Sistemas solares térmicos y sus componentes. Instalaciones a medida. Parte 5: Métodos de ensayo del rendimiento para los sistemas de regulación.
- UNE-EN ISO 22975-3:2015. Energía solar. Componentes y materiales del captador. Captadores solares. Parte 3: Durabilidad del absorbente solar.
- UNE-EN 12975-1:2006+A1:2011. Sistemas solares térmicos y componentes. Captadores solares. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE 94041-1:2010. Sistemas domésticos de apoyo de consumo calorífico nominal inferior o igual a 70 kW y volumen de acumulación inferior o igual a 300 l, utilizados en instalaciones solares térmicas. Parte 1: Sistemas de apoyo que utilizan combustibles líquidos y gaseosos.
- UNE-ISO 9459-2:2008. Calentamiento solar. Sistemas de calentamiento de agua sanitaria. Parte 2: Métodos de ensayo exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares.
- UNE 94002:2005. Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria. Cálculo de la demanda de energía térmica.
- UNE-EN ISO 9488:2001. Energía solar. Vocabulario.

3.8 Programas de simulación de sistemas solares

En este apartado se expondrán una serie de programas válidos para hacer simulaciones sobre colectores solares, estos programas son los siguientes: T*SOL, Greenius, Polysun, INSEL, COLSim. y TRNSYS. Se hablará sobre sus características, utilidad y modo de uso. Dentro de este trabajo se desarrolla más el programa TRNSYS ya que ha sido el elegido para llevar a cabo la simulación de nuestro colector solar. [20]

3.8.1 T*SOL



Figura 3-13 Logotipo programa T*SOL

Este programa nos permite optimizar el diseño de los sistemas solares y la forma de colocar los colectores, también es capaz de proporcionar el rendimiento de la instalación solar en un año. Es capaz de proporcionar el rendimiento económico de la instalación según los datos técnicos que le agreguemos.

El programa tiene cargados una serie de diseños predefinidos pero también se pueden agregar componentes individuales a través de las librerías en las que encontraremos más de 2500 colectores de placa plana y tubos de vacío, 700 tanques de almacenamiento y 1100 unidades entre calderas y elementos auxiliares.

Los componentes elegidos pueden ser modificados, en el caso de los colectores solares se puede elegir el fabricante y también el ancho, la longitud, la altura y sus pérdidas. También se podrá introducir la orientación de los colectores junto con su inclinación.

En lo referido a la simulación, se puede hacer de forma anual, mensual o incluso en un intervalo de cinco minutos. Una vez realizada la simulación, te permite realizar un análisis de los resultados para ver características como:

- Potencia y superficie de los colectores, irradiación que incide sobre los colectores, energía suministrada por los circuitos del colector, etc.
- Especificaciones de los componentes elegidos y valores climáticos para la ubicación seleccionada.
- Una gráfica sobre el balance energético así como el porcentaje de energía solar en el consumo energético y las temperaturas máximas que recibe el colector cada día.

En conclusión, T*SOL es un programa de fácil manejo que tiene una gran base de datos y es capaz de generar cálculos rápidos sobre el rendimiento técnico y económico. La gran facilidad que tiene para adaptar los sistemas solares a los procesos industriales hace que sea un programa muy recomendable en este ámbito.

3.8.2 Greenius



Figura 3-14 Logotipo programa Greenius

Es una herramienta que permite la simulación de proyectos de energías renovables para prever el rendimiento de estos. Una ventaja que tiene este programa es la posibilidad de combinar cálculos técnicos y económicos. El mecanismo que emplea para ejecutar la simulación es simple y fácil de comprender, se caracteriza también por su velocidad de cálculo ya que es capaz de realizar simulaciones anuales y dar las resoluciones de estas de forma horaria en cuestión de segundos.

Otro aspecto a destacar es la compatibilidad que tienen las tablas y gráficas que genera ya que se pueden copiar a otras aplicaciones de Windows, también cabe destacar que los componentes son individuales pudiendo usarse de forma independiente en varios proyectos. Su aplicación se basa en dar una idea de cómo actuará el sistema pero no aporta cálculos de ingeniería de forma detallada.

Greenius nos permite incorporar la climatología de la zona que queremos estudiar y la tecnología que queremos emplear para el estudio. Algunas de las tecnologías disponibles son: Canales parabólicos para procesos de calor, parques eólicos, sistemas de concentración fotovoltaicos, etc.

Las simulaciones tendrán lugar después de meter todos los datos y estas se realizan en dos etapas:

La primera etapa será la de simulación técnica, donde se simula el sistema para un año. Debe tener valores para 8760 horas logrando una resolución de 60,30,20,15 y 10 minutos en función de los datos meteorológicos introducidos.

La segunda etapa hace referencia a la evaluación económica teniendo en cuenta que la simulación esté basada en datos meteorológicos típicos y no los que se pueden dar un año cualquiera.

En definitiva, Greenius es una buena herramienta para proyectos en los que intervengan energías renovables. Su uso es útil en los estudios previos pero no es recomendable en las partes más técnicas como las de cálculos exactos.

3.8.3 Polysun



Figura 3-15 Logotipo programa polysun

Este programa permite realizar el diseño, la optimización y el dimensionado de instalaciones solares térmicas, fotovoltaicas, bombas de calor y la combinación de instalaciones. Está disponible tanto en Mac como en Windows, realiza informes técnicos, evaluación del rendimiento y económica. También, dispone de datos meteorológicos de muchas partes del mundo.

Polysun utiliza el lenguaje de programación Java empleando una serie de algoritmos para calcular las energías térmicas y eléctricas anuales. En función de los valores de las entradas que metamos en el sistema, un algoritmo realiza una resolución de forma temporal para resolver balances tanto de masa como de energía, siendo un segundo la resolución mínima que es capaz de realizar.

Un problema que podemos encontrar en este programa es que la temperatura máxima que puede incorporarse en los procesos industriales procedente de sistemas solares es de 250°C. Polysun funciona de manera similar a T*SOL en lo referido a la meteorología ya que se puede elegir de manera exacta la zona para realizar la simulación.

Aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar la simulación son: efectos de sombras, posibles árboles que haya, montañas o simplemente construcciones cercanas. Polysun permite importar una línea de horizonte para solventar estos problemas. También tiene una gran librería con sistemas preconfigurados que se puede usar o incorporar a estos otros elementos que también se pueden encontrar en las librerías como: colectores, tuberías y depósitos de almacenamiento.

Las bases de datos de Polysun se actualiza de manera constante y disponen de unos 4400 colectores, 2000 tanques, 566 bombas de calor, 60 generadores, 40000 módulos fotovoltaicos y otros componentes. Se pueden modificar los parámetros de los componentes de forma parcial o total.

A la hora de empezar con las configuraciones, el usuario debe dimensionar y definir el sistema que va a emplear, también deberá indicar la norma utilizada. En el caso de un sistema con colectores solares, se tendrá que indicar la orientación de estos, el tipo y número que van a formar parte de la simulación. Las pérdidas se obtendrán tomando como referencia las pérdidas de colectores que se encuentran en el mercado.

Una ventaja que presenta Polysun es la posibilidad de emplear distintos fluidos térmicos como aceites, mezclas de agua y glicol o agua presurizada. El usuario será capaz de seleccionar parámetros específicos que necesite para su fluido como: densidad, capacidad calorífica, conductividad térmica, etc.

En la presentación de los resultados Polysun ofrece la posibilidad de: obtener el porcentaje de energía solar que le entra al sistema, el consumo total que se hace de energía incluso de forma mensual, diagramas de flujos de energía y el análisis económico en el que se incluyen precios de la energía, costes de instalación, costes de mantenimiento y otros costes.

A modo resumen, Polysun permite comparar y optimizar instalaciones de forma sencilla, tiene una gran base de datos que se mantiene actualizada y es capaz de proporcionar un análisis bastante completo del sistema a simular.

3.8.4 COLsim

Collector Simulation Environment (COLsim) es un programa informático con el que se pueden hacer simulaciones hidráulicas e incorporar métodos de control y solo está disponible en Linux. Inicialmente se creó para hacer simulaciones en los controladores de colectores solares y sistemas dinámicos de forma anual o en intervalos cortos de tiempo.

Es una herramienta que ha sido programada en lengua ANSI C y es flexible ya que permite incorporar distintos tipos de colectores solares o modificar los modelos predefinidos gracias a la disponibilidad del código fuente. Cuenta con diferentes comandos que facilitan la utilización del programa. Algunos de estos comandos son:

- Fig2dek, convierte los elementos gráficos a un documento con la misma información, de esta manera, el programa podrá leer la información de los distintos módulos que contiene el sistema y cuando finalice puede comenzar la simulación.
- Sim, es el comando encargado de realizar la simulación. En primer lugar, presenta información sobre las unidades y el orden en el que se ejecutarán. Al finalizar la simulación se crea un archivo en el que están recogidos los resultados numéricos que se generan y se llama sim_out0.
- Los comandos sleep y wake up son los encargados de finalizar la simulación al final del día y de retomarla al día siguiente.
- Con xfig se puede diseñar la instalación que posteriormente simularemos. El empleo de xfig incluye los types que se usarán en el sistema, el lugar que ocupan y los parámetros que se le introducirán. Hay diferentes Types que se relacionan con: tuberías, válvulas, colectores solares, intercambiadores de calor, unidades de control, etc.

En definitiva, COLsim es un programa complejo que no es útil cuando se realizan estudios con bajo nivel de detalle. Sin embargo, es práctico para optimizar los parámetros de operación de una planta que ya exista y mediante algoritmos depurados es capaz de minimizar los cálculos que se realizan para simulaciones anuales.

3.8.5 TRNSYS



Figura 3-16 Logotipo programa TRNSYS

Inicialmente este programa estaba destinado a realizar simulaciones sobre el comportamiento dinámico del agua en un sistema solar a lo largo de un año. Sin embargo, aunque se sigue utilizando para evaluar tanto el rendimiento térmico como eléctrico de los sistemas, se puede utilizar para realizar simulaciones de otros sistemas como pueden ser:

- Sistemas solares térmicos de alta y baja temperatura.
- Sistemas solares fotovoltaicos.
- Sistemas de ventilación, refrigeración y calefacción, también conocidos como HVAC.

- Sistemas de potencia de biomasa.
- Energía eólica.

TRNSYS se desarrolló en la universidad de Wisconsin, cada año en el mes de septiembre se actualiza y en él podemos encontrar más de cuarenta ejemplos y también permite la simulación de edificios con diferentes zonas térmicas.

Este programa está dividido en dos partes: La primera se llama kernel, es la encargada de leer y procesar los archivos de entrada así como de resolver los sistemas de forma iterativa. Además posee otras herramientas con las que se pueden determinar propiedades termofísicas, realizar la inversión de matrices, generar regresiones líneas y unir archivos que pertenezcan a datos externos.

La segunda está compuesta por una amplia biblioteca que alberga una gran cantidad de componentes, cada uno de estos tienen una función específica dentro del sistema. La biblioteca, además de tener los componentes, incorpora 150 modelos que están relacionados con: edificios multizona, turbinas eólicas, equipos de climatización, procesador de datos meteorológicos, etc.

Los usuarios pueden elegir los componentes que consideren necesarios para su instalación, el programa permite generar una instalación desde cero o también ofrece la posibilidad de incorporar componentes a los modelos que ya están incorporados. Es un programa flexible ya que se pueden incorporar modelos matemáticos que no pertenecen a la librería de éste.

TRNSYS está formado a su vez por varios subprogramas entre los que podemos destacar: TRNSYS Simulation Studio, el Simulation Engine, su ejecutable (TRNExe.exe) y la interfaz de datos de entrada TRNBuild (TRNBuild.exe).

La interfaz que usaremos más adelante para la simulación será TRNSYS Simulation Studio. En ésta se puede crear la configuración que se necesite arrastrando los componentes a la hoja de trabajo y una vez incorporados se pueden realizar interconexiones entre ellos. Una vez hecha la configuración se realiza la simulación de ésta obteniendo las gráficas relacionadas y también un archivo de texto que recoge esta información.

Se le llaman types a los distintos componentes del programa teniendo cada componente un número asociado. Se distinguen unos types de otros ya que a cada uno le sigue una secuencia de números distinta. El funcionamiento de estos componentes está basado en ecuaciones algebraicas y diferenciales que se encuentran compiladas mediante el lenguaje de programación Fortran, los diferentes types pueden configurarse introduciendo los parámetros que se necesiten junto con las entradas y salidas que se hacen hacia o desde el type.

El funcionamiento general de este programa se puede diferenciar en 4 fases:

Primera fase: El usuario selecciona los types que necesite para su simulación a través de la ventana de trabajo y posteriormente procede a la configuración de estos. Una vez configurados, también habrá que establecer la climatología que va a afectar a la simulación.

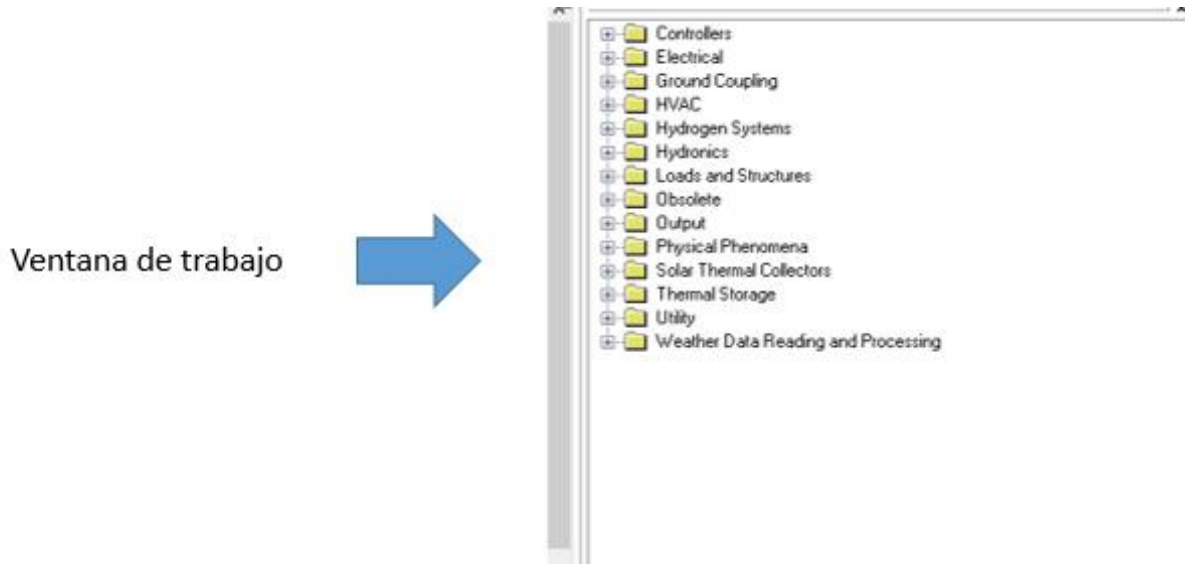


Figura 3-17 Librerías de TRNSYS

Segunda fase: Una vez hayan sido colocados y configurados todos los types, el usuario debe enlazar unos types con otros. Para realizar estos enlaces, el programa muestra una serie de variables a enlazar y el usuario escogerá aquellas que le resulten útiles para su simulación. Con el fin de que no haya confusión, a la hora de realizar los enlaces, las variables se unirán mediante flechas e inicialmente estarán de color azul, una vez hayan sido enlazadas pasarán a ser de color negro y de esta forma el usuario puede saber que se está haciendo uso de ellas.

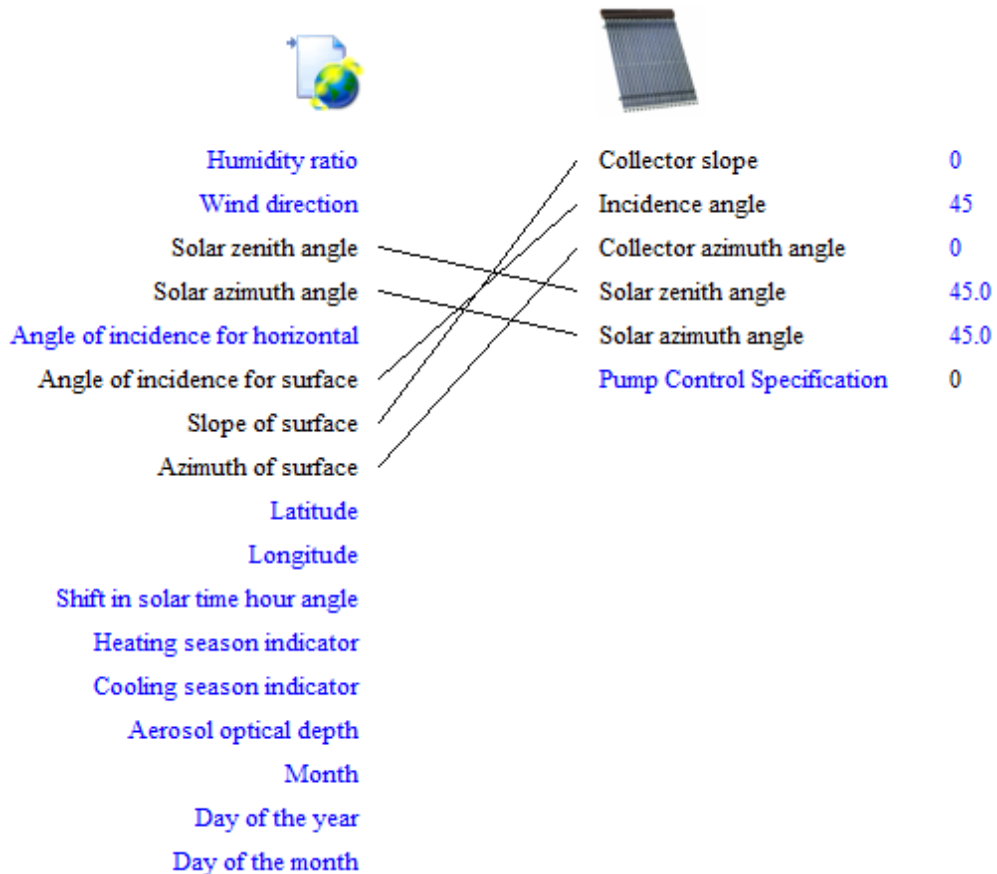


Figura 3-18 Conexión de dos componentes en TRNSYS

Tercera fase: Una vez establecidos los enlaces y configurados los componentes, ya se puede realizar la simulación. Esta se puede hacer presionando F8 o pulsando el icono de Run, una vez realizada, TRNSYS comprueba que no hay errores en la simulación que el usuario propone y, en caso de haberlos, permite al usuario encontrarlos para su posterior corrección en Listing File.



Figura 3-19 Icono para realizar simulación en TRNSYS

Cuarta fase: Cuando termina la simulación, el usuario puede interpretar los resultados que se obtienen y crear las gráficas que correspondan. También está la opción de añadir el type 65d (Online Plotter) que realiza una gráfica de forma automática en la que el usuario podrá ver los resultados mientras se está ejecutando la simulación y cuando esta finaliza. A modo de ejemplo como se observa en la Figura 3-20 Gráfica resultado de simulación con TRNSYS el type 65d muestra los datos de las temperaturas de entrada y de salida de un colector en un día.

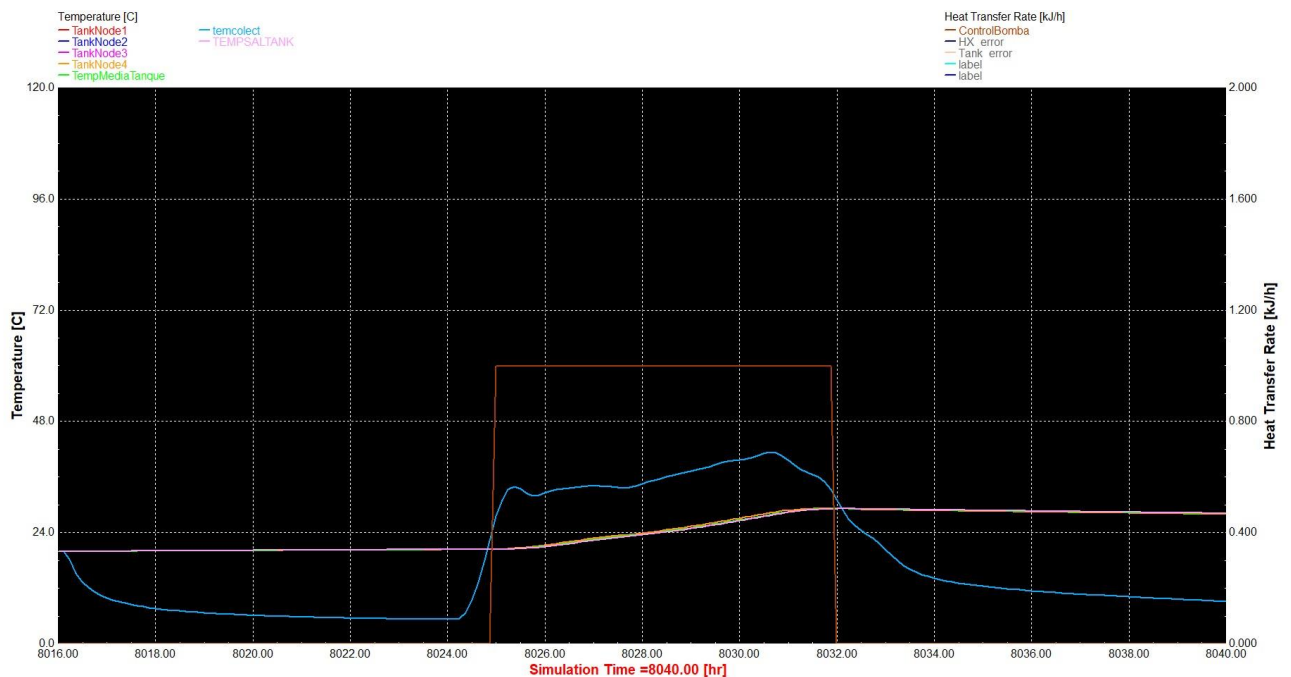


Figura 3-20 Gráfica resultado de simulación con TRNSYS

En esta gráfica el usuario puede hacer zoom sobre ella pulsando SHIFT y un aspecto a tener en cuenta es que el programa simula obteniendo valores de forma puntual de tal forma que interpola el resto de valores entre dos momentos puntuales concretos. Si el usuario quiere ver los valores puntuales sin las interpolaciones, podrá hacerlo pulsando las teclas CTRL+SHIFT.

En definitiva, TRNSYS es un programa fácil de usar que se emplea para diseñar y optimizar sistemas que se podrán simular para un tiempo determinado. Este programa no incorpora la posibilidad de realizar cálculos económicos, no obstante, es bastante completo ya que se pueden realizar muchas configuraciones.

Dispone de amplias librerías donde el usuario podrá encontrar: colectores, tanques de almacenamiento, datos meteorológicos de distintas zonas, etc. La dificultad de este programa puede residir en la búsqueda e identificación que debe realizar el usuario para encontrar los types (componentes) que necesite para llevar a cabo su simulación.

Tanto su flexibilidad como la forma en la que está estructurado hace que sea un programa atractivo que es utilizado por muchos ingenieros de distintas partes del mundo.

4 DESARROLLO DEL TFG

4.1 Ubicación actual

El edificio donde se encuentra la instalación está situado en la cara norte de la Escuela Naval Militar y pertenece al Centro Universitario de la Defensa, la instalación sobre la que vamos a realizar la simulación se encuentra en la parte oeste del edificio como se puede observar en la Figura 4-1 Ubicación centro de investigación.

El edificio de investigación es un establecimiento destinado a realizar proyectos de fin de carrera. Con esta finalidad, cuenta con laboratorios de radar, mecánica de fluidos, química y de simulación. Todos estos laboratorios serán utilizados por los responsables de los distintos departamentos mencionados, además, tiene dos salas de reuniones.



Figura 4-1 Ubicación centro de investigación. [20]



Figura 4-2 Cubierta superior del edificio donde se encuentra el captador solar. [20]

4.2 Descripción de la instalación

La instalación que está conectada al captador solar se encuentra en el laboratorio de mecánica situado dentro del edificio de investigación. El conjunto de elementos que la componen permiten obtener agua caliente que puede ser utilizada directamente a través de un grifo o también puede ser acumulada para ser utilizada posteriormente.



Figura 4-3 Captador solar con tubos de vacío



Figura 4-4 Conjunto de componentes que conforman la instalación solar

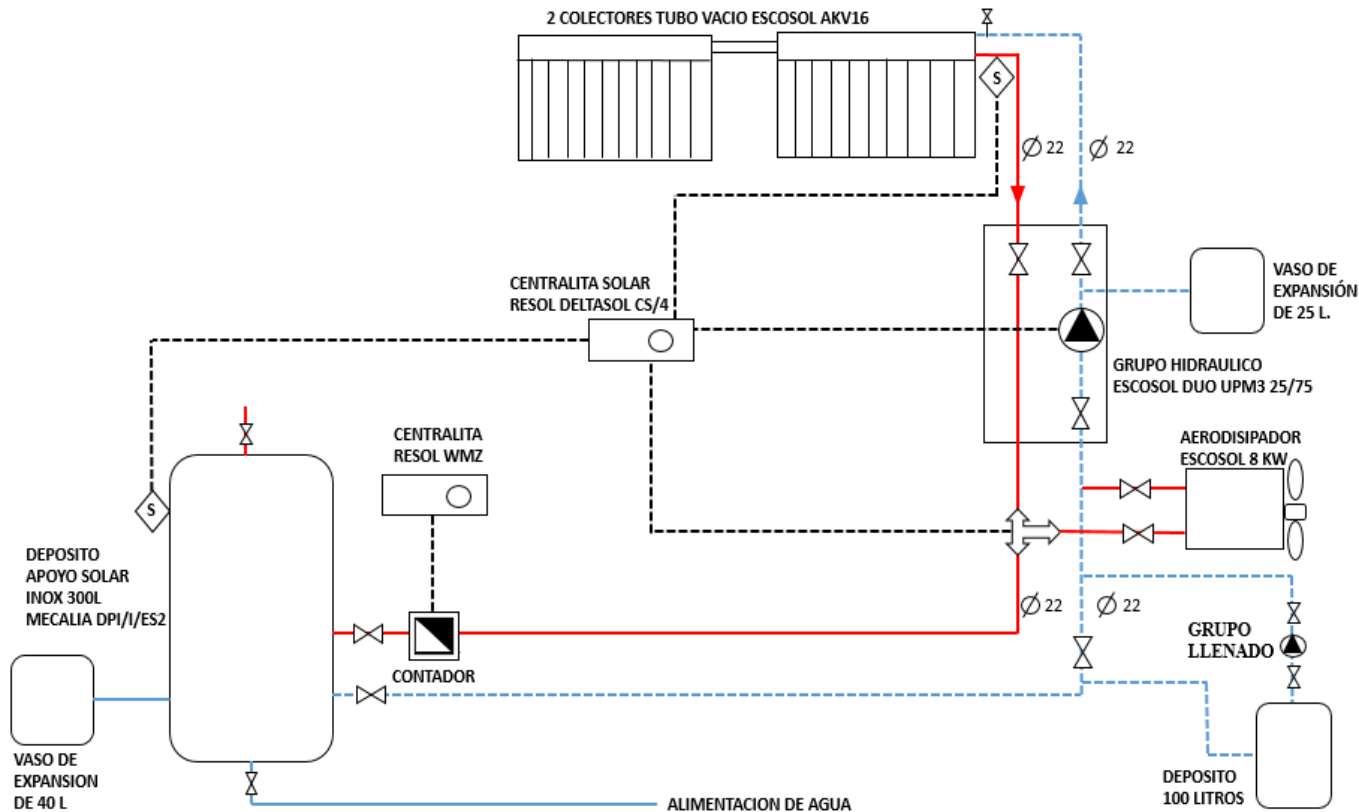


Figura 4-5 Esquema de conexión de la instalación

La instalación está compuesta por dos colectores de tubos de vacío Escosol que son los encargados de recoger la radiación procedente del sol, un grupo hidráulico en el que se encuentra la bomba que hace circular el fluido calor-transporte, un aerodisipador que se encarga de disipar el calor de la instalación, un depósito en el que se encuentra el fluido que se quiere calentar por medio de los intercambiadores de calor inmersos en el depósito, vasos de expansión para liberar la presión que se produce al calentarse el fluido colocados en distintas partes del circuito y dos centralitas que regulan el buen funcionamiento de la instalación.

4.2.1 Funcionamiento de la instalación

La siguiente Figura 4-6 hace referencia al funcionamiento genérico de la instalación. La centralita solar es la encargada de regular este funcionamiento.

Por un lado, compara la temperatura de la sonda S1 (sonda colocada a la salida del colector solar) con la temperatura de la sonda S2 (sonda situada en el interior del depósito interacumulador). Si esta diferencia de temperaturas coincide con la establecida, le manda la orden a la bomba de activarse mediante el relé 1 (R1).

Por otro lado, si la temperatura que recibe de la sonda del depósito (S2) es superior a la establecida, activará mediante el relé 2 (R2) el aerodisipador con el fin de que éste disipe el calor que se ha generado en el ambiente para evitar que este calor llegue al depósito.

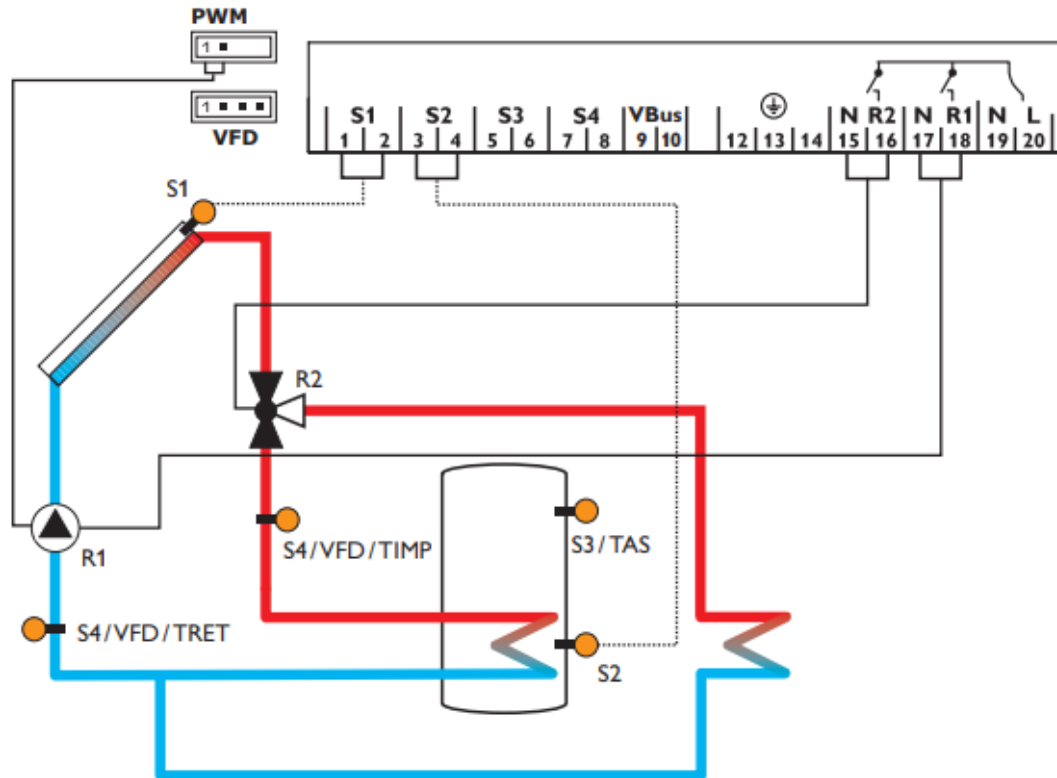


Figura 4-6 Esquema de funcionamiento de la instalación [21]

4.2.2 Captador solar Escosol

Es un colector solar que utiliza la tecnología de tubos de vacío con sistema “U” explicado en 3.4.1. Gracias a este sistema pueden funcionar incluso en una posición horizontal.

Este colector es el modelo AKU 16 de la marca Escosol y presenta las siguientes características:

Colector solar Escosol

Material del marco	Aluminio anodizado
Material de los tubos	.Cobre
Diámetro de los tubos en U	8 mm
Número de tubos	16
Diámetro/longitud del vacío	58mm/1800mm
Área de apertura	1,6 m ²
Área total	2,61 m ²
Ensayo de presión/Máximo funcionamiento	9 bar/6 bar
Ángulo de montaje	0-90°
Peso	45 Kg

Tabla 4-1 Especificaciones técnicas colector solar Escosol

El área de apertura es la superficie visible del captador para la radiación solar mientras que el área total se calcula teniendo en cuenta los límites exteriores del captador.



Figura 4-7 Colector solar de tubos de vacío [21]

4.2.3 Depósito interacumulador

El depósito de la instalación se trata de un interacumulador de la marca Mecalia que cuenta con dos intercambiadores de calor serpentín espiral, se emplea para calentar agua sanitaria, está destinado a instalaciones solares térmicas. Está fabricado de acero inoxidable y se coloca de manera vertical en el suelo. [23]

El calentamiento del ACS (Agua caliente sanitaria) se realiza con energía solar en el serpentín inferior y con una caldera convencional a través del serpentín superior aunque el depósito de la instalación no está conectado a ninguna caldera. La presión de trabajo del ACS es: 6,8 o 10 bares; las presiones de trabajo de los serpentines son 6 bares.

La temperatura de trabajo del interacumulador son 90°C y tiene una capacidad de 300 litros, algunos lugares donde se usa son: hoteles, gimnasios, edificios de viviendas con agua caliente centralizada.

Serpentín inferior

Potencia	15,20 kW
Volumen de serpentín	5 L
Pérdida de carga serpentín	0,83 m c a
Caudal circulante primario	1315 L/h
Producción continua	375 L/h

Tabla 4-2 Especificaciones técnicas serpentín inferior interacumulador

Serpentín superior

Potencia	37 kW
Volumen de serpentín	2,17 L
Pérdida de carga serpentín	0,76 m c a
Caudal circulante primario	1600 L/h
Producción continua	914 L/h

Tabla 4-3 Especificaciones técnicas serpentín superior interacumulador



Figura 4-8 Interacumulador de la instalación

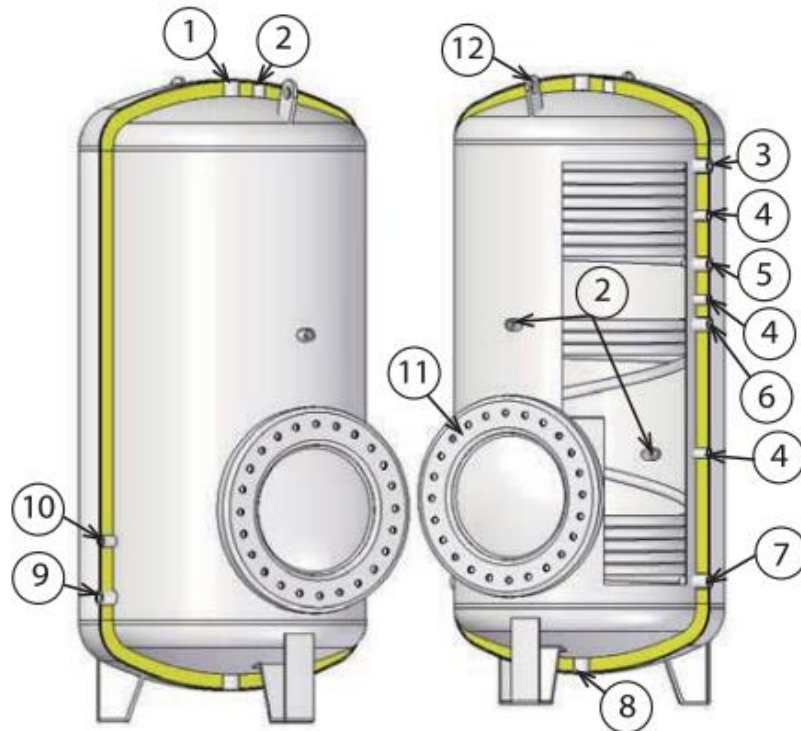


Figura 4-9 Esquema explicativo de funcionamiento del interacumulador [23]

1. Salida ACS
2. Tomas para protección catódica
3. Ida serpentín superior
4. Toma para sonda
5. Retorno serpentín superior
6. Ida serpentín inferior
7. Retorno serpentín inferior
8. Vaciado
9. Entrada agua fría
10. Recirculación
11. Boca de registro opcional
12. Los depósitos se suministran con o sin orejas en función de la capacidad

4.2.4 Vaso de expansión

El vaso de expansión es un elemento de seguridad indispensable en cualquier instalación de energía solar térmica. Se trata de un recipiente hermético que está dividido en su interior en dos cámaras, estas cámaras están separadas por una membrana que permite una variación del volumen entre las dos cámaras en función de lo que se necesite en cada momento. Una cámara es de gas y la otra de fluido. [24]

La función que desempeña el vaso de expansión es la de liberar presión en el circuito cuando el fluido calor-portante se expande a medida que se va calentando. En la instalación se pueden encontrar dos vasos de expansión, uno conectado al depósito interacumulador y otro al circuito hidráulico.

Los vasos de expansión pueden ubicarse tanto en la ida como en el retorno ya que es un circuito cerrado y la expansión de fluido será la misma a un lado u otro, no obstante, se colocan en la parte fría de la instalación para una mayor durabilidad.



Figura 4-10 Vaso de expansión conectado al grupo hidráulico

Vaso de expansión grupo hidráulico

Volumen	25 L
Temperatura	-10°C-130°C
Presión máxima	8 bar

Tabla 4-4 Especificaciones técnicas vaso de expansión grupo hidráulico



Figura 4-11 Vaso de expansión conectado al interacumulador

Vaso de expansión depósito fluido calor-portante

Volumen	24 L
Temperatura	94°C
Presión máxima	10 bar

Tabla 4-5 Especificaciones técnicas vaso de expansión depósito fluido calor-portante

4.2.5 Aerodisipador

Uno de los problemas que suelen existir en las instalaciones solares térmicas es la excesiva temperatura que se alcanza en la instalación en los momentos de mucha insolación y poca demanda energética. Los aerodisipadores son los encargados de reducir esta temperatura transfiriéndola a otro medio, generalmente al aire.



Figura 4-12 Aerodisipador de la instalación

4.2.6 Sistema hidráulico

El sistema hidráulico está formado por un conjunto de elementos que se encargan de hacer circular el fluido calor-portante para transferir el calor que se genera en los captadores solares al depósito acumulador. Entre los distintos elementos que forman este sistema se encuentran: Grupo hidráulico Escosol, tuberías, bomba, etc. [25]

4.2.6.1 Grupo hidráulico Escosol

Grupo hidráulico de alta eficiencia que pertenece a la marca ESCOSOL y es el modelo DUO UPM 25/75. Presenta las siguientes características:

Grupo hidráulico Escosol

Fluido	Agua con solución de glicol
Temperatura de trabajo	130°-150°C
Grupo de seguridad	6 bar
Escala de manómetro	0-10 bar
Escala de termómetro	0-160°C
Caudalímetro	8-38 L/min
Alimentación eléctrica	230V- 50 Hz

Tabla 4-6 Especificaciones técnicas grupo hidráulico Escosol



Figura 4-13 Grupo hidráulico de la instalación

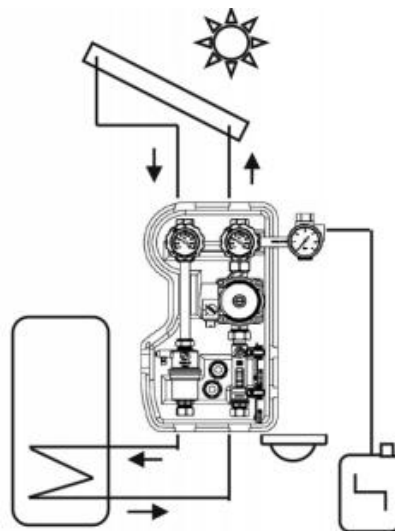


Figura 4-14 Diagrama explicativo de funcionamiento grupo hidráulico [25]

4.2.6.2 Depósito fluido calor-portante

Este depósito almacena el fluido calor-portante, está conectado a una bomba que es la encargada de suministrar este fluido a la instalación cuando sea necesario. Por otro lado, tiene unidas dos válvulas de retorno cuya función es vaciar el fluido calor-portante cuando se quiera retirar de la instalación.



Figura 4-15 Depósito fluido calor-portante

4.2.6.3 Tuberías

Las tuberías que forman parte de este sistema son de cobre de tal forma que no perjudican el agua caliente que transportan.

Es importante garantizar que no se produzcan pérdidas térmicas o que se reduzcan al máximo posible, para ello, las tuberías llevan un aislante con baja conductividad térmica. Los aislantes que más se utilizan son las espumas elastómeras.

4.2.6.4 Bomba

Este componente se encarga de hacer circular el fluido calor-portante generando el caudal necesario para un buen funcionamiento de la instalación. En el grupo hidráulico se encuentra la bomba UPM3 de la marca Grundfos y modelo 25-75. Este modelo tiene una potencia de 60 W y un caudal máximo de 3,8 m³/hr.



Figura 4-16 Bomba grupo hidráulico

4.2.7 Centralita solar resol del tasol CS/4

La función que realiza esta centralita es la de manejar y controlar la velocidad de la bomba de la instalación. Esto lo hace a través de sensores que proporciona balances térmicos precisos.

Algunos de los parámetros que muestra son: Indicación de la temperatura del captador, indicación de las temperaturas del acumulador, indicación de las sondas del circuito, indicación del caudal, indicación de la velocidad de la bomba y un contador de horas de funcionamiento. [26]



Figura 4-17 Centralita solar resol del tasol CS/4 [26]

4.2.8 Centralita resol WMZ

El calorímetro resol WMZ calcula la cantidad de calor transmitido de los colectores al acumulador. Para ello tiene en cuenta las temperaturas de impulsión y retorno, el flujo másico y el porcentaje de la mezcla de agua y glicol que circula por el captador solar. Guarda un registro de las cantidades de calor y parámetros del sistema en caso de que se produzca algún fallo en la corriente. [21]

Esta centralita nos da indicaciones sobre: Temperatura en los puntos donde están configuradas las sondas, la cantidad de calor que el acumulador puede absorber, el rendimiento que la instalación está teniendo y el caudal de agua.



Figura 4-18 Centralita Resol WMZ [21]

4.3 Análisis y simulación de la instalación con TRNSYS

La Figura 4-19 Instalación de tubos de vacío en TRNSYS hace referencia a la instalación de tubos de vacío que se encuentra en el edificio de investigación del CUD en formato TRNSYS. En primer lugar, se explica el funcionamiento general del comportamiento de los componentes en la instalación y posteriormente se hace un análisis de cada componente con los parámetros que han sido modificados, analizando también sus entradas y salidas.

Para realizar la simulación es necesario aportarle un type que contenga datos meteorológicos típicos de una zona característica, estos datos estarán enlazados con los type de los colectores solares que hará que se caliente el fluido calor-transporte que circula por el interior de los colectores. La instalación está diseñada de tal forma que se puedan elegir si se quieren tener los colectores en serie o en paralelo. Esta elección se ejecuta en la calculadora “Control_SerieParalelo” cuyo funcionamiento es explicado más adelante.

El fluido calor-transporte mencionado anteriormente llega a una válvula de tres vías que mandará el fluido hacia el intercambiador (que está compuesto por un intercambiador de calor inmerso en un depósito acumulador de agua) o, si la temperatura media del tanque es superior a un valor que se puede fijar de manera previa, esta válvula desvía el flujo hacia un aerodisipador que consigue que la temperatura media del tanque no alcance temperaturas muy elevadas. Otra función que puede tener el aerodisipador es la de descender la temperatura que se alcanza en los colectores.

El aerodisipador recibe el fluido calor-transporte a una temperatura razonablemente alta y cuando el fluido circula por su interior la temperatura se reduce expulsando el calor hacia el ambiente, en esta instalación a la Figura 4-33 seleccionada para que haga la función del laboratorio. El aerodisipador también cuenta con un ventilador que se activa cuando detecta temperaturas muy elevadas en su interior, este control de la temperatura se consigue con un termostato.

Una vez explicado el caso en el que el fluido calor-transporte es desviado hacia el aerodisipador, ahora se va a explicar la situación de que el fluido hubiera sido desviado al intercambiador de calor.

Cuando el fluido sale de los colectores y llega a la válvula de tres vías se dirige a la entrada del intercambiador de calor que se encuentra dentro del depósito, la misión del intercambiador de calor es calentar el fluido que se encuentra en el interior del depósito, hay que destacar que en ningún momento se mezcla el fluido calor-transporte con el fluido del depósito. La transferencia de calor se hace por convección y conducción.

Tanto desde la salida del intercambiador de calor como del aerodisipador (en función de la ruta que haya seguido el fluido calor-transporte), el fluido se dirige a una válvula de tres vías que comunica con la bomba.

La bomba es la encargada de hacer circular el fluido en la instalación cuando se lo ordene la centralita solar. De este modo comenzaría de nuevo el ciclo.

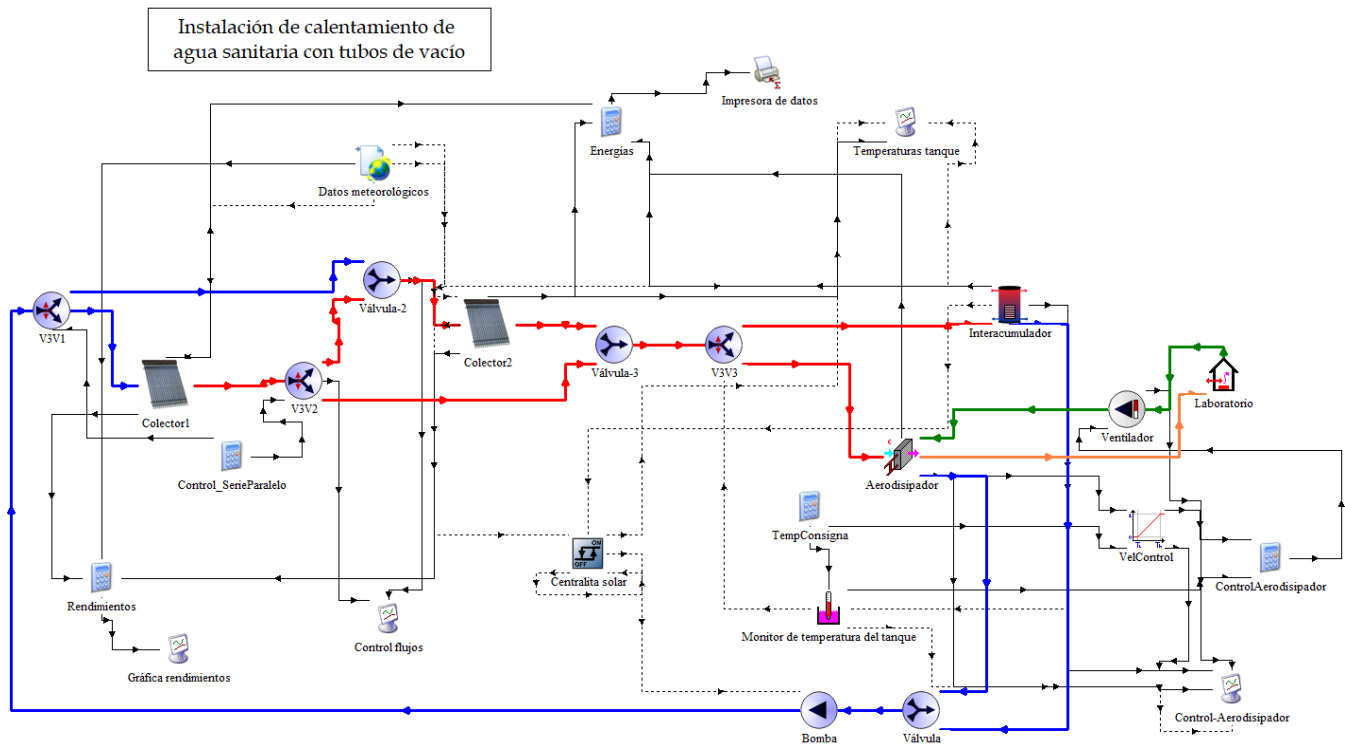


Figura 4-19 Instalación de tubos de vacío en TRNSYS

4.3.1 Explicación de los elementos que intervienen en la simulación



Figura 4-20 Icono datos meteorológicos

El type 15 (Datos meteorológicos): En este type se carga el archivo meteorológico correspondiente a la zona en la que se vaya a hacer la simulación.

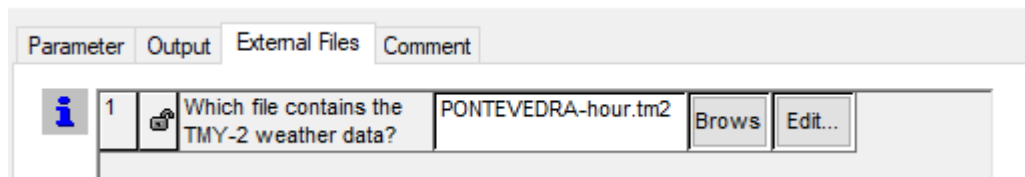


Figura 4-21 Archivo meteorológico de Pontevedra

Los datos que se utilizan para esta simulación han sido creados a partir de un estudio de las condiciones climatológicas en Pontevedra durante 10 años. Este type se conecta al colector solar proporcionándole los siguientes parámetros.



Figura 4-22 Parámetros enlazados entre el archivo meteorológico y el colector solar

Otro parámetro a tener en cuenta proporcionado por el type es el “Total tilted Surface radiation for Surface” que hace referencia a la radiación total que incide en la superficie del colector y más tarde será útil para calcular los rendimientos de los colectores.

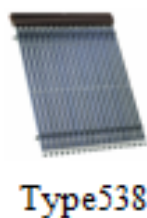


Figura 4-23 Icono colector solar

Type 538 (Captador solar): Se puede encontrar en “Solar Thermal Collectors” dentro de la librería TRNSYS. Se trata de un componente por el que circula el fluido calor-portante y donde este fluido adquiere el calor necesario que más tarde cederá por convección y conducción al fluido que entra en el depósito.

Se pueden modificar los parámetros de este componente para ajustarlo a las especificaciones que sean necesarias. En esta simulación se han puesto dos colectores que podrán funcionar en serie o en paralelo según se considere. Los parámetros que se han introducido en este captador son: El área del colector, el número de colectores y el calor específico del fluido que circula por los colectores.

Parameter						
	Input	Output	External Files	Comment		
		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Collector Array Area	1.6	m ²	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2		Number in Series	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3		Fluid Specific Heat	3.75	kJ/kg.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4		Capacitance of Collector	10.0	kJ/K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5		Number of Nodes	100	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 4-24 Parámetros del colector solar



Figura 4-25 Icono válvula de tres vías con control

Type 11f (válvula de tres vías con controlador de señal): Se puede encontrar en “Hydronics” dentro de la librería de TRNSYS. Este type hace referencia a una válvula de tres vías normal que a su vez tiene una entrada que se llama “Control Signal” la cual hará que se desvíe el flujo en una u otra dirección.

La primera válvula de tres vías con controlador (V3V1) desviará el flujo por la salida superior e inferior cuando los colectores se encuentren en paralelo y desviará el flujo solo por la parte inferior cuando los colectores se encuentren en serie. Este funcionamiento se regula mediante una calculadora con una función lógica. Se establecerá el valor de serie=1 y el valor de paralelo= (not serie) cuando estén en serie de tal forma que la válvula recibe un 1 y manda la señal solo por el circuito de abajo. Cuando

los colectores estén en paralelo se establecerá $serie=0$ y la válvula mandará la mitad del fluido por la parte superior y la otra mitad por la parte inferior.

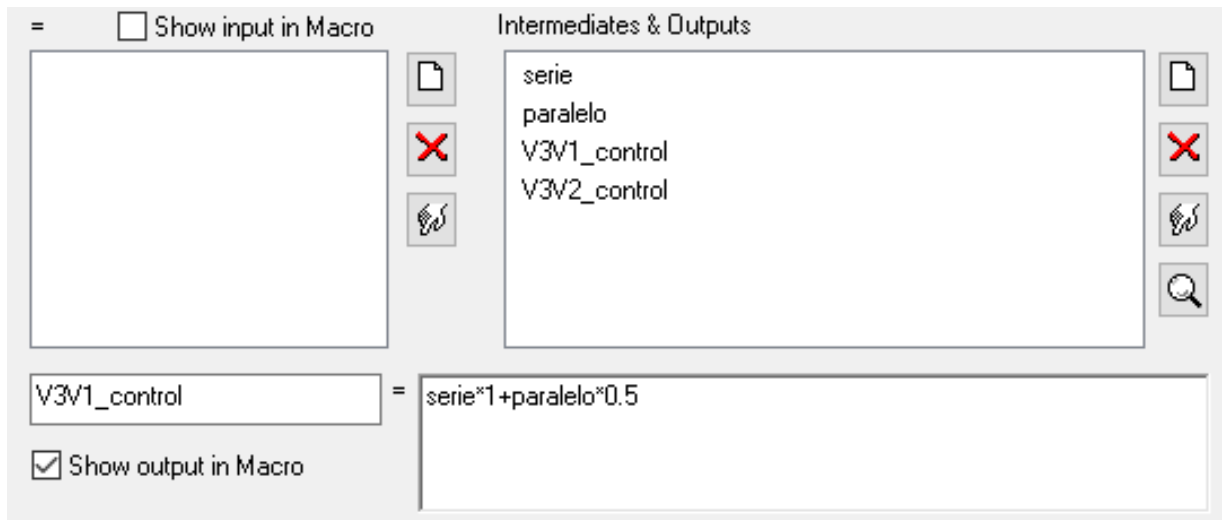


Figura 4-26 Función válvula V3V1

La segunda válvula de tres vías con controlador (V3V2) está situada después del primer colector y por ella siempre va a circular fluido en todas las distribuciones posibles (serie y paralelo). Cuando los colectores están en serie ($serie=1$), la válvula recibirá un 1 y el fluido se irá para el circuito superior. Esto ocurre porque está configurada de tal forma que cuando adquiera el valor de 1, ha sido impuesto mediante las salidas que, vaya al circuito superior. Al llegar al circuito superior, llega a otra válvula que está conectada con el otro colector y de esta forma se consigue que estén en serie. Por otro lado, si los colectores están en paralelo ($serie=0$) el fluido sale por el circuito inferior hacia una válvula de tres vías que recogerá el fluido que le llega del primer colector y el fluido que le llega del segundo colector de manera independiente.

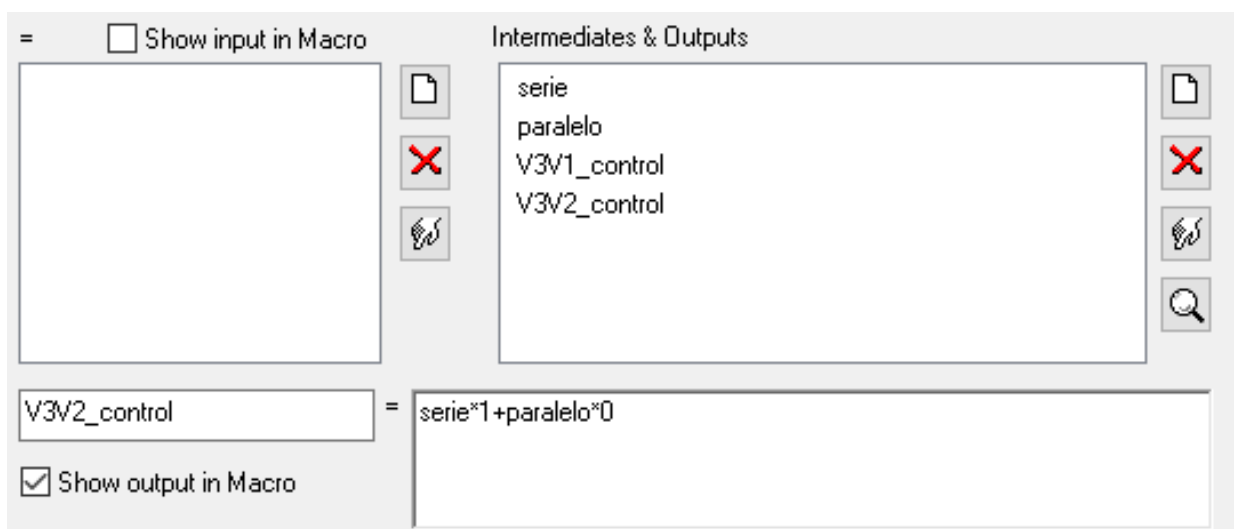


Figura 4-27 Función válvula V3V2

La tercera válvula de tres vías con controlador, en función de la señal que le mande el controlador de temperatura media del tanque (type 106) desviará el flujo en una u otra dirección. El type 11f recibe

el flujo y la temperatura a la salida de los colectores solares, además se encarga de enviar estos parámetros al intercambiador de calor o al aerodisipador.



Figura 4-28 Icono Interacumulador

Type 534 (Interacumulador): Se puede encontrar en “Storage tank library” dentro de la librería “TESS”. El type 534 realiza una función doble, al simular el funcionamiento de un interacumulador.

Por un lado es capaz de calentar el fluido calor-transportante con un intercambiador de calor y con ello aumentar la temperatura del fluido que se encuentra en su interior. Por otro lado, la segunda función que desempeña es la de actuar como depósito de agua caliente sanitaria (ACS).

Este type permite introducir una gran cantidad de parámetros de manera que el tanque que se vaya a simular quede bien definido. Los parámetros modificados para la simulación han sido:

- 1) Número de nodos: con este parámetro se fija el número de divisiones internas que el usuario quiere hacer del tanque de modo que se pueda obtener una mayor estratificación. Para esta simulación se han tomado 4 nodos.
- 2) El número de puertos: el número de puertos indica cuantos puertos quiere el usuario que haya de entrada y por lo tanto de salida también. En esta simulación solo habrá 1, que sería la entrada de agua a temperatura ambiente y la salida de ACS al haber sido calentada por el intercambiador de calor.
- 3) El volumen del tanque y su altura: $0,305 \text{ m}^3$ y 170 cm respectivamente.
- 4) Densidad y calor específico del fluido que se encuentra en el interior del depósito, en este caso será agua por lo tanto tendrá una densidad de $1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ y un calor específico de $4,19 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg K}}$
- 5) Se ha especificado que el puerto de entrada estará en el nodo 4 (parte inferior del tanque) y la salida se efectuará por el nodo 1.
- 6) El número de nodos en los que el intercambiador estará dividido, en esta simulación se ha puesto que solo en 1 y será en el nodo 4.
- 7) La densidad y calor específico del fluido que circula por la instalación y por lo tanto en el interior del intercambiador de calor, el fluido es una mezcla de propilenglicol y agua, la densidad del propilenglicol es $1065 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ y para el calor específico se han tomado $3,75 \frac{\text{Kj}}{\text{Kg K}}$
- 8) Parámetros específicos del intercambiador de calor tomados del fabricante.

Este type dentro de la simulación tiene dos salidas, una de ellas es la salida de ACS del tanque y la otra es la salida del intercambiador de calor hacia la válvula de tres vías.

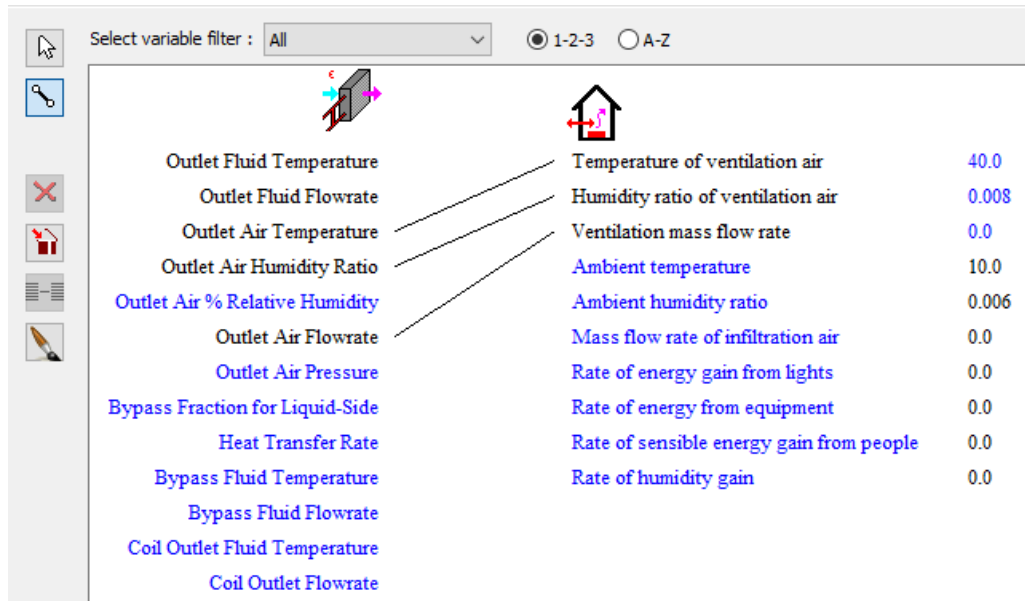


Figura 4-32 Parámetros enlazados entre el aerodisipador y el laboratorio

El fluido calor-portante, después de haber perdido temperatura, continúa su recorrido hacia la válvula de tres vías.



Figura 4-33 Icono laboratorio de mecánica

Type 88 (Laboratorio de mecánica): Este elemento simula el laboratorio de mecánica del edificio de investigación del Centro Universitario de la Defensa, se han introducido el área, volumen y la temperatura inicial dentro de este laboratorio. Este type proporciona al ventilador del aerodisipador la temperatura de entrada (la temperatura del interior del laboratorio), la humedad y el flujo de aire.

Parameter	Input	Output	Comment																																																					
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Unit</th> <th>More</th> <th>Macro</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>Specific heat of building air</td> <td>1.007</td> <td>kJ/kg.K</td> <td>More...</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Density of building air</td> <td>1.2</td> <td>kg/m³</td> <td>More...</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Building surface area</td> <td>250</td> <td>m²</td> <td>More...</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Building volume</td> <td>750</td> <td>m³</td> <td>More...</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Humidity ratio multiplier</td> <td>10</td> <td>-</td> <td>More...</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Initial temperature</td> <td>25</td> <td>C</td> <td>More...</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Initial humidity ratio</td> <td>0.005</td> <td>-</td> <td>More...</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>Latent heat of vaporization</td> <td>2260</td> <td>kJ/kg</td> <td>More...</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>	Name	Value	Unit	More	Macro	3	Specific heat of building air	1.007	kJ/kg.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>	4	Density of building air	1.2	kg/m ³	More...	<input checked="" type="checkbox"/>	5	Building surface area	250	m ²	More...	<input checked="" type="checkbox"/>	6	Building volume	750	m ³	More...	<input checked="" type="checkbox"/>	7	Humidity ratio multiplier	10	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>	8	Initial temperature	25	C	More...	<input checked="" type="checkbox"/>	9	Initial humidity ratio	0.005	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>	10	Latent heat of vaporization	2260	kJ/kg	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
Name	Value	Unit	More	Macro																																																				
3	Specific heat of building air	1.007	kJ/kg.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>																																																			
4	Density of building air	1.2	kg/m ³	More...	<input checked="" type="checkbox"/>																																																			
5	Building surface area	250	m ²	More...	<input checked="" type="checkbox"/>																																																			
6	Building volume	750	m ³	More...	<input checked="" type="checkbox"/>																																																			
7	Humidity ratio multiplier	10	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>																																																			
8	Initial temperature	25	C	More...	<input checked="" type="checkbox"/>																																																			
9	Initial humidity ratio	0.005	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>																																																			
10	Latent heat of vaporization	2260	kJ/kg	More...	<input checked="" type="checkbox"/>																																																			

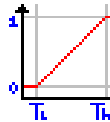
Figura 4-34 Parámetros laboratorio



Type111a

Figura 4-35 Icono ventilador aerodisipador

Type 111 (Ventilador del aerodisipador): Este type es el encargado de evitar que se sobrecaliente el aerodisipador refrigerándolo cuando le llega la orden del termostato.



Type1669

Figura 4-36 Icono termostato aerodisipador

Type 1669 (Termostato aerodisipador): Este type actúa sobre la velocidad del aerodisipador atendiendo a los márgenes de temperatura impuestos.



Type11h

Figura 4-37 Icono válvula de tres vías

Type 11h (válvula de tres vías): Este componente se puede encontrar en “Hydronics” dentro de la librería de TRNSYS. Este type está compuesto por dos entradas y una única salida, las entradas pertenecen a la salida del intercambiador de calor y a la salida del aerodisipador mientras que la salida enlaza directamente con la bomba.



Type3b

Figura 4-38 Icono bomba

Type 3b (Bomba de velocidad variable): Este type es el encargado de poner en funcionamiento la instalación ya que es el que envía el fluido calor-portante a los colectores. Entre sus parámetros se pueden modificar: El flujo máximo, el calor específico del fluido calor-portante y la potencia máxima.

La bomba entra en funcionamiento mediante un “Control signal” que recibe de la Figura 4-39.



Type2b

Figura 4-39 Icono centralita solar

Type 2b (Controlador de activación de la bomba): Este componente es el más importante de la instalación ya que le dará la orden a la bomba de activarse cuando así lo indiquen los parámetros establecidos.

Parameter	Input	Output	Comment					
				Name	Value	Unit	More	Macro
1				Upper input temperature Th	120	C	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2				Lower input temperature TI	30	C	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3				Monitoring temperature Tin	40	C	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4				Input control function	0	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5				Upper dead band dT	6	Noname	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6				Lower dead band dT	4	Noname	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 4-40 Parámetros de la centralita solar

La primera entrada “Upper input temperature Th” hace referencia a la temperatura de salida del colector.

La segunda entrada “Lower input temperature TI” está enlazado con la temperatura del interacumulador en el nodo 4 (nodo en el que se encuentra el intercambiador de calor).

La tercera entrada está conectada a la temperatura media del tanque y dentro de los parámetros de la centralita se puede establecer un límite que no debe sobrepasar la temperatura que monitoriza la centralita, en este caso la temperatura media del tanque. Para esta simulación se ha establecido un límite de 60°C

Las entradas 5 y 6 están relacionadas directamente con las entradas 1 y 2.

La función que realiza la “Upper dead band Dt” es la de establecer la diferencia de temperaturas que debe haber entre la entrada 1 y 2 para que la bomba comience a funcionar. Por otro lado, la entrada “Lower dead band Dt” establece la diferencia de temperatura que debe haber entre la entrada 1 y 2 para que la bomba deje de funcionar.

5 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

5.1 Introducción

Una vez establecidos los parámetros de los componentes que intervienen en la simulación hay que comprobar que funcionan de manera correcta. En este punto hay que destacar que la simulación esta realizada para un depósito del cual no se realiza ningún consumo. Esto puede influir en los resultados obtenidos.

Se procederá a realizar un estudio paramétrico de la simulación y a partir de los resultados obtenidos en la simulación se comprobará qué distribución es la más idónea y se analizará la variación de estos resultados en diferentes situaciones y períodos del año.

Los parámetros que serán objeto de estudio son:

- La representación gráfica de cómo varía la temperatura del tanque en función de la temperatura de salida de los colectores para la temperatura de consigna de 70°C.
- El rendimiento de los colectores solares cuando están en serie y en paralelo. Este rendimiento se obtendrá para las temperaturas de consigna del depósito de 40,50 y 60°C. Además se analizarán los rendimientos de los colectores cuando el caudal es de 100 y 200 kg/hr.
- La cantidad de energía total que puede ser aprovechada.

5.1 Variación de la temperatura de salida del tanque

La temperatura a la que se encuentra el fluido que está en el interior del depósito varía en función a la cantidad de calor que el intercambiador de calor cede a este fluido. Este intercambio de calor será mayor en los meses de verano que en los meses de invierno.

A continuación se ha realizado una simulación anual estableciendo la temperatura máxima en el depósito de 70°C. De esta forma se podrá comprobar en que períodos del año la temperatura del depósito logra alcanzar distintas temperaturas.

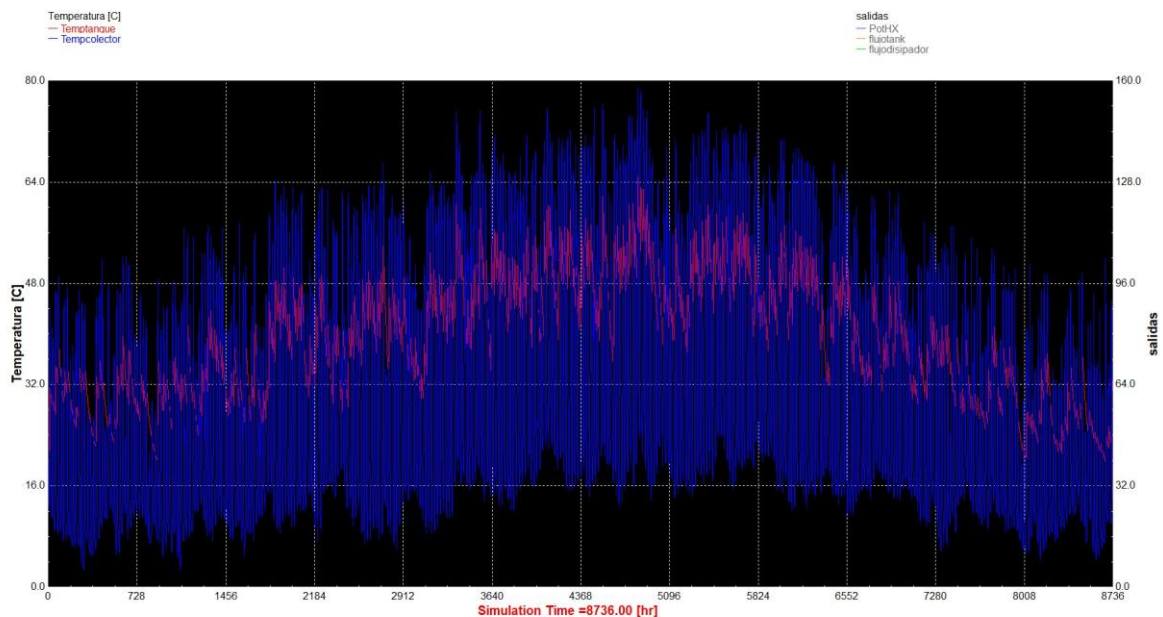


Figura 5-1 Simulación año completo colectores en serie

La anterior gráfica hace referencia a la simulación anual para una distribución en serie de los colectores y una temperatura máxima establecida en el depósito de 70°C. A pesar de establecer esta temperatura máxima, el tanque solo conseguirá tener fluido a 64°C durante los meses de verano.

Esta será la máxima temperatura que alcance ya que la simulación con los colectores en paralelo aportará una menor energía al intercambiador, por lo tanto, éste tendrá menos calor que ceder al fluido inmerso en el depósito.

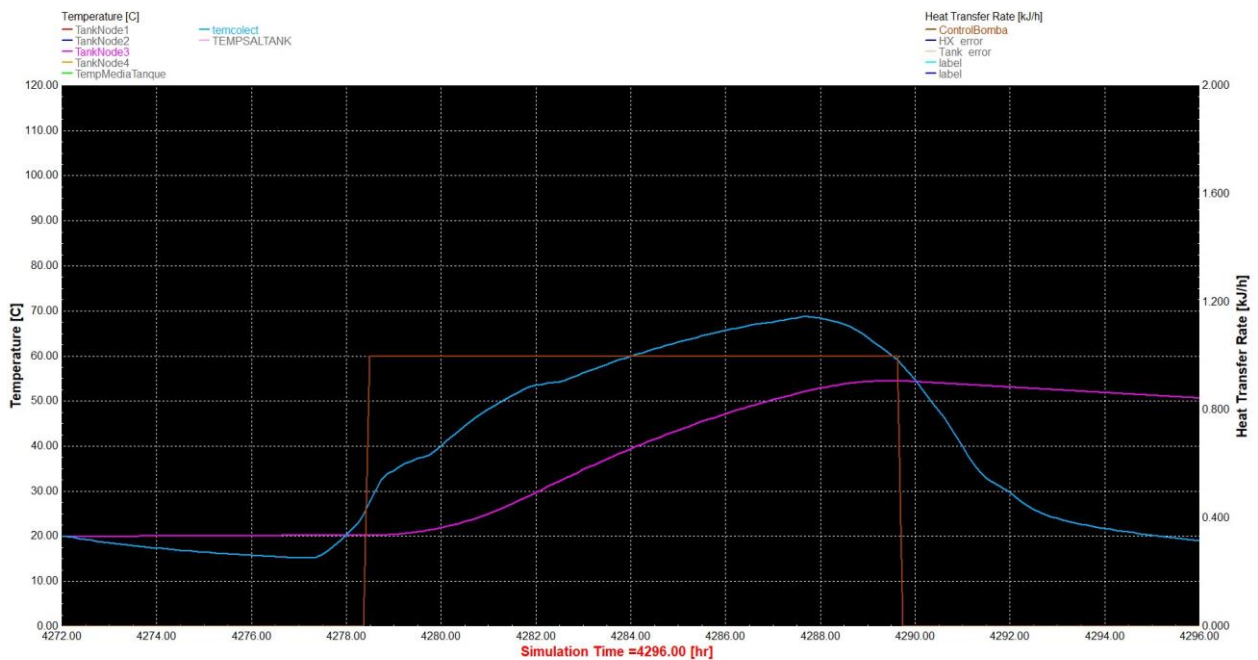


Figura 5-2 Gráfica Activación de la bomba

Como se ha mencionado anteriormente, la bomba se activa cuando la diferencia de temperatura entre la salida del colector y el tanque es de 6°C. Por el contrario, la bomba se apaga cuando esta diferencia de temperaturas es inferior a 4°C. Este funcionamiento se puede observar en el gráfico anterior.

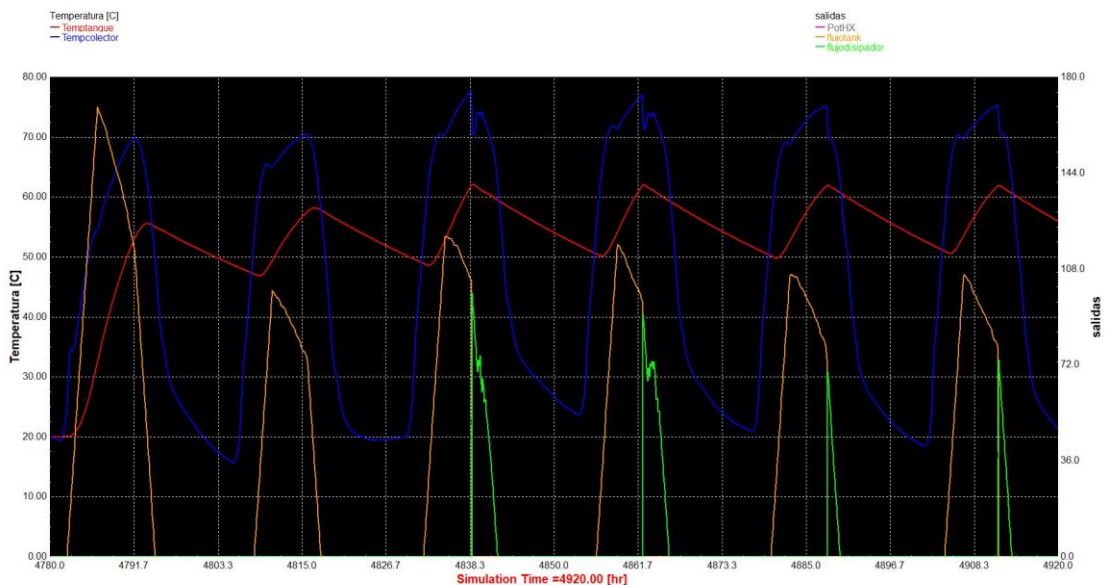


Figura 5-3 Gráfica funcionamiento aerodisipador

En la anterior imagen se puede ver de manera gráfica el momento exacto en el que comienza a funcionar el aerodisipador. Esto sucede cuando la temperatura del tanque (línea roja) sobrepasa 60°C, esta temperatura es la que se ha establecido como la máxima a la que puede encontrarse el fluido que almacena el depósito.

5.2 Rendimiento de los colectores

Con la finalidad de ver qué distribución es la más adecuada de llevar a cabo en función de la estación del año en la que nos encontremos, se ha hecho un estudio del rendimiento de los colectores en serie y en paralelo. Los meses en los que se van a analizar los rendimientos de los colectores son: Marzo, junio, agosto y noviembre.

El rendimiento de los colectores se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Q_U}{A I_T} = \frac{\dot{m} C_{pf} (T_o - T_i)}{A I_T}$$

η = Rendimiento.

Q_U = Calor útil ($\frac{Kj}{h}$).

A = Área del colector (m^2).

I_T = Radiación total que incide sobre la superficie del colector ($\frac{Kj}{h m^2}$).

\dot{m} = Caudal ($\frac{kg}{h}$).

C_{pf} = calor específico del fluido del colector ($\frac{Kj}{kg K}$).

T_o = Temperatura de salida del fluido del colector (°C).

T_i = Temperatura de entrada del fluido al colector.(°C).

5.2.1 Rendimientos en marzo

A continuación se van a comparar los distintos rendimientos obtenidos para el mes de marzo en función de la temperatura máxima a la que se encuentra el tanque. Los cálculos han sido tomados para temperaturas de 40,50 y 60°C.

En el eje de ordenadas se representan los rendimientos que adquieren los colectores y en el eje de abscisas los intervalos de tiempo durante los cuales adquieren esos rendimientos.

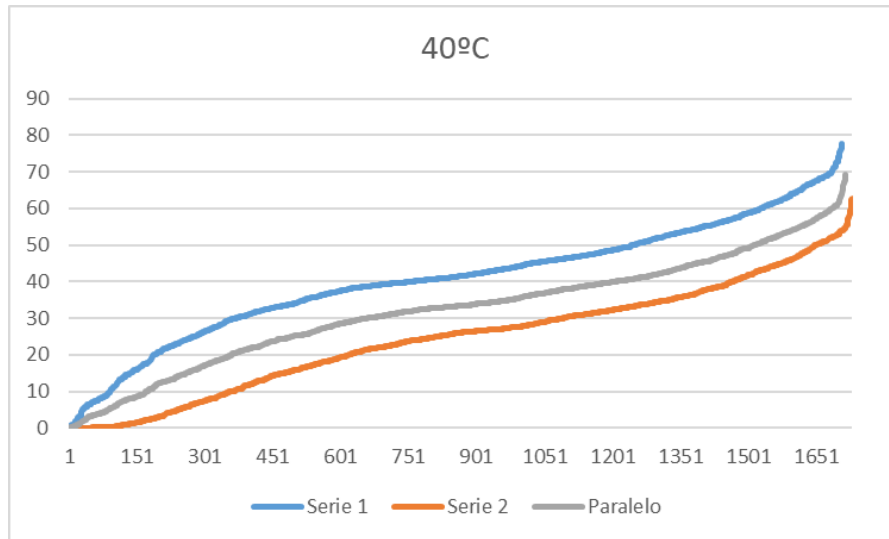


Figura 5-4 Gráfica rendimiento marzo para 40°C

El parámetro Serie 1 hace referencia al primer colector de la distribución en serie mientras que el parámetro Serie 2, hace referencia al segundo colector de la distribución en serie.

El parámetro paralelo está relacionado con uno de los dos colectores de la distribución en paralelo. Se ha cogido solo un colector en el caso de la distribución en paralelo ya que el rendimiento de los dos colectores va a ser el mismo.

En la anterior gráfica se puede observar cómo ha sido el rendimiento de los colectores durante el mes de marzo. Se ve una diferencia entre los distintos rendimientos siendo el primer colector en serie el que más rendimiento ha aportado, también se aprecia como el colector en paralelo ha generado un rendimiento superior al segundo colector en serie.

En la curva del rendimiento del primer colector en serie se aprecia como disminuye la pendiente en el intervalo de 30-50 %. Es este intervalo donde el rendimiento del colector va a ser más frecuente. El rendimiento óptimo que llegará a alcanzar será de un 78%.

Para la curva del segundo colector en serie se puede observar como el intervalo de trabajo más frecuente es el de 20-40%, este intervalo también será el más común para el colector en paralelo. La diferencia entre ambos colectores es que el segundo colector en serie alcanzará un rendimiento de un 63% mientras que el rendimiento óptimo del colector en paralelo será de un 69%.

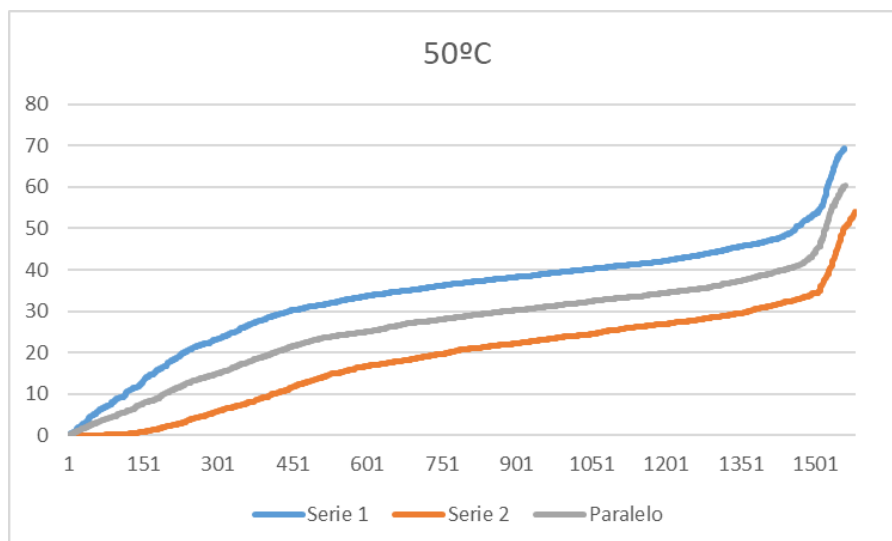


Figura 5-5 Gráfica rendimiento marzo para 50°C

Para la temperatura del tanque de 50°C se observa como los intervalos de trabajo de los colectores anteriormente mencionados se mantiene. No obstante, se aprecia como los rendimientos superiores a este intervalo se dan durante menos instantes de tiempo.

Además el rendimiento óptimo de cada colector también disminuye siendo este de 69,5% para el primer colector en serie, 60,5% para el colector en paralelo y 53,9% para el segundo colector en serie.

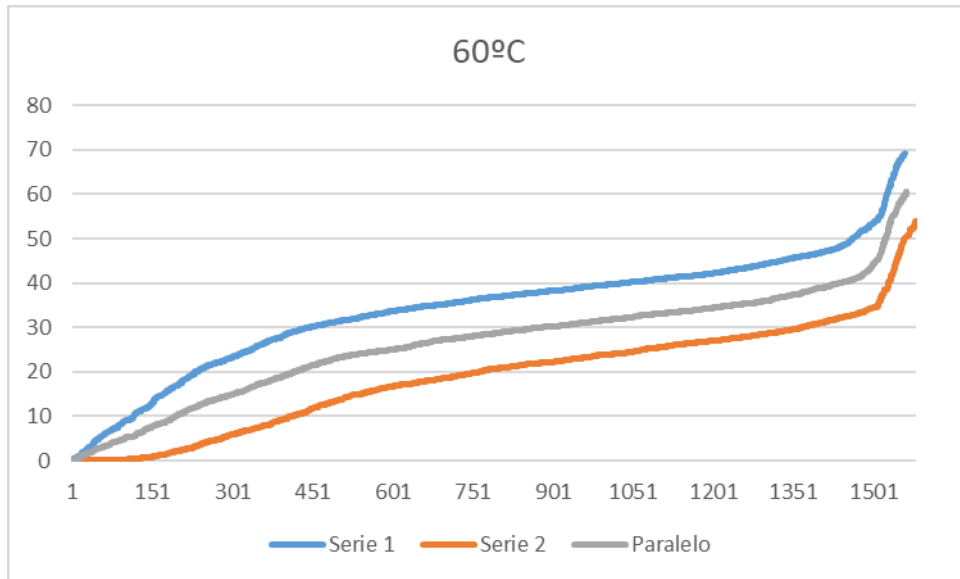


Figura 5-6 Gráfica rendimiento marzo para 60°C

Los datos obtenidos para el rendimiento de los colectores cuando la temperatura del tanque es de 60°C no se diferencian mucho de los que se han obtenido para la temperatura de 50°C. Esto se debe a que la temperatura del tanque supera los 55°C durante pocos intervalos de tiempo.

En la siguiente gráfica se puede ver una comparativa del rendimiento medio de los colectores para las distintas temperaturas de consigna. Los datos han sido tomados haciendo la media de Serie 1 y Serie 2 y comparando este resultado con el obtenido en Paralelo.

Para el mes de marzo se puede apreciar como para una temperatura de consigna 40°C sería mejor una distribución de los colectores en serie mientras que para el resto de temperaturas de consigna, se obtendría una mayor eficiencia con la distribución de los colectores en paralelo.

Marzo					
40 °C		50°C		60 °C	
Serie	Paralelo	Serie	Paralelo	Serie	Paralelo
32,49	32,20	26,19	26,38	26,22	26,34

Tabla 5-1 Comparación rendimientos marzo

5.2.2 Rendimientos en junio

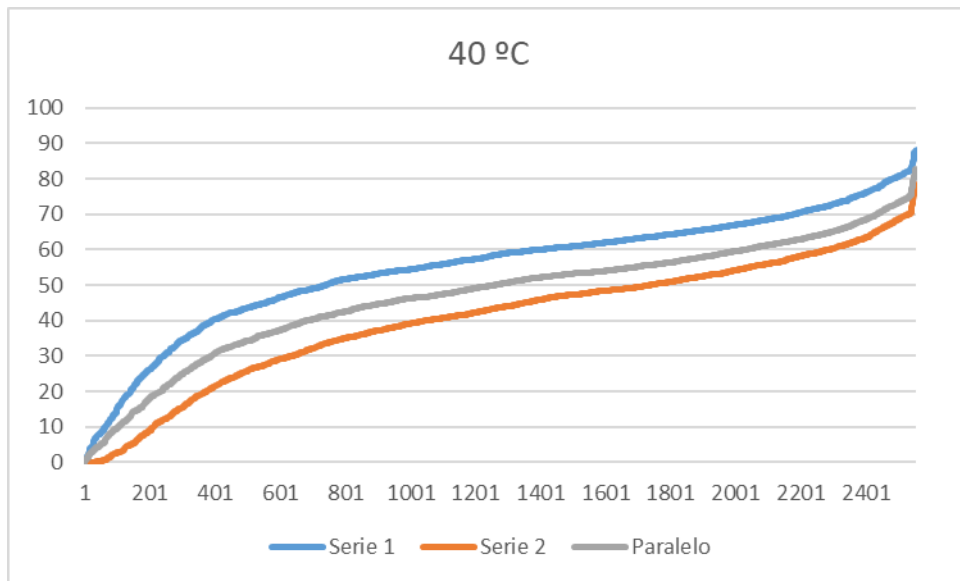


Figura 5-7 Gráfica rendimiento junio para 40°C

En la anterior gráfica se observa como el primer colector en serie tiene un rango de funcionamiento frecuente de 50-70% y un rendimiento óptimo del 88,2%. En el segundo colector en serie y el colector en paralelo los rendimientos más comunes estarán en el intervalo de 40-60% y un rendimiento óptimo de 78,4% y 82,8% respectivamente.

Se observa en estos cambios de intervalos y de rendimientos óptimos como en junio que es un mes en el que hay mayor radiación que en marzo, también aumenta el calor útil de los colectores consiguiendo rendimientos más elevados.

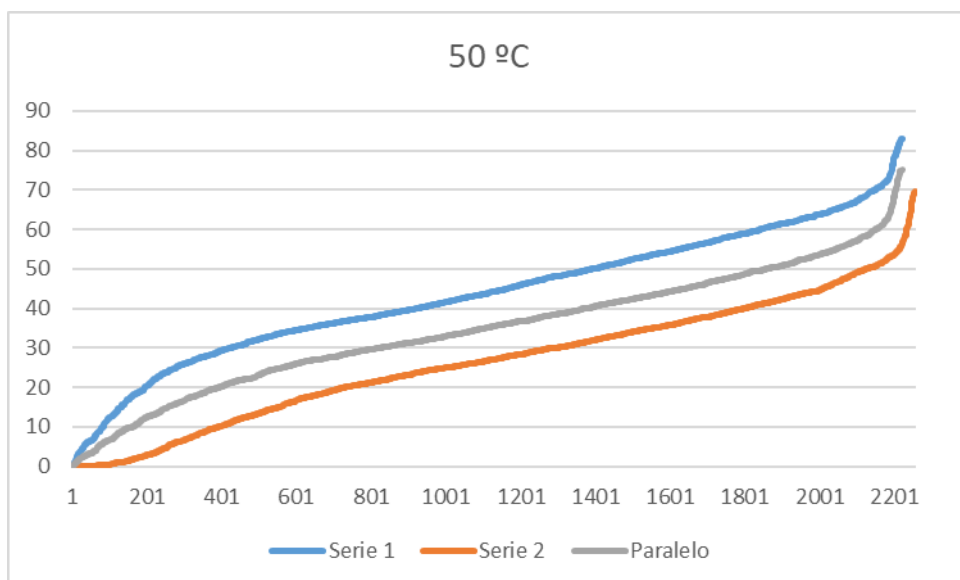


Figura 5-8 Gráfica rendimiento junio para 50°C

Para una temperatura de 50°C se aprecia como los rendimientos van aumentando gradualmente sin que haya un intervalo de referencia en el que se agrupen una mayor cantidad de rendimientos. Sin embargo, los rendimientos obtenidos son mayores con respecto al mes de marzo.

Los valores óptimos que alcanzan el primer colector en serie, el colector en paralelo y el segundo colector en serie son de 83%, 56,4% y 75% respectivamente.

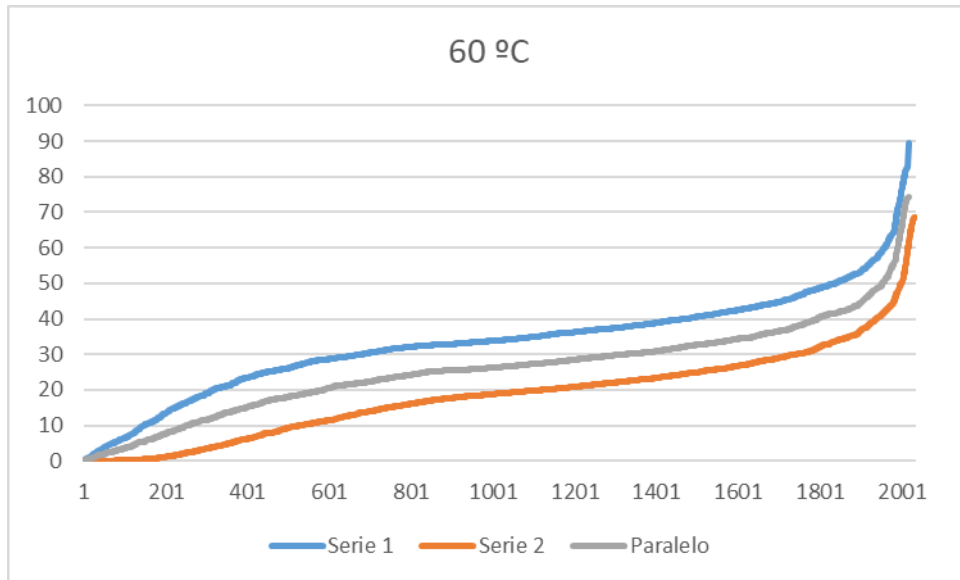


Figura 5-9 Gráfica rendimiento junio para 60°C

En la gráfica anterior se aprecia como los intervalos no varían mucho en comparación al mes de marzo pero hay dos datos que se pueden resaltar. Por un lado los colectores rinden durante mas instantes de tiempo. Por otro lado, los rendimientos óptimos que se dan en los colectores también son mayores, el rendimiento óptimo del primer colector en serie es de 89,65%, el rendimiento óptimo del colector en paralelo es de 60,4% y el del segundo colector en serie es de 74,2%.

Junio					
40 °C		50°C		60 °C	
Serie	Paralelo	Serie	Paralelo	Serie	Paralelo
47,73	47,02	34,77	34,59	25,74	25,83

Tabla 5-2 Comparación rendimientos junio

A la vista de los resultados obtenidos, para las temperaturas de consigna de 40 y 50°C sería más eficiente colocar los colectores en serie mientras que para la temperatura de consigna de 60°C se obtendría una mayor eficiencia con los colectores en paralelo.

5.2.3 Rendimientos en agosto

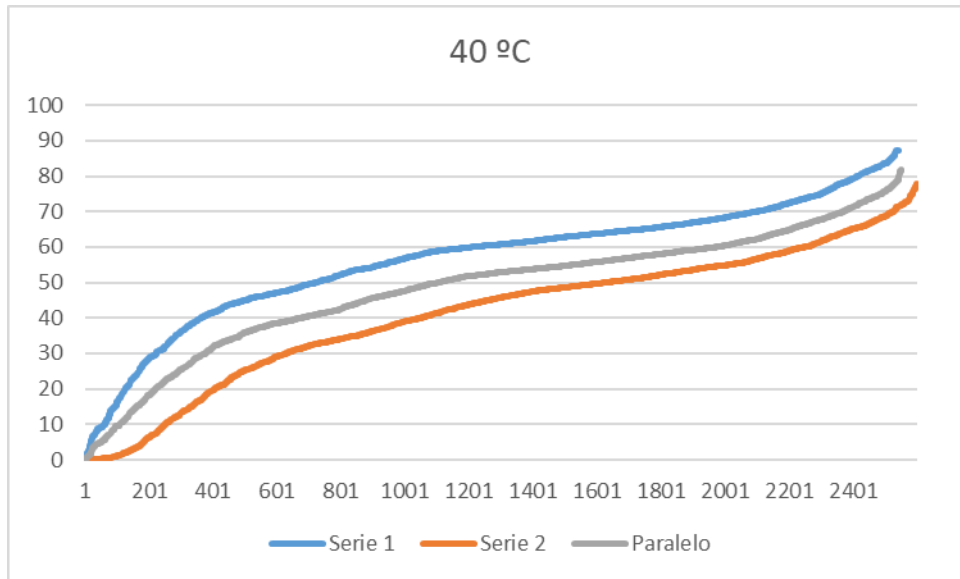


Figura 5-10 Gráfica rendimiento agosto para 40°C

Para la temperatura de 40°C en el mes de agosto, se alcanza el mayor rango de rendimientos comunes que se dan en el primer colector en serie siendo este de un 40-70%. El intervalo de rendimiento del colector en paralelo es de 40-60% mientras que el del segundo colector en serie es de 30-60%. Los rendimientos óptimos también son menores para el mes de agosto si los comparamos con el mes de junio.

Los rendimientos óptimos que se alcanzan en este mes son de 87,3% para el primer colector en serie, 77,9% para el segundo colector en serie y 81,8% para el colector en paralelo.

Otro dato que se puede apreciar es que el segundo colector en serie rendirá durante un mayor número de veces que el primer colector en serie y el colector en paralelo.



Figura 5-11 Gráfica rendimiento agosto para 50°C

Para la temperatura de 50°C en el mes de agosto, se observa como los intervalos de los rendimientos caen con respecto a los obtenidos para la temperatura de 40°C.

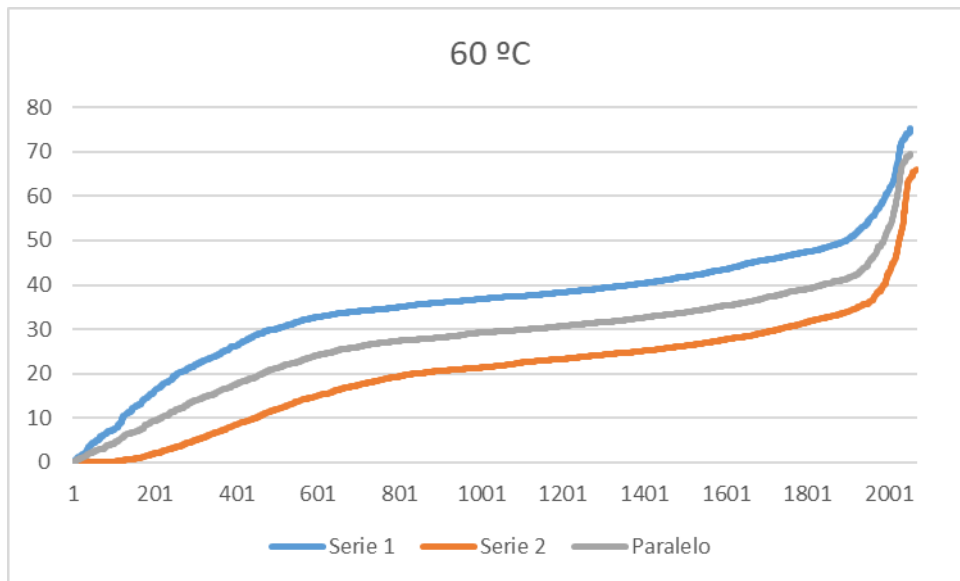


Figura 5-12 Gráfica rendimiento agosto para 60°C

En la gráfica anterior se observa como los intervalos de los rendimientos siguen cayendo, aquí se puede ver la tendencia de que los rendimientos son menores durante todo el mes en función de cuanto mayor sea la temperatura a la que se encuentra el tanque para los meses de verano.

En el mes de agosto, las distribuciones para las cuales se obtienen mejores rendimientos coinciden con las del mes de junio siendo más eficiente la distribución en serie para las temperaturas de 40 y 50°C mientras que para las temperaturas de 60°C sería más eficiente una distribución en paralelo.

Agosto					
40 °C		50°C		60 °C	
Serie	Paralelo	Serie	Paralelo	Serie	Paralelo
48,52	48,25	37,37	37,16	27,77	27,82

Tabla 5-3 Comparación rendimientos agosto

5.2.4 Rendimientos en noviembre

En las siguientes gráficas se puede observar como en noviembre, el número de rendimientos obtenidos es casi la mitad que los obtenidos durante los meses de verano y bastante menor también si lo comparamos con el mes de marzo.

En este mes se aprecia como todas las gráficas obtenidas para las distintas temperaturas mantienen sus intervalos de rendimientos frecuentes así como los rendimientos óptimos que se consiguen en cada una de ellas.

Los intervalos que se han registrado para este mes han sido: 30-50% para el primer colector en serie y un rendimiento óptimo de 66%, 25-40% en el caso del colector del paralelo y un rendimiento óptimo de 54,4% y por último un intervalo de 20-35% para el segundo colector en serie con un rendimiento óptimo de 48,8%.

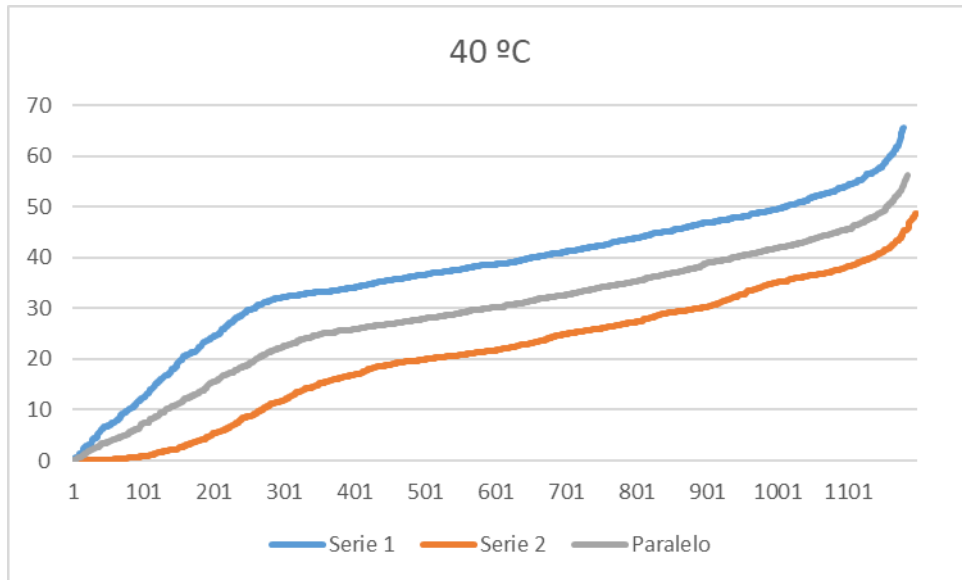


Figura 5-13 Gráfica rendimiento noviembre para 40°C

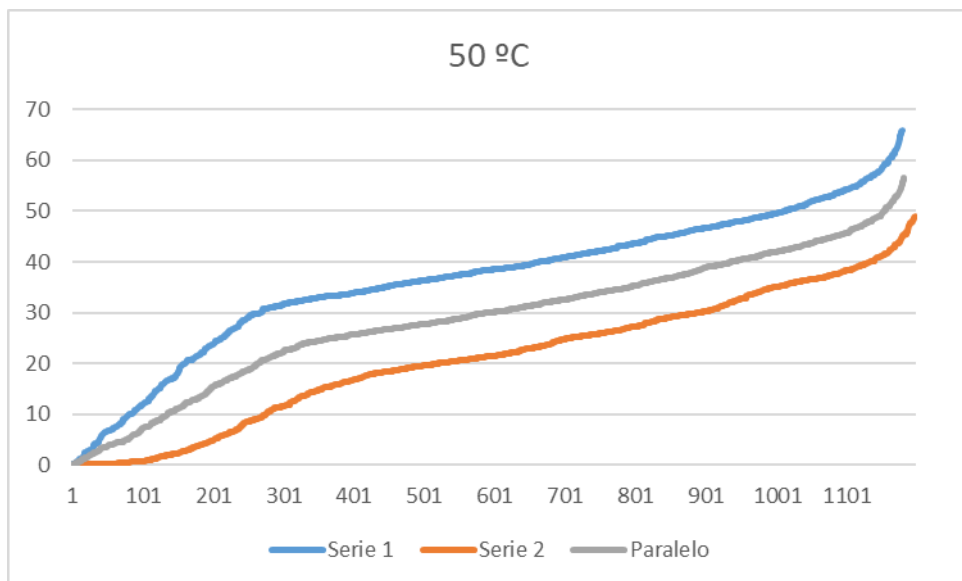


Figura 5-14 Gráfica rendimiento noviembre para 50°C

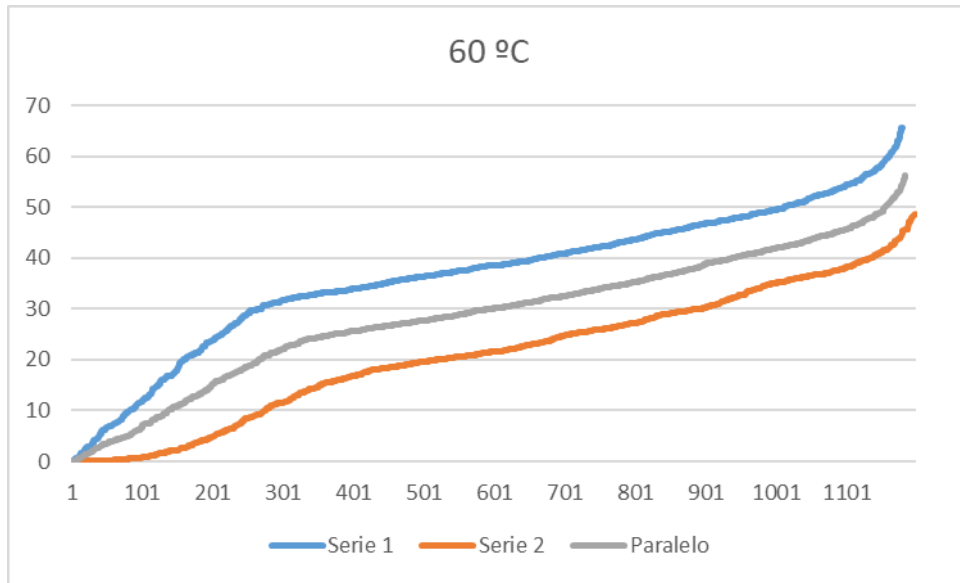


Figura 5-15 Gráfica rendimiento noviembre para 60°C

Para el mes de noviembre ocurre lo mismo que para el mes de marzo, la distribución en serie solo sería mejor para la temperatura de consigna de 40°C.

Noviembre					
40 °C		50°C		60 °C	
Serie	Paralelo	Serie	Paralelo	Serie	Paralelo
28,88	28,83	28,62	28,72	28,64	28,64

Tabla 5-4 Comparación rendimientos noviembre

5.3 Variación del rendimiento en función del caudal de la bomba

5.3.1 Simulación 29 de junio

Se ha elegido el día 29 de junio para la realización del estudio para diferentes caudales según la distribución en serie o paralelo de los colectores. La línea azul representa el caudal de 100 kg/hr de la bomba mientras que la línea naranja hace referencia al caudal de 200 kg/hr.

La gráfica Serie 1 hace referencia al primer colector en la distribución en serie. La gráfica Serie 2 hace referencia al segundo colector en la distribución en serie. La gráfica Paralelo ha sido obtenida según los rendimientos obtenidos del colector en paralelo, en este caso solo de uno ya que el otro tiene los mismos rendimientos.

En las tres gráficas se puede observar como el rendimiento aumenta cuando aumenta el caudal.

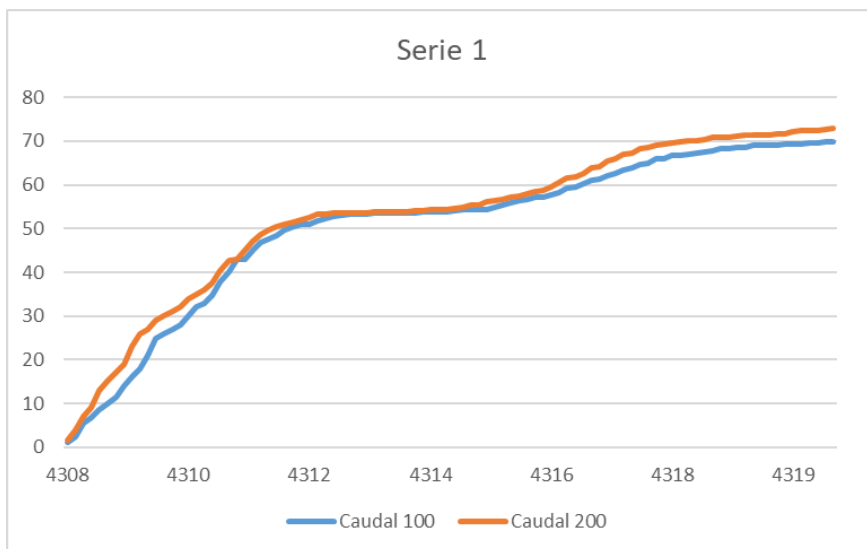


Figura 5-16 Rendimiento 29 de junio Serie 1

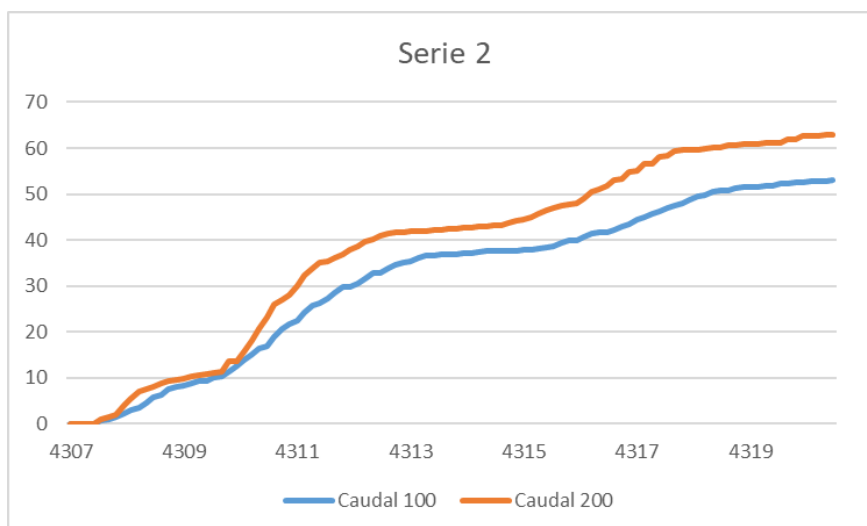


Figura 5-17 Rendimiento 29 de junio Serie 2

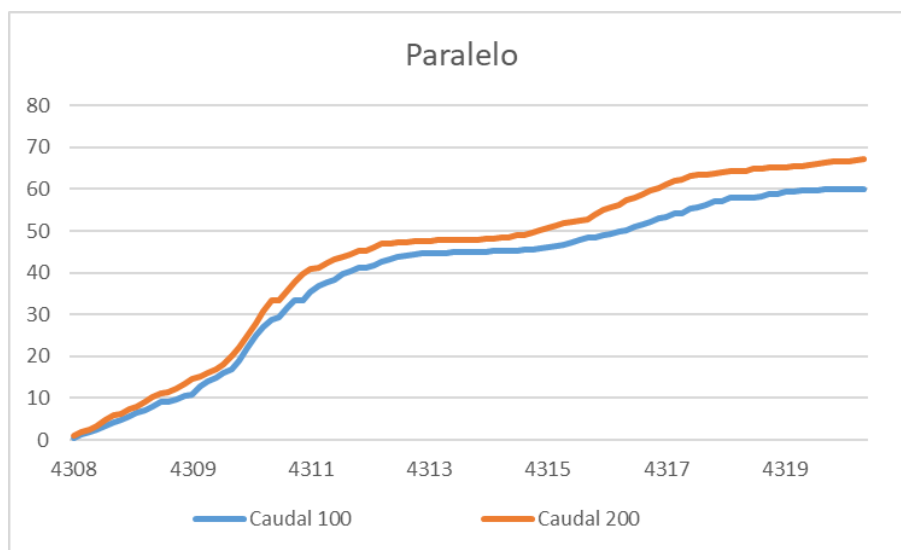


Figura 5-18 Rendimiento 29 de junio Paralelo

Para llevar a cabo la comparación de los caudales se ha hecho la media de Serie 1 y Serie 2 que corresponden respectivamente al primer y segundo colector en serie, con el colector Paralelo.

Se ha realizado la comparativa entre el rendimiento de las distintas distribuciones en función del caudal de la bomba para el 29 de junio. El resultado obtenido ha sido que tanto para un caudal de 100 kg/hr como para uno de 200 kg/hr, la distribución de los colectores en serie será más eficiente.

29 de Junio				
Caudal 100		Caudal 200		
Serie	Paralelo	Serie	Paralelo	
39,47	39,18	43,85	43,62	

Tabla 5-5 Comparación caudales 29 de junio

5.3.2 Simulación 23 de marzo

Se han realizado las mismas simulaciones mencionadas para el mes de junio y los resultados obtenidos son distintos. Para un caudal de 100 kg/hr en el mes de marzo sería más eficiente la distribución de los colectores en paralelo mientras que para el caudal de 200 kg/hr una distribución de los colectores en serie sería más eficiente.

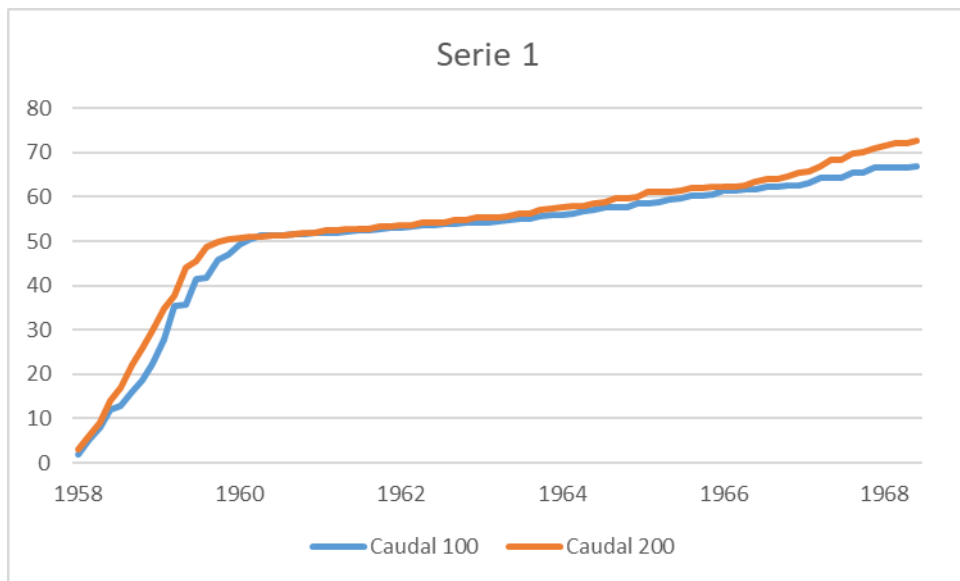


Figura 5-19 Rendimiento 23 de marzo Serie 1

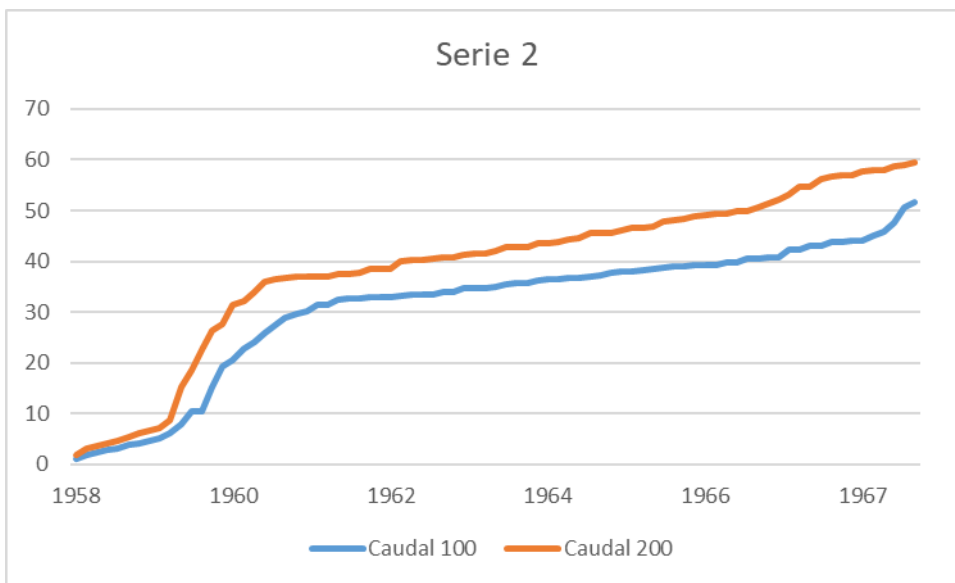


Figura 5-20 Rendimiento 23 de marzo Serie 2

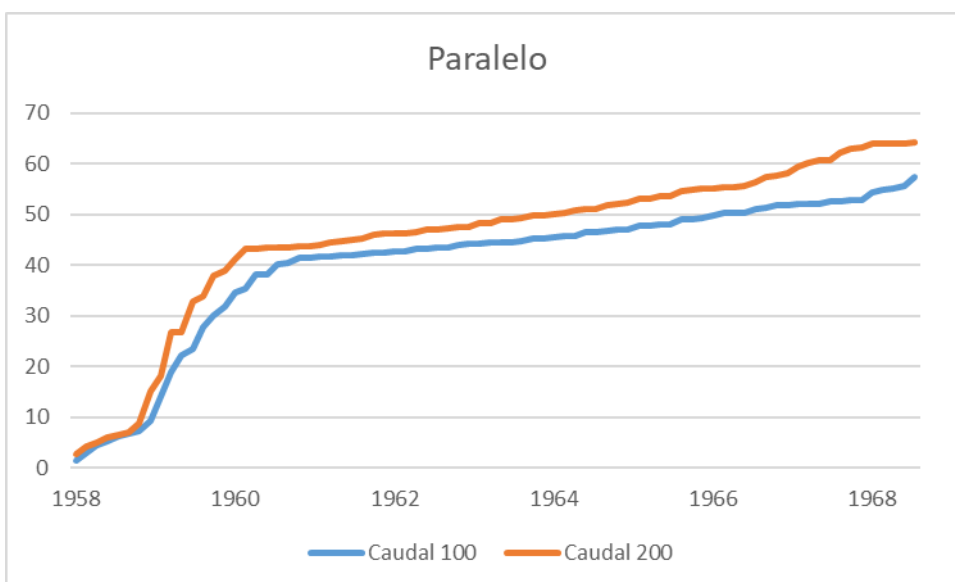


Figura 5-21 Rendimiento 23 de marzo Paralelo

Después de analizar los diferentes caudales para las distintas distribuciones, se observa como para un caudal de 100 kg/hr la eficiencia va a ser muy parecida mientras que para un caudal de 200 kg/hr, la distribución de los colectores en serie será más eficiente que la distribución en paralelo.

23 de Marzo			
Caudal 100		Caudal 200	
Serie	Paralelo	Serie	Paralelo
	42,77	42,87	45,78
			45,50

Tabla 5-6 Comparación caudales 23 de marzo

5.4 Energía generada

El calor que se genera a la salida de los colectores en las dos distribuciones se utiliza para calentar el fluido que está situado en el interior del depósito de almacenamiento. Este intercambio se lleva a cabo a través de un intercambiador de calor.

Una vez que el depósito ha alcanzado su máxima temperatura este calor es disipado por el aerodisipador.

A continuación se va a realizar un análisis del calor total generado, es decir, de la suma del calor que el intercambiador cede al depósito más la suma del calor que es disipado por el aerodisipador. Se han creado tres gráficas que hacen referencia a las temperaturas máximas del depósito de 40,50 y 60°C.

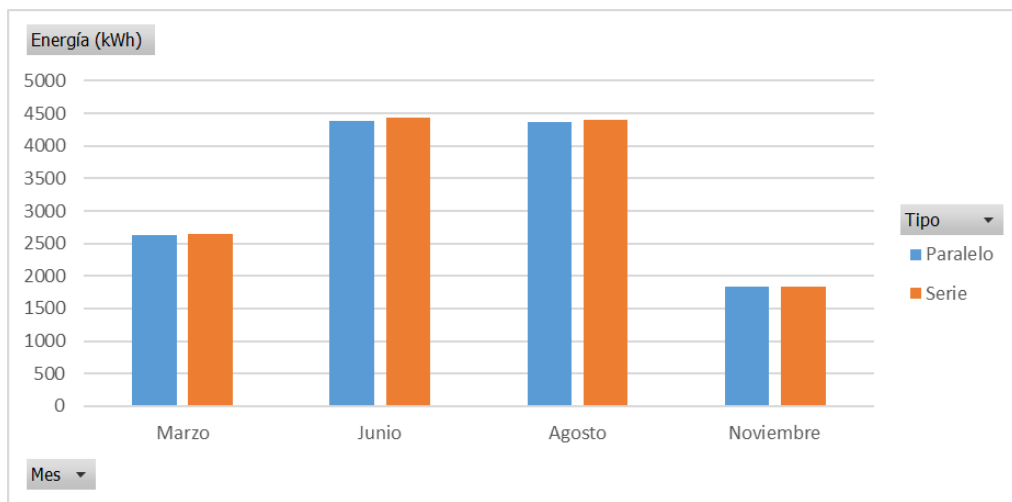


Figura 5-22 Gráfica energía generada para 40°C

Temperatura de 40°C				
Mes	Tipo	Intercambiador de calor	Disipador	Energía total (kWh)
Marzo	Serie	2280,02	369,51	2649,53
Marzo	Paralelo	2276,32	357,66	2633,98
Junio	Serie	2569,10	1866,94	4436,05
Junio	Paralelo	2566,01	1822,77	4388,77
Agosto	Serie	2622,96	1783,24	4406,20
Agosto	Paralelo	2618,97	1740,98	4359,95
Noviembre	Serie	1837,11	0,00	1837,11
Noviembre	Paralelo	1828,14	6,87	1835,01

Tabla 5-7 Datos energía generada para 40°C

En la anterior gráfica se observa como en los meses de verano se genera más calor que en los meses de invierno. El calor generado en todos los meses es muy parecido para ambas distribuciones, no

obstante, el calor que se genera en la distribución de colectores en serie es siempre mayor que el generado por la distribución de los colectores en paralelo.

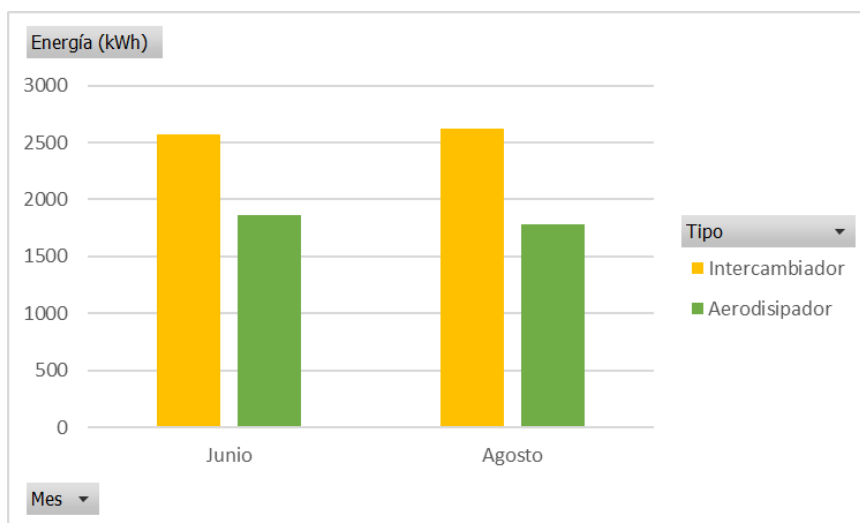


Figura 5-23 Balance energía obtenida 40°C

Esta gráfica hace referencia a como se distribuye ese calor generado para los meses de junio y agosto entre el intercambiador de calor y el aerodisipador. Se observa como la mayor parte del calor generado pertenece al intercambiador de calor, sin embargo una gran parte de la energía es disipada por el aerodisipador.

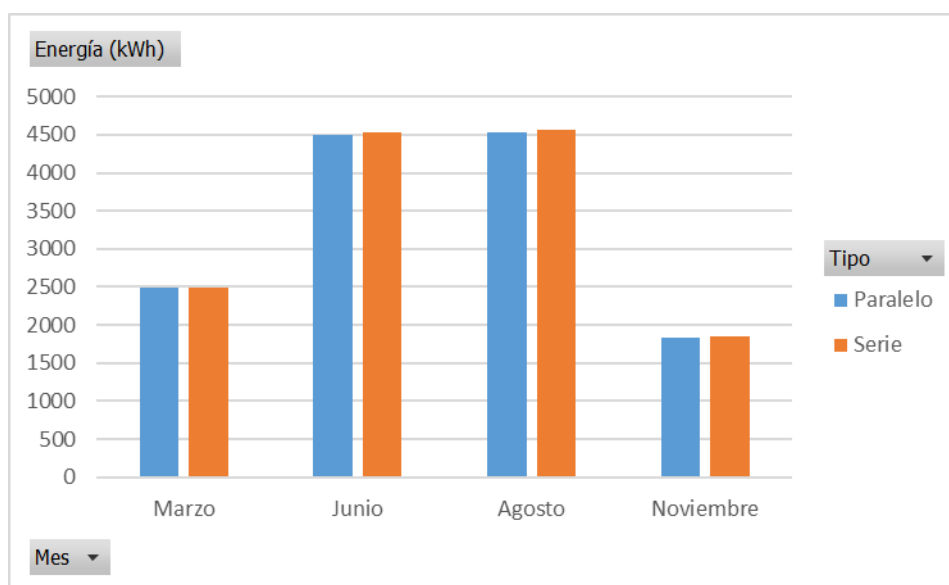


Figura 5-24 Gráfica energía generada para 50°C

El calor generado en los meses de marzo y noviembre se emplea íntegramente en el intercambiador de calor ya que el aerodisipador no llega a ponerse en marcha. Esto ocurre porque la temperatura que alcanza el depósito no es suficiente como para tener que activar el aerodisipador.

Temperatura de 50°C				
Mes	Tipo	Intercambiador de calor	Disipador	Energía total (kWh)
Marzo	Serie	2493,33	0,00	2493,33
Marzo	Paralelo	2483,06	0,00	2483,06
Junio	Serie	3808,72	716,10	4524,82
Junio	Paralelo	3811,20	682,49	4493,69
Agosto	Serie	3824,07	737,94	4562,01
Agosto	Paralelo	3823,59	706,95	4530,54
Noviembre	Serie	1848,93	0,00	1848,93
Noviembre	Paralelo	1838,74	0,00	1838,74

Tabla 5-8 Datos energía generada para 50°C

Para la temperatura de 50°C se puede ver que varía muy poco la suma total de la energía generada, sin embargo se aprecia como el rendimiento para una temperatura máxima del depósito de 50°C es ligeramente mayor en los meses de verano mientras que en los meses de invierno es la temperatura máxima de 40°C con la que se obtienen mejores rendimientos.

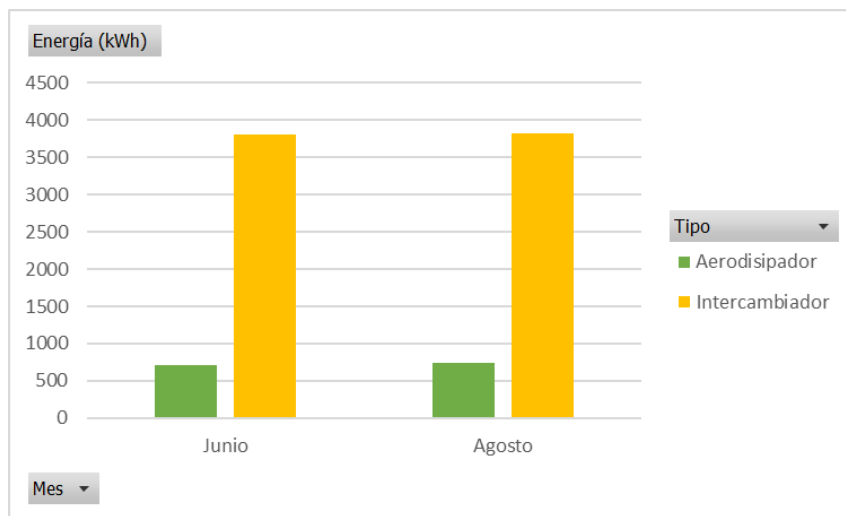


Figura 5-25 Balance energía obtenida 50°C

En la gráfica anterior se refleja como la diferencia de calor que genera el intercambiador es bastante mayor que la generada por el aerodisipador. En esto se diferencia de la gráfica obtenida para la temperatura máxima del tanque de 40°C.

Esta diferencia mayor se debe a que al permitir que el tanque tenga una temperatura más elevada, no será necesario emplear el aerodisipador.

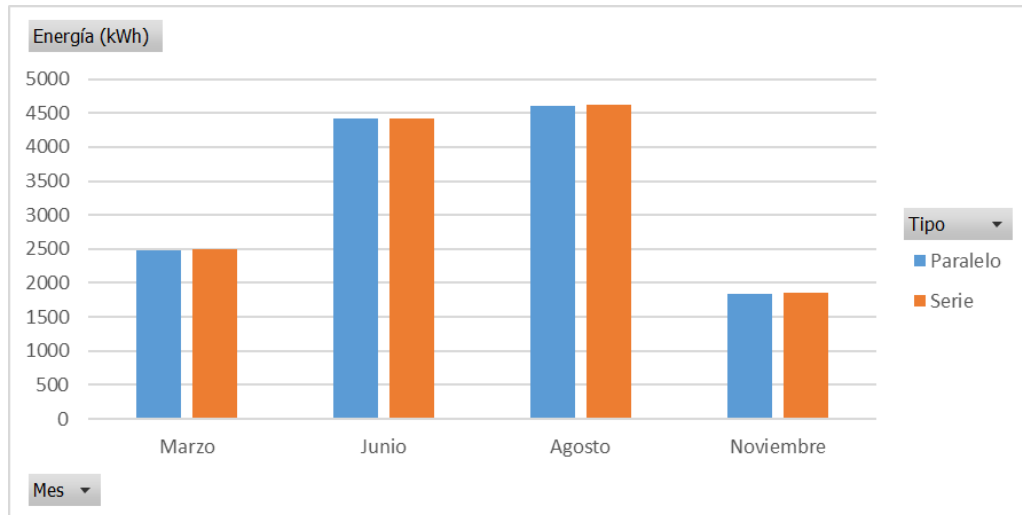


Figura 5-26 Gráfica energía generada para 60°C

Temperatura de 60°C					
Mes	Tipo	Intercambiador de calor	Disipador	Energía total (kWh)	
Marzo	Serie	2497,15	0,00	2497,15	
Marzo	Paralelo	2486,86	0,00	2486,86	
Junio	Serie	4424,32	15,92	4440,24	
Junio	Paralelo	4409,67	13,88	4423,54	
Agosto	Serie	4613,21	4,06	4617,27	
Agosto	Paralelo	4597,91	0,00	4597,91	
Noviembre	Serie	1848,93	0,00	1848,93	
Noviembre	Paralelo	1838,74	0,00	1838,74	

Tabla 5-9 Datos energía generada para 60°C

Los resultados que se obtienen en la gráfica obtenida para una temperatura máxima de 60°C, son muy parecidos al de las gráficas anteriores. La principal diferencia es que el aerodisipador se pone en marcha durante muy poco tiempo generando una energía que es insignificante comparada con la que genera el intercambiador de calor.

Una vez realizadas las simulaciones para las diferentes temperaturas de consigna, se puede concluir que a medida que aumenta la temperatura de acumulación, las diferencias entre la distribución en serie y paralelo se hacen menores.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Una vez realizada la simulación del colector solar de tubos de vacío en el programa TRNSYS, se van a exponer las conclusiones a las que se ha llegado en este trabajo de fin de grado.

Como primera conclusión, se puede afirmar que se ha cumplido el objetivo de realizar la simulación de una instalación de colectores con tubos de vacío. También se ha cumplido con el objetivo de configurar la posibilidad de que los colectores puedan estar en serie o en paralelo, así como ver los efectos que se obtienen variando las temperaturas de consigna del tanque y los caudales de la bomba debido a las actuaciones realizadas sobre dicha instalación.

Se ha comprobado como el rendimiento de los colectores aumenta para caudales de la bomba mayores y también se obtienen rendimientos mayores cuando la temperatura de consigna establecida en el depósito es menor.

En los resultados obtenidos se ha podido comprobar como en meses donde la radiación que incide es menor como son los meses de marzo y noviembre, la distribución de los colectores en serie solo sería más eficiente que la distribución de los colectores en paralelo para una temperatura de consigna del tanque de 40°C.

Por otro lado, en los meses de verano donde la radiación es mayor, la distribución en serie sería más eficiente que la distribución en paralelo para temperaturas de consigna de 40 y 50°C.

En los resultados de la simulación con distintos caudales se observa como para un día de verano la distribución en serie va a ser más eficiente para los caudales de 100 y 200 kg/hr. En un día de invierno y caudal de 100 kg/hr será mas eficiente la distribución de los colectores en serie. Sin embargo, para un caudal de 200 kg/hr en este mismo día es más eficiente colocar los colectores en serie.

También se ha podido comprobar como la instalación simulada funciona de la misma forma que la instalación real iniciándose la bomba cuando la diferencia de temperaturas entre el colector y el depósito es la establecida. Otro componente que es muy importante para mantener la temperatura de consigna en el tanque como es el aerodisipador, se ha comprobado que se activa cuando se supera esta temperatura en el tanque.

Otra conclusión ha sido que el calor que el intercambiador cede al depósito aumenta en los meses de verano siendo menor en los meses de invierno. También se ha comprobado como el total del calor que puede ser aprovechado, varía el lugar de donde se puede aprovechar. Para temperaturas de consigna más bajas, habrá más calor disponible para aprovechar en el aerodisipador. Para temperaturas de consigna altas, dado que el tanque no alcanza grandes temperaturas, se ha comprobado que del aerodisipador no disipa mucha energía.

6.2 Líneas futuras

Después de haber analizado este TFG, hay algunos aspectos que se pueden tener en cuenta para futuros proyectos:

- Comparar los rendimientos entre colectores de placa plana y tubos de vacío en la instalación.
- Realizar un análisis en profundidad sobre los datos que se obtienen con la simulación y los datos experimentales.
- Otra mejora sería tener en cuenta las pérdidas que se dan en la instalación con el fin de obtener datos más precisos.
- Para mantener la temperatura deseada en el acumulador dado que con la energía absorbida por el colector no es suficiente se pueden incorporar una caldera de apoyo o una resistencia eléctrica.
- Podrían estudiarse también diferentes tipos de intercambiadores de calor que se sitúan inmersos en el depósito y estudiar con cual se cede más calor al fluido del depósito.
- Otros aspectos que se podría considerar serían cómo influye el rendimiento en los colectores en función de la inclinación y orientación.
- Variar la diferencia de temperaturas de activación de la bomba con el fin de encontrar la combinación más eficiente para la instalación.
- Estudios con diferentes fluidos caloportadores.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acciona, [En línea]. Available: <https://www.acciona.com/es/energias-renovables/>. [Último acceso: 16 Enero 2021].
- [2] Energya VM, [En línea]. Available: <https://www.energyavm.es/importante-la-energia-renovable/>. [Último acceso: 16 Enero 2021].
- [3] Factor energía, [En línea]. Available: <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>. [Último acceso: 17 Enero 2021].
- [4] IDEAM, [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>. [Último acceso: 19 Enero 2021].
- [5] Energía Solar, [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/que-es-energia-solar/radiacion-solar>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [6] J.C. González, « Tesis de postgrado, Dpto. de Física. U. Nal. Análisis de cubiertas transparentes y de superficies selectivas para colectores solares,» 1981.
- [7] Appa, [En línea]. Available: <https://www.appa.es/la-energia-en-espana/>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [8] La Moncloa, [En línea]. Available: <https://www.lamoncloa.gob.es/consejodeministros/Paginas/enlaces/>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [9] IDAE, [En línea]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/solar-fotovoltaica>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [10] Inega, [En línea]. Available: http://www.inega.gal/enerxiagalicia/balance_enerxetico_galicia/. [Último acceso: 21 Enero 2021].
- [11] Semantic scholar, [En línea]. Available: Semantic scholar <https://www.semanticscholar.org/paper/Dise%C3%B1o-de-dos-bancos-de-prueba-para-colectores-de-Acosta-Abril/>. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [12] Síliter, «Síliter: energías renovables,» [En línea]. Available: <https://www.siliter.com/producto/colectores-solares-tubos-de-vacio-energia-solar-termica/>. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [13] Sitio solar, [En línea]. Available: <http://www.sitiosolar.com/los-colectores-solares-de-tubo-de-vacio/>. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [14] Suelo solar, [En línea]. Available: https://suelosolar.com/guiasolares/colectores_solares.asp. [Último acceso: 23 Enero 2021].
- [15] Mimir solar, [En línea]. Available: <https://mimirsolar.es/tubos-de-vacio/>. [Último acceso: 23 Enero 2021].

- [16] C. J. P. Prieto, «Evaluación de un sistema de energía solar térmica basado en colectores de tubo de vacío para suministro de agua a alta temperatura,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2015.
- [17] Refrinoticias, [En línea]. Available: <https://refrinoticias.com/los-captadores-solares-con-tubos-de-vacio/>. [Último acceso: 24 Enero 2021].
- [18] UNE, [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/comites-tecnicos-de-normalizacion/comite?c=CTN%2094>. [Último acceso: 24 Enero 2021].
- [19] C. P. S. Madrona, *Análisis de herramientas de simulación para la integración de la energía solar térmica en procesos industriales*, Sevilla: Escuela técnica superior de ingeniería. Universidad de Sevilla, 2017.
- [20] Google Earth, [En línea]. Available: <https://earth.google.com/web/>. [Último acceso: 27 Enero 2021].
- [21] Resol.de, [En línea]. Available: https://www.resol.de/Produktdokumente/Alte_Montageanleitungen/48002731_WMZ.mones.pdf. [Último acceso: 27 Enero 2021].
- [22] S. Escoda. [En línea]. Available: <https://www.acae.es/catalogos/salvador-escoda/fiebdc/ficha-manual-SO04302-303-311-312-313.pdf>.
- [23] Mecalia, [En línea]. Available: http://www.mecalia.com/wp-content/uploads/2019/02/DPI_I_ES2.pdf. [Último acceso: 30 Enero 2021].
- [24] Calor y frio, [En línea]. Available: <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/energia-solar/el-vaso-de-expansion-en-instalaciones-de-energia-solar-termica.html>. [Último acceso: 30 Enero 2021].
- [25] Acae, [En línea]. Available: https://www.acae.es/BD/-1X93/EM/EM20/SALVADOR-ESCODA/SALVADOR-ESCODA/REN____SES/REN____SES1/EQCFP____SES1/PSESSO14251/. [Último acceso: 4 Febrero 2021].
- [26] Resol, [En línea]. Available: https://www.resol.de/Produktdokumente/11204295_DeltaSol_CS4.mones.pdf. [Último acceso: 4 Febrero 2021].