

Proyecto Fin de Máster Ingeniería Industrial

Estudios y análisis requeridos para el incremento de TRL de la solución falling film integrada en edificios residenciales.

Autor: José Cano Barrios

Tutor: José Sánchez Ramos

**Dpto. Ingeniería Energética
Grupo Termotecnia
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Industrial

**Estudios y análisis requeridos para el incremento de
TRL de la solución falling film integrada en
edificios residenciales.**

Autor:

José Cano Barrios

Tutor:

José Sánchez Ramos

Profesor titular

Dpto. Ingeniería Energética
Grupo Termotecnia
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Estudios y análisis requeridos para el incremento de TRL de la solución falling film integrada en edificios residenciales.

Autor: José Cano Barrios

Tutor: José Sánchez Ramos

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Ha sido un camino duro pero gratificante y bonito, me gustaría expresar mi agradecimiento a todo aquel que me ha ayudado y apoyado en el máster de ingeniería en general, y en este trabajo en particular:

A mi familia, por no cuestionar mis decisiones y por su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros de clase, sin los cuales hubiera sido imposible superar el máster.

A mis profesores, que me han transmitido conocimientos de calidad y me han guiado en este recorrido.

Resumen

La refrigeración de viviendas en climas cálidos es un tema importante debido al aumento de las temperaturas en el mundo. Aunque los sistemas de aire acondicionado convencionales son muy utilizados, se ha demostrado que el uso de técnicas de refrigeración natural puede disminuir el consumo de energía. Sin embargo, su implementación en la construcción de viviendas sigue siendo bastante limitada debido a la desinformación sobre estas técnicas, las pocas opciones de implementación actuales y los altos costes al no estar extendidas.

La demanda global de refrigeración está creciendo a un ritmo mucho mayor que la reducción correspondiente en la necesidad de calefacción. El aumento de las temperaturas ambientales y los eventos climáticos extremos, combinados con la baja calidad de las viviendas de bajos ingresos y la falta de apoyo y ahorro, hacen que las personas en riesgo de pobreza energética sean más vulnerables y corran un mayor riesgo de sufrir problemas de salud.

Recientes estudios han demostrado que, debido al aumento previsto de las temperaturas en el futuro, la demanda mundial de energía para refrigeración en el sector residencial aumentará hasta un 34 % en 2050 y un 61 % en 2100. Esta última cifra se incrementa aún más en los estudios enfocados en la región mediterránea. Esta situación hace necesaria la implementación y el uso de técnicas de enfriamiento natural que reduzcan el consumo de energía, protejan el medio ambiente y el ecosistema, y proporcionen un nivel adecuado de confort a los residentes.

La falta de técnicas de refrigeración natural hace que en la actualidad haya numerosas investigaciones en curso de toda índole y en los diferentes campos de la ingeniería y la edificación.

El grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla propone en este campo diferentes líneas de investigación donde se estudian varios sistemas y técnicas. En concreto, existe una línea donde se estudia la disminución de temperatura de agua como fluido portador a través de la radiación de la noche. Artículos publicados como “Lámina descendente como técnica de refrigeración natural” y “Utilización del cielo como disipador de calor” hablan sobre esta línea de investigación.

A partir de estas investigaciones se han llevado a cabo proyectos reales con la participación de la Universidad de Sevilla. Estos proyectos se tratan de CartujaQanat y WaterLife, dos proyectos donde se ponen en práctica, entre otras técnicas, las relacionadas con la línea de investigación mencionada.

En este marco actual se encaja este trabajo, con la finalidad de estudiar y comparar los dos proyectos, e intentar extrapolar la información suficiente para proponer una solución residencial del “sistema de lámina descendente como refrigeración natural” que sea viable e implementable.

Abstract

Cooling of homes in hot climates is an important issue due to rising temperatures around the world. Although conventional air conditioning systems are widely used, it has been shown that the use of natural cooling techniques can decrease energy consumption. However, their implementation in residential construction is still quite limited due to misinformation about these techniques, few current implementation options, and high costs because they are not widespread.

Global demand for cooling is growing at a much faster rate than the corresponding reduction in the need for heating. Rising ambient temperatures and extreme weather events, combined with the poor quality of low-income housing and lack of support and savings, make people at risk of fuel poverty more vulnerable and at greater risk of health problems.

Recent studies have shown that, due to the expected increase in temperatures in the future, the global energy demand for cooling in the residential sector will increase by up to 34% in 2050 and 61% in 2100. The latter figure is further increased in studies focused on the Mediterranean region. This situation calls for the implementation and use of natural cooling techniques that reduce energy consumption, protect the environment and the ecosystem, and provide an adequate level of comfort to residents.

The lack of natural cooling techniques means that there is currently a lot of ongoing research of all kinds and in different fields of engineering and building.

The Thermotechnology group of the University of Seville proposes in this field different lines of research where several systems and techniques are studied. In particular, there is a line where the temperature decrease of water as a carrier fluid through night radiation is studied. Published articles such as "Descending sheet as a natural cooling technique" and "Use of the sky as a heat sink" talk about this line of research.

Based on this research, real projects have been carried out with the participation of the University of Seville. These projects are CartujaQanat and WaterLife, two projects where, among other techniques, those related to the aforementioned line of research are put into practice.

This work fits into this current framework, with the purpose of studying and comparing the two projects, and trying to extrapolate enough information to propose a residential solution of the "falling sheet system as natural cooling" that is feasible and implementable.

| | |
|--|-------------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | x |
| Abstract | xii |
| Índice | xiii |
| Índice de Tablas | xv |
| Índice de Figuras | xvii |
| Notación | xx |
| 1 Introducción | 1 |
| 1.1 <i>Refrigeración natural</i> | 1 |
| 1.2 <i>Sistema de refrigeración por radiación</i> | 1 |
| 1.3 <i>Necesidad de hibridar electricidad y producción de frío</i> | 2 |
| 1.4 <i>Tecnologías existentes</i> | 4 |
| 1.4.1 <i>Cartuja Qanat</i> | 4 |
| 1.4.2 <i>WaterCool</i> | 5 |
| 1.5 <i>Conclusiones</i> | 7 |
| 2 Hibridación sistema fv y refrigeración | 8 |
| 2.1 <i>Concepto</i> | 8 |
| 2.2 <i>Desarrollo tecnológico</i> | 9 |
| 2.2.1 <i>Cartuja Qanat</i> | 9 |
| 2.2.2 <i>Water Cool</i> | 16 |
| 2.3 <i>Propuesta tecnológica</i> | 21 |
| 2.3.1 <i>Antecedentes y síntesis de los proyectos de partida</i> | 21 |
| 2.3.2 <i>Definición de la propuesta</i> | 24 |
| 2.3.3 <i>Datos de partida</i> | 24 |
| 2.3.4 <i>Solución ensamblada</i> | 24 |
| 2.3.5 <i>Valoración económica: Presupuesto de Ejecución Material</i> | 33 |
| 2.4 <i>Conclusiones</i> | 37 |
| 3 Implantación de la propuesta tecnológica | 39 |
| 3.1 <i>Datos de partida</i> | 39 |
| 3.2 <i>Modelo de producción de frío</i> | 43 |
| 3.2.1 <i>Base teórica de cálculo</i> | 43 |
| 3.2.2 <i>Análisis del modelo de producción de frío</i> | 46 |
| 3.3 <i>Modelo de producción de energía fotovoltaica</i> | 52 |
| 3.3.1 <i>Simulación de la producción de energía</i> | 52 |
| 3.4 <i>Estudio del sistema híbrido</i> | 58 |
| 3.4.1 <i>Datos</i> | 58 |
| 3.4.2 <i>Base de cálculo del modelo</i> | 58 |
| 3.4.3 <i>Casos de estudio</i> | 59 |
| 3.4.4 <i>Comparativa de los casos</i> | 64 |
| 3.4.5 <i>Estudio de la viabilidad de añadir baterías</i> | 65 |

| | | |
|-----|---------------------|----|
| 3.5 | <i>Conclusiones</i> | 68 |
| 4 | Conclusiones | 69 |
| | Referencias | 70 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Presupuesto de la instalación | 36 |
| Tabla 2. Consumos medios mensuales vivienda tipo | 40 |
| Tabla 3. Consideraciones del sistema falling-film | 41 |
| Tabla 4. Coeficientes de estudio falling-film | 43 |
| Tabla 5. Producción falling-film depósito 5 m ³ | 49 |
| Tabla 6. Producción falling-film depósito 10 m ³ | 50 |
| Tabla 7. Producción falling-film depósito 2,5 m ³ | 51 |
| Tabla 8. Comparativa de producción de frío con diferente volumen de depósito | 51 |
| Tabla 9. Radiación media | 54 |
| Tabla 10. Resumen de consumos | 59 |
| Tabla 11. Precios tarifa eléctrica tipo | 60 |
| Tabla 12. Estudio eléctrico falling-film y generación fv | 60 |
| Tabla 13. Estudio económico falling-film + sistema fv | 61 |
| Tabla 14. Estudio eléctrico SIN falling-film y generación fv | 62 |
| Tabla 15. . Estudio económico SIN falling-film + sistema fv | 63 |
| Tabla 16. Resumen comparativo casos de estudio | 64 |
| Tabla 17. Excedente fotovoltaico para almacenaje de baterías | 65 |
| Tabla 18. Comparativa de consumos con baterías | 66 |
| Tabla 19. Estudio económico con baterías en el sistema falling film | 67 |
| Tabla 20. Comparativa económica con baterías | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. A la izquierda sistema sin contacto con el aire, a la derecha sistema falling Film con contacto directo con el aire [2] | 2 |
| Figura 2. Estimación de necesidades de refrigeración en Europa [kWh/m ² año] [3] | 2 |
| Figura 3. Reparto de la producción fotovoltaica durante un día | 3 |
| Figura 4. Disposición de panel con falling-film | 6 |
| Figura 5. Esquema del sistema | 9 |
| Figura 6. Esquema de funcionamiento Cartuja Qanat | 10 |
| Figura 7. Plano de planta módulos fotovoltaico Cartuja Qanat | 11 |
| Figura 8. Almacenaje de agua en los "Qanats" | 12 |
| Figura 9. Corte transversal "Qanats" | 13 |
| Figura 10. Elementos de control Cartuja Qanat | 14 |
| Figura 11. Instalaciones de proyecto WaterCool | 16 |
| Figura 12. Sistema hidráulico Water Cool | 17 |
| Figura 13. Plano de planta panel fotovoltaico proyecto WaterCool | 18 |
| Figura 14. Sistema de tuberías proyecto Water Cool | 19 |
| Figura 15. Sistema de control. Proyecto Water Cool | 19 |
| Figura 16. Esquema de funcionamiento. Modo Noche | 22 |
| Figura 17. Esquema de funcionamiento. Modo Día | 22 |
| Figura 18. Válvula de corte | 25 |
| Figura 19. Depósito enterrado | 25 |
| Figura 20. Bomba de impulsión | 26 |
| Figura 21. Curva de funcionamiento bomba | 26 |
| Figura 22. Arqueta de desbaste | 27 |
| Figura 23. Esquema funcional sistema fotovoltaico | 27 |
| Figura 24. Estructura para paneles fotovoltaicos | 28 |
| Figura 25. Disposición de los módulos fotovoltaicos | 28 |
| Figura 26. Inversor de red | 29 |
| Figura 27. Sistema de medición de energía | 29 |
| Figura 28. Boquillas rociadoras | 30 |
| Figura 29. Esquema de módulo fotovoltaico | 31 |
| Figura 30. Filtro de arena | 31 |
| Figura 31. Unidad de Tratamiento de Aire | 32 |
| Figura 32. Zonas climáticas | 39 |
| Figura 33. Consumos medios mensuales vivienda tipo | 40 |
| Figura 34. Consumo horarios de un día tipo y por meses | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 35. Funcionamiento sistema falling-film en el módulo fotovoltaico | 44 |
| Figura 36. Evolución de temperaturas del cielo | 46 |
| Figura 37. Evolución temperaturas de bulbo húmedo | 47 |
| Figura 38. Evolución temperaturas exterior seca | 47 |
| Figura 39. Evolución temperaturas de depósito (5 m3) | 48 |
| Figura 40. Demanda de producción de frío de la vivienda VS producción de frío sistema falling-film (5 m3) | 48 |
| Figura 41. Evolución temperaturas de depósito (10 m3) | 49 |
| Figura 42. Demanda de producción de frío de la vivienda VS producción de frío sistema falling-film (5 m3) | 49 |
| Figura 43. Evolución temperaturas de depósito (2,5 m3) | 50 |
| Figura 44. Demanda de producción de frío de la vivienda VS producción de frío sistema falling-film (2,5 m3) | 50 |
| Figura 45. Introducción de datos de radiación | 53 |
| Figura 46. Análisis de consumo con 10 módulos. | 55 |
| Figura 47. Horarios tarifas eléctricas | 56 |
| Figura 48. Producción fotovoltaica mensual | 56 |
| Figura 49. Consumo mensual | 56 |
| Figura 50. Baterías de litio | 66 |

Notación

| | |
|--------|-------------------------------|
| UTA | Unidad de Tratamiento de Aire |
| PV | Fotovoltaica |
| NCT | Natural Cooling Techniques |
| W | Wattios |
| e.o.c. | En cualquier otro caso |

1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se hará un resumen general del momento actual tecnológico o estado del arte donde se enmarca la refrigeración natural de viviendas y se creará el preámbulo adecuado para dar comienzo al estudio de la solución concreta propuesta.

Son muchas las técnicas aportadas por el ser humano en búsqueda del aislamiento térmico desde el comienzo de los tiempos. Desde encender un fuego para aumentar la temperatura interior con su conveniente salida de humos, hasta el revestimiento de color blanco en las fachadas para reflejar lo máximo posible el sol.

1.1 Refrigeración natural

En la refrigeración natural existe un recurso natural y renovable que se encarga de disipar el calor ambiental. El diseño consciente de las viviendas debe estar orientado al uso de dichos recursos naturales para mantener las condiciones de confort requeridas con el mínimo consumo de energía.

Las técnicas de enfriamiento natural se suelen caracterizar por el uso de agua o aire como fluido de transferencia de calor. El agua, en concreto, tiene mejor rendimiento de transferencia y es por ello por lo que el desarrollo de este trabajo se centrará en su uso.

Dicha agua, necesaria para el sistema de refrigeración natural, se puede obtener de diversas formas: del subsuelo, con sistemas de refrigeración evaporativa y mediante la técnica de refrigeración agua-aire mediante un “panel de radiación” y el cielo como fuente natural disipador del calor.

El cielo tiene un gran potencial disipador de calor, reportado en numerosos estudios teóricos y experimentales previos.

La solución adoptada, foco de este trabajo, se basa en el enfriamiento de agua a partir de la superficie de un panel fotovoltaico con el fin de utilizar el cielo como disipador de calor ambiente.

1.2 Sistema de refrigeración por radiación

Se define NCT como “técnicas naturales de refrigeración” (del inglés Natural Cooling Techniques”. Como su nombre indica, estas técnicas se basan en el uso de algún recurso natural como puede ser el aire, agua o el propio cielo para refrigerar de manera natural.

Este último recurso, el cielo, es el seleccionado por los autores de los artículos de investigación en los que se basa este trabajo como vector para transferir calor. Se considera que el cielo es un sumidero de calor natural con un alto potencial de enfriamiento, el objeto de la investigación realizada aquí fue el enfriamiento por radiación nocturna.

El enfriamiento por radiación nocturna es un proceso natural en el que un objeto o superficie emite radiación infrarroja hacia el espacio exterior en forma de ondas electromagnéticas, lo que provoca que disminuya su temperatura.

Más concretamente, la esencia de este trabajo esta basado en la investigación por parte del Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla y que dan autoría al artículo posteriormente mencionado “Falling-film as natural cooling technique: Modelling and energy impact assessment”.

La base de esta investigación es la adición de la evaporación al sistema de refrigeración por radiación y convección.

La radiación y convección son los métodos ya utilizados para la transferencia de calor en otros sistemas por radiación ya investigados. En cambio, este sistema incluye la evaporación al estar en contacto directo el agua con el aire.

Esto hace que el sistema de disipación de calor tenga un aumento de potencia de enfriamiento mayor que otros sistemas anteriormente estudiados.

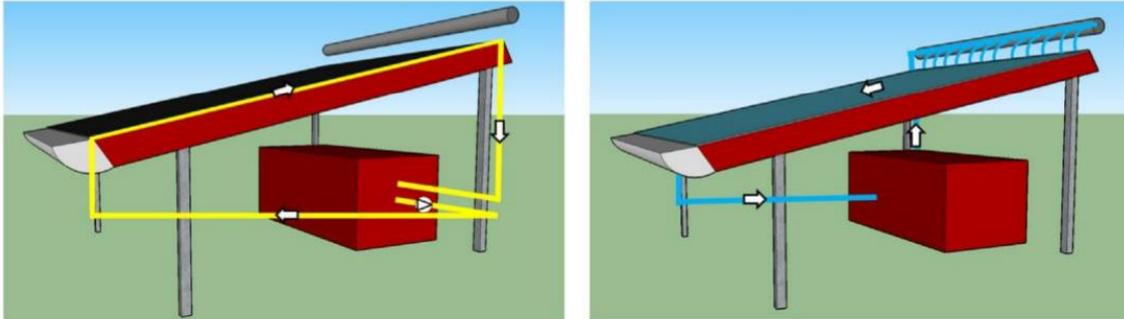


Figura 1. A la izquierda sistema sin contacto con el aire, a la derecha sistema falling Film con contacto directo con el aire [2]

1.3 Necesidad de hibridar electricidad y producción de frío

Como se comentaba en el punto inicial del trabajo, las necesidades energéticas debido al aumento de temperatura global se verán incrementadas en los próximos años.

Como se comentaba en el punto inicial del trabajo, las necesidades energéticas debido al aumento de temperatura global se verán incrementadas en los próximos años.

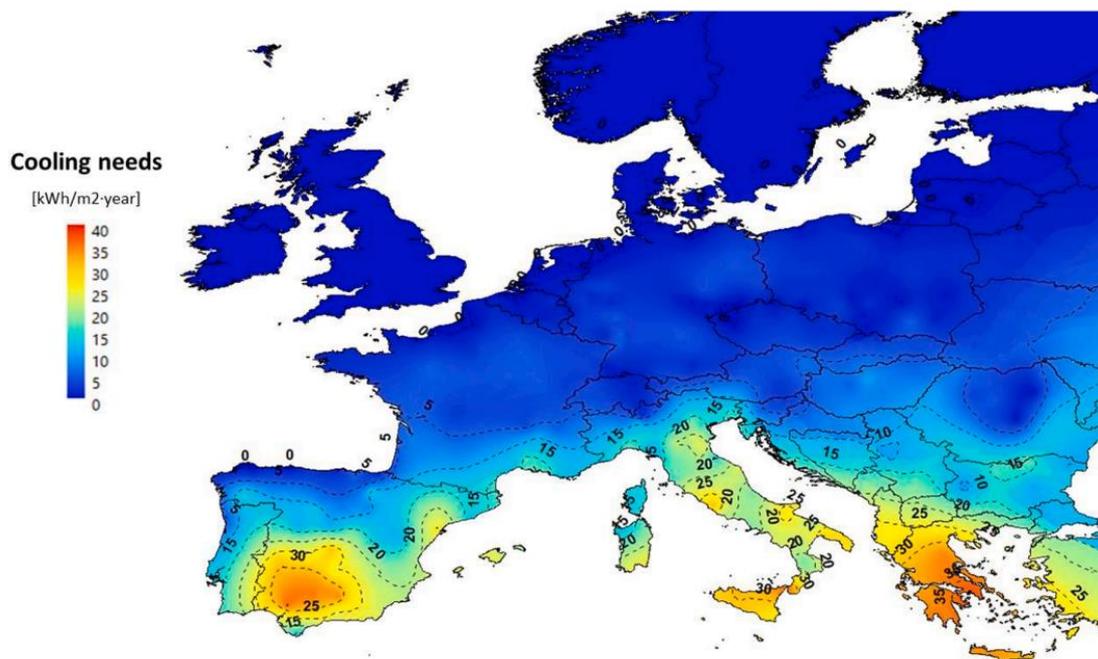


Figura 2. Estimación de necesidades de refrigeración en Europa [kWh/m² año] [3]

Esto sumado al aumento y desarrollo de la “electrificación” en los países desarrollados, hace que sea necesario pensar en nuevas formas de aunar la producción eléctrica sostenible y la producción de frío.

El desarrollo actual se dirige a una producción eléctrica deslocalizada y de autoconsumo, como se viene comprobando con el aumento de las numerosas instalaciones fotovoltaicas para consumo propio. Parece ser el modelo más lógico: se ahorra en el transporte de la electricidad, y se aumenta su eficiencia al consumirse “in situ”.

La introducción de nuevos equipos de consumo eléctrico como puede ser la proliferación del coche eléctrico hace que las necesidades eléctricas en viviendas unifamiliares vayan en aumento.

Por otro lado, si se consigue disminuir la cantidad de energía que se destina a la producción de frío, se consigue aumentar la eficiencia por partida doble: mayor energía eléctrica para otros consumos, y aprovechamientos de la instalación fotovoltaica para la producción de frío (sistema de radiación).

Hay que tener en cuenta que cuando la demanda de producción de frío será mayor será en las horas centrales del día, que coincide con la mayor producción eléctrica de un sistema fotovoltaico.

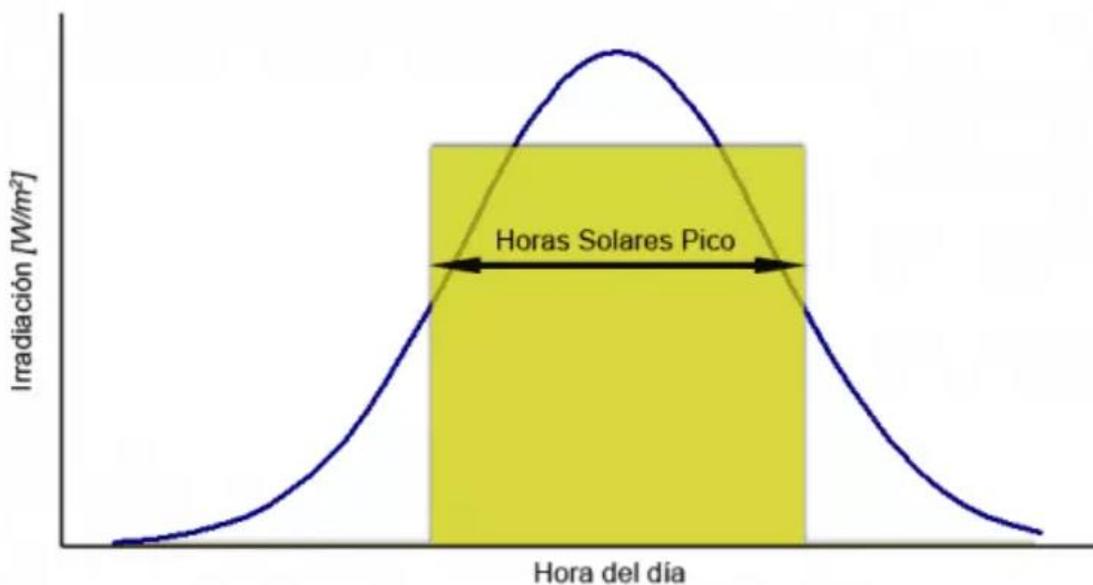


Figura 3. Reparto de la producción fotovoltaica durante un día

De igual modo, por épocas del año, la producción de frío vendrá asociada a los meses de mayor producción fotovoltaica.

Esto hace que el sistema fotovoltaico sea el ideal para hibridar un sistema de producción de frío como es el sistema propuesto por radiación. Cuando no sea suficiente con el sistema de radiación, se puede apoyar en algún sistema de refrigeración eléctrico que sea alimentado directamente por el sistema de generación eléctrica fotovoltaica (bomba de calor).

Esta hibridación tiene otras ventajas como se podrá ver posteriormente, entre otras, la limpieza de los paneles fotovoltaicos al activar el sistema de radiación nocturno.

En términos de rendimiento, se puede decir que el factor de uso de la cubierta es total, durante el día, para producir electricidad con los paneles fotovoltaicos, y durante la noche, para refrigerar el agua que se utilizará al día siguiente para refrigerar la vivienda.

Esto sumado al aumento y desarrollo de la “electrificación” en los países desarrollados, hace que sea necesario pensar en nuevas formas de aunar la producción eléctrica sostenible y la producción de frío.

1.4 Tecnologías existentes

Como se ha comentado al inicio del documento, este trabajo está basado en las investigaciones desarrollada por el grupo de termotecnia de la Escuela Superior de Ingeniera de Sevilla (Universidad de Sevilla).

De dicho desarrollo surgen dos proyectos reales donde se implanta, entre otras tecnologías, el sistema de enfriamiento de agua almacenada en el subsuelo mediante la evaporación con el aire y la radiación nocturna (Sistema de disipación de lámina descendente sobre paneles fotovoltaicos).

Se procede a realizar un resumen de cada uno de los dos proyectos.

1.4.1 Cartuja Qanat

Se trata de un proyecto ubicado en la isla de la Cartuja, en Sevilla, con objetivo principal de fomentar las nuevas tecnologías para el desarrollo de la mejora bioclimática en entornos urbanos.

En este proyecto se describe la solución propuesta para acelerar la transformación urbana, inspirándose en el uso de la urbe como dinamizador social, mejorándola, e involucrando en esa transformación a usuarios públicos, privados, así como a los propios ciudadanos en un revolucionario Sistema de Gobernanza, basada en la adopción de nuevas soluciones para la mejora microclimática: sistemas de enfriamiento de aire y agua, nuevo espacio de estancia semiconfinado acondicionado para albergar diversas actividades (zoco) y el anfiteatro bioclimático.

El proyecto alberga un conjunto de rehabilitaciones de estructuras existentes (Expo 92) y nuevas obras que le dan un valor y dimensión importante como avance tecnológico y propuesta de valor para la ciudad de Sevilla.

Entre otras instalaciones, las más interesantes de cara a este trabajo son las siguientes:

- **Construcción de qanats.** Un qanat es una instalación concebida para el enfriamiento del aire mediante su paso a través del interior de unos conductos dispuestos dentro de un volumen de agua a baja temperatura alojado en una estructura de hormigón (marco) que se instala bajo rasante. Por debajo de este marco también se disponen una serie de conductos enterrados. Tanto los conductos enterrados como los sumergidos son de material plástico. Se proyectan un total de dos qanats contiguos a las fachadas este y oeste del zoco, con una longitud de 40 m cada uno de ellos.

- **Sistema híbrido de enfriamiento/calentamiento de aire para acondicionamiento del zoco en invierno y verano y del anfiteatro en verano.** En este sistema interviene el propio zoco, con las especiales características de su configuración en planta y en alzado, así como de las barreras laterales de su perímetro y la propia cubierta, los qanats, también de nueva construcción, y el acueducto existente que es rehabilitado y dotado de un sistema para la disipación nocturna de energía para el enfriamiento de agua de los qanats mediante boquillas pulverizadoras. Igualmente, se ha provisto al sistema de otro método de disipación nocturna consiste en la generación de una película descendente de agua sobre los paneles solares a instalar en la cubierta del zoco. Como complemento, se instala una bomba de calor aire/agua, que completa el sistema de enfriamiento/calentamiento de agua de los qanats. Por último, el zoco estará dotado de un sistema de distribución y difusión del aire enfriado/calentado mediante impulsión desde el plano inferior. La bomba de calor del zoco da servicio también a la Unidad de Tratamiento de Aire Exterior prevista en el anfiteatro. El anfiteatro, en su zona este correspondiente a las gradas, también estará dotada de un sistema de producción y una red de distribución y difusión del aire enfriado para su acondicionamiento climático.

- **Instalación fotovoltaica.** Esta instalación se conformará mediante la disposición de paneles solares sobre la cubierta del zoco.

- **Instalaciones no bioclimáticas.** Para hacer viable el funcionamiento de las distintas tecnologías climáticas que forman parte del presente proyecto, así como el propio funcionamiento del zoco, edificio

técnico o anfiteatro como espacios destinados a un uso, se hace necesario proyectar una serie de instalaciones adicionales. Se denominan instalaciones no bioclimáticas, al no estar relacionadas de manera directa con las diferentes tecnologías de control climático que forman parte de este proyecto y que constituyen el objeto fundamental del mismo y son las siguientes: saneamiento, fontanería, riego, electricidad, alumbrado y protección contra incendios

- **Sistema de monitorización y control de cada uno de los sistemas que constituyen el proyecto.** Se proyecta este sistema de modo que permita una óptima gestión del conjunto de los sistemas.

Dentro de los sistemas de disipación y enfriamiento encontramos que Cartuja Qanat cuenta con varios:

- Sistema de disipación evaporativo sobre estanque (DIS-1)
- Sistema de disipación evaporativo sobre acueducto (DIS-2)
- **Sistema de disipación de lámina descendente sobre paneles fotovoltaicos de la cubierta del zoco (DIS-3)**
- Sistema de enfriamiento de agua del qanat mediante bomba de calor (SIS-4)
- Sistema de control de la temperatura superficial de la cubierta del zoco mediante TABS no inerciales (SIS-5).
- Sistema de enfriamiento y limpieza por riego sobre la cubierta textil del anfiteatro (SIS-6)
- Sistema de enfriamiento evaporativo para la barrera oeste del zoco (SIS-7)

De entre todos ellos, el trabajo se centrará en el sistema de lámina descendente sobre paneles fotovoltaicos de la cubierta del zoco.

Este sistema se basa en la reducción de la temperatura del agua del sistema (qanat + cántara de recirculación) mediante la disipación térmica que se produce durante el recorrido que realiza el agua proyectada desde una serie de boquillas sobre los paneles fotovoltaicos ubicados en la cubierta del zoco. El agua desciende por los paneles y durante este recorrido se atempera con el ambiente exterior reduciendo su temperatura. El agua vertida sobre los paneles fotovoltaicos se recoge en los canalones de recogida de agua de lluvia de cada uno de los paños de la cubierta del zoco. El agua atemperada / refrigerada retorna por gravedad a la cántara de recirculación (DEP-1).

En caso de lluvia los canales de recogida de los paños de cubierta donde se ubican los paneles fotovoltaicos recibirán el agua de lluvia y a través del sistema de drenaje la conducirá hacia la cántara de recirculación (DEP-1).

Se ha previsto disponer en la red enterrada de drenajes de una arqueta dotada de válvulas de corte motorizadas que permita, en los casos que sea necesario, verter el agua de lluvia a la red de saneamiento.

En el capítulo 2, se entrará en detalle de las soluciones adoptada para el sistema de disipación de lámina descendente sobre paneles fotovoltaicos para su estudio y comparación con la otra solución real implementada (WaterCool).

1.4.2 WaterCool

El proyecto WATERCOOL tiene como objetivo general acelerar la transformación urbana, inspirada en el uso de la ciudad como una dinámica social, mejorándola e involucrando la transformación pública, privada y ciudadana en un sistema de gobierno revolucionario. WATERCOOL construirá un modelo de gobierno y participación pioneros en la mejora del entorno urbano basado en el legado cultural, de manera sostenible, rentable y eficiente y con la participación de todos en la adaptación al cambio climático. El proyecto WATERCOOL tiene como objetivo genérico demostrar la eficiencia de un concepto integrado y sistémico de gestión urbana del agua con efectos de amortiguación relevantes a los eventos estocásticos, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos.

El sistema actual de agua urbana se reforzará con una matriz estructural de elementos para acumular, drenar e interconectar el agua no tratada (proveniente de pluviales y fluviales), para ser testado a pequeña escala (calle).

Se trata de un proyecto real llevado a cabo en un colegio de educación primaria en Sevilla. Lleva asociado varias “acciones” para conseguir su objetivo de mejora de eficiencia energética en edificios de la ciudad.

Dentro de las diferentes instalaciones que contempla el proyecto, se hará hincapié en la que nos interesa y que es homóloga a la del proyecto de Cartuja Qanat pero con ciertas diferencias que se tratarán en el capítulo 2:

Instalaciones de enfriamiento del agua y producción de electricidad.

Para disminuir el consumo de energía eléctrica desde la red de ENDESA, se proyecta un sistema de producción, mediante placas fotovoltaicas que además se utiliza para el enfriamiento del agua de los depósitos durante la noche.

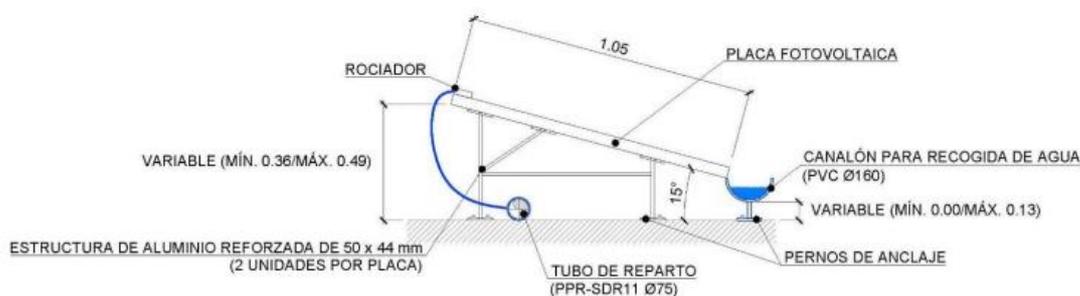


Figura 4. Disposición de panel con falling-film

El volumen bajo la cubierta es donde se prevé el acondicionamiento térmico tanto en modo verano (refrigeración) como en modo invierno (calefacción) mediante la difusión de aire proveniente de los conductos integrados en las gradas o asientos que a modo de efecto barrera laterales que se proyectan rodeando el Parque. Además, se añade una barrera evaporativa sobre una celosía en la región de viento predominante para el pretratamiento de aire exterior

La adaptación bioclimática de estas cuatro estancias utiliza sistemas de enfriamiento de agua mediante disipación nocturna, y sistemas de enfriamiento/calentamiento de agua mediante bomba de calor aire/agua como apoyo para la realización de las diferentes pruebas experimentales. El sistema de disipación nocturna se realiza mediante lámina de agua sobre paneles fotovoltaicos situados en la cubierta del colegio. Estos paneles producen energía eléctrica durante el día equilibrando el consumo del conjunto de los equipos.

Si bien en los apartados siguientes se describen cada una de las instalaciones, se considera necesario describir en primer lugar cuáles son los modos de operación que han sido definidos por la Universidad de Sevilla para el sistema en su conjunto de este proyecto.

Se establece un modo de producción de agua fría/caliente. En el modo de enfriamiento del agua del aljibe entra en juego el sistema de disipación nocturna mediante lámina de agua sobre paneles fotovoltaicos de la cubierta del colegio (DIS 1).

El sistema de disipación nocturna mediante lámina de agua sobre paneles fotovoltaicos de la cubierta del colegio (DIS1) produce energía durante el día. Existe intercambio de energía con la compañía suministradora, salvo los elementos de autoconsumo que se conecten al propio cuadro de producción. Con la cubierta con película descendente se calcula la energía disipada el día de diseño.

El sistema de disipación de lámina descendente sobre la cubierta del colegio (DIS-1) se basa en la reducción de la temperatura del agua del sistema mediante la disipación térmica que se produce durante el recorrido que realiza el agua proyectada por los paneles fotovoltaicos instalados. El agua desciende por los paneles y durante este recorrido se atempera con el ambiente exterior reduciendo su temperatura. El agua vertida sobre los paneles fotovoltaicos se recoge en los canalones de recogida de agua de lluvia de cada uno de los paños de la cubierta

del colegio. El agua atemperada / refrigerada retorna por gravedad al aljibe En caso de lluvia los canales de recogida de los paños de cubierta donde se ubican los paneles fotovoltaicos recibirán el agua de lluvia y a través del sistema de drenaje la conducirá hacia los aljibes, se ha previsto disponer en la red enterrada de drenajes de una arqueta dotada de válvulas de corte motorizadas que permita, en los casos que sea necesario, verter el agua de lluvia a la red de saneamiento.

1.5 Conclusiones

Como se ha podido comprobar a lo largo del capítulo, parecen necesarias y justificadas las líneas de investigación que se dirigen hacia una mejora de la eficiencia energética que consiga reducir el consumo eléctrico destinado al enfriamiento de edificios, y, a la misma vez, mejorar el confort climático en estos.

Como todo proceso novedoso, una vez que quede comprobada su eficacia en proyectos piloto como los mencionados (Cartuja Qanat y WaterCool), sería el paso siguiente el de trasladar la tecnología a viviendas tipo.

En este paso de intentar extrapolar de estos proyectos lo que podría ser mejor técnicamente para una vivienda tipo, se encaja este trabajo.

La finalidad será aunar lo mejor de cada propuesta y sacar conclusiones propias para definir una solución real y viable que permita instalar un sistema de disipación térmica mediante lámina de agua y paneles fotovoltaicos que ayude a la producción de frío en viviendas.

2 HIBRIDACIÓN SISTEMA FV Y REFRIGERACIÓN

En este capítulo se profundizará en la hibridación de sistema de fotovoltaica y producción de frío, apoyándose en primer lugar en los dos proyectos tomados de base, y posteriormente aportando una solución aproximada para implementar la idea en una vivienda unifamiliar.

2.1 Concepto

La idea de hibridar la producción de energía eléctrica mediante fotovoltaica y la producción de frío, tiene como elemento común el panel fotovoltaico.

Como se explicaba en el capítulo 1, la hibridación consiste en aprovechar la superficie de los paneles fotovoltaicos durante la noche para, a través de rociadores, dejar pasar una lámina de agua sobre ellos y conseguir con la radiación de la noche y convección con el contacto del aire, enfriar dicha agua para posteriormente almacenarla en unos depósitos que se encontrarán preferiblemente enterrados.

Con esta agua a una temperatura menor que la ambiente y almacenada en grandes depósitos, se puede realizar intercambios térmicos de diferente tipo como se ha podido recopilar en los dos proyectos tomados de base para este trabajo.

Básicamente se trata de intercambiar energía entre el agua y el aire de la vivienda ya sea mediante UTAs o Fan Coils para enfriar el aire de los diferentes habitáculos (caso de WaterCool), o algo más sofisticado en busca de mayor rendimiento térmico como puede ser enfriar directamente conductos de aire en contacto con el agua, enfriar el terreno, etc. (caso de Cartuja Qanat).

Los paneles trabajan de manera normal durante el día produciendo electricidad, y durante la noche se aprovechan para enfriar el agua, lo que hace que sean sistemas totalmente compatibles y no interfieran entre sí.

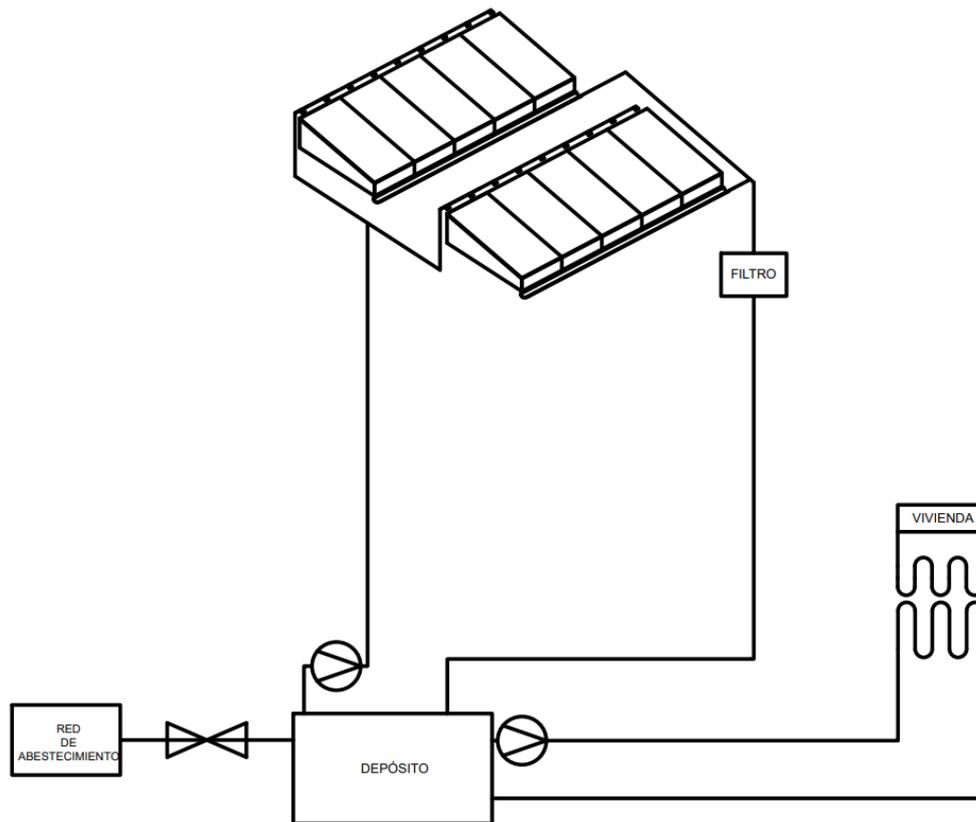


Figura 5. Esquema del sistema

2.2 Desarrollo tecnológico

Para la implementación del concepto se va a tomar como base los dos proyectos ya introducidos en el anterior capítulo: Cartuja Qanat y WaterCool.

Ambos proyectos se enmarcan en la ciudad de Sevilla, por lo que se tomará de base esta premisa para los cálculos correspondientes a la solución aportada en el capítulo 3.

Estos dos proyectos tienen la participación directa de la Universidad de Sevilla, más concretamente del departamento de Termotecnia perteneciente a la Escuela Superior de Ingeniería. En este marco y línea de investigación, se encaja el presente trabajo.

Para el desarrollo de la solución para viviendas unifamiliares (capítulo 3), se estudiará las particularidades propias de cada uno de los dos proyectos, realizando una comparación y aportando, con criterio técnico, lo que puede ser útil para este trabajo.

Hay que entender que cada uno de los proyectos cuenta con diferentes instalaciones y actuaciones de eficiencia energética de diferentes tipos. Para el desarrollo de este trabajo, se pondrá el foco en el sistema de enfriamiento por lámina descendente con sus respectivos equipos y materiales necesarios.

2.2.1 Cartuja Qanat

Se trata de un proyecto de alta complejidad técnica. Cuenta con numerosos sistemas, modos de funcionamiento y espacios bioclimáticos.

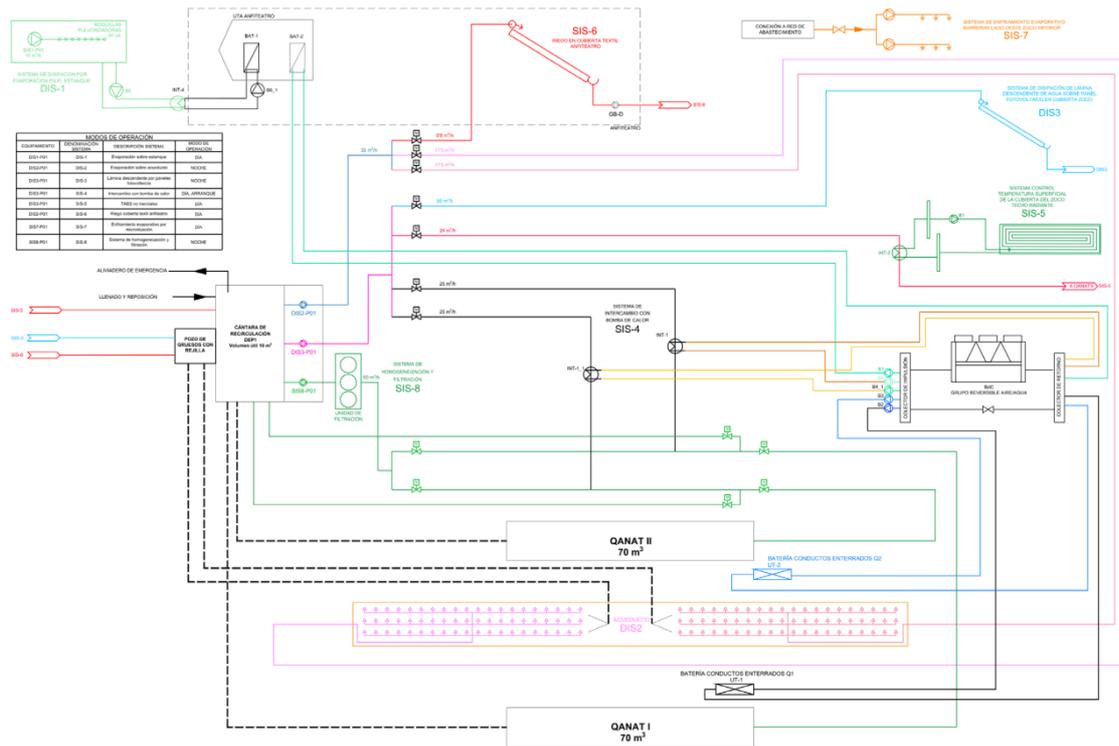


Figura 6. Esquema de funcionamiento Cartuja Qanat

En el caso del Cartuja Qanat se cuenta con los siguientes equipos que intervienen de alguna manera en el sistema de enfriamiento por lámina descendente.

El sistema de disipación de lámina descendente sobre la cubierta del zoco (DIS-3) se basa en la reducción de la temperatura del agua del sistema (qanats + cántara de recirculación) mediante la disipación térmica que se produce durante el recorrido que realiza el agua proyectada por los paneles fotovoltaicos instalados en la cubierta del zoco. El agua desciende por los paneles y durante este recorrido se atempera con el ambiente exterior reduciendo su temperatura.

El agua vertida sobre los paneles fotovoltaicos se recoge en los canalones de recogida de agua de lluvia de cada uno de los paños de la cubierta del zoco. El agua atemperada / refrigerada retorna por gravedad a la cántara de recirculación (DEP-1).

En caso de lluvia los canales de recogida de los paños de cubierta donde se ubican los paneles fotovoltaicos recibirán el agua de lluvia y a través del sistema de drenaje la conducirá hacia la cántara de recirculación (DEP-1), se ha previsto disponer en la red enterrada de drenajes de una arqueta dotada de válvulas de corte motorizadas que permita, en los casos que sea necesario, verter el agua de lluvia a la red de saneamiento.

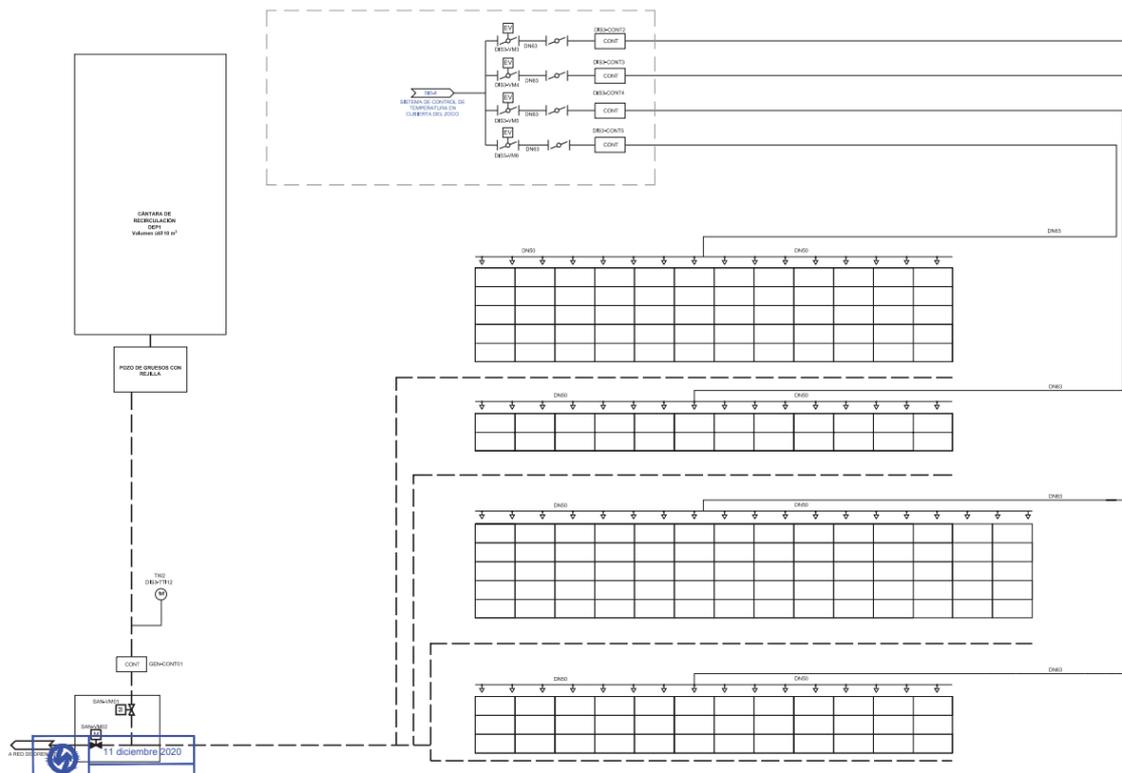
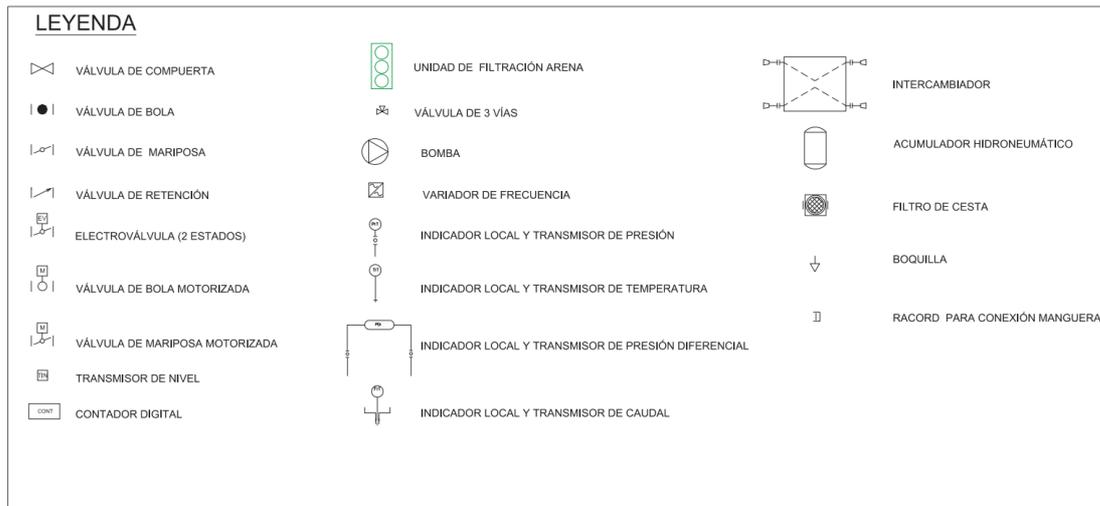


Figura 7. Plano de planta modulos fotovoltaico Cartuja Qanat

2.2.1.1 Equipos y elementos principales

Se procede a detallar los elementos principales característicos del Sistema. No son objeto de este punto el pequeño material como puede ser las canalizaciones de cableado, cables electricos, cuadros, etc.

- Paneles fotovoltaicos

Se proyecta una instalación fotovoltaica que se ubicará sobre la cubierta del zoco, en concreto sobre aquellos paños de cubierta con orientación muy próxima al sur (la desviación es de 20°C) e inclinaciones adecuadas y favorables de 20°, 30° y 40° (siendo la inclinación óptima de 37°). La instalación proyectada tiene una superficie de 380 m2 de placas fotovoltaicas distinguiéndose las siguientes sub-zonas: x Zona 1: 60 paneles inclinados 20° x Zona 2: 24 paneles inclinados 20° x Zona 3: 70 paneles inclinados 30° x Zona 4: 36 paneles inclinados 40° Las placas fotovoltaicas previstas tendrán en principio una medida aproximada de 2000x1000mm a fin de poder

disponer en el mercado de soportes adecuados y económicos a la cubierta, también se elige ese tamaño por la disponibilidad de muchos modelos de características similares a las placas proyectadas. El principal criterio para la elección de las placas ha de ser la eficiencia que debe estar obligatoriamente por encima del 20%. En total se instalarán 190 paneles de 410 Wp cada uno. La instalación fotovoltaica proyectada tiene una potencia nominal de aproximadamente 80 KW, siendo su potencia pico en condiciones estándares (1000 W/m², 25°C temperatura de célula y 1,5 IAM) de 77900 Wp. La potencia total en inversores será de 105 kW, con un total de 7 inversores de 15kW cada uno de ellos. Estos inversores se ubicarán en la sala de electricidad del edificio técnico.

- Almacenaje de agua (Qanats)

Un qanat es una instalación concebida para el enfriamiento del aire mediante su paso a través de unos conductos por el interior un volumen de agua a baja temperatura que se encuentra en el interior de una estructura de hormigón (marco) que se instala bajo rasante. Se proyectan un total de dos qanats contiguos a las fachadas este y oeste del zoco, con una longitud de 40 m cada uno de ellos

Consisten en unos marcos, que se ejecutarán prefabricados en la mayor parte de su longitud, con sección en U de dimensiones interiores 2,00*1,50 m y una losa superior, que se dispondrán 0,60 m bajo rasante. Cada uno de estos marcos albergará un volumen de agua en cuyo interior se dispondrán 4 conductos para la canalización del aire impulsado desde los extremos ("conductos sumergidos"). Adicionalmente, bajo cada marco, se dispondrán 5 conductos que también canalizarán el aire impulsado desde los extremos ("conductos enterrados"). Estos conductos se han proyectado como tubería de polietileno PE100 PN6 de diámetro exterior 355 mm.

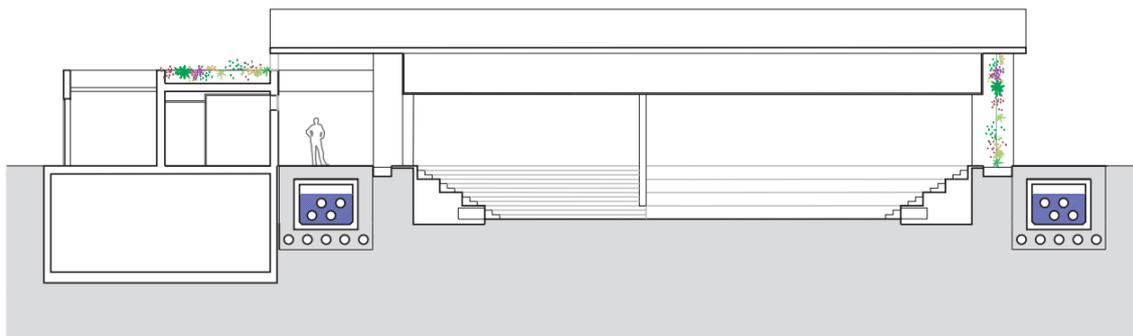


Figura 8. Almacenaje de agua en los "Qanats"

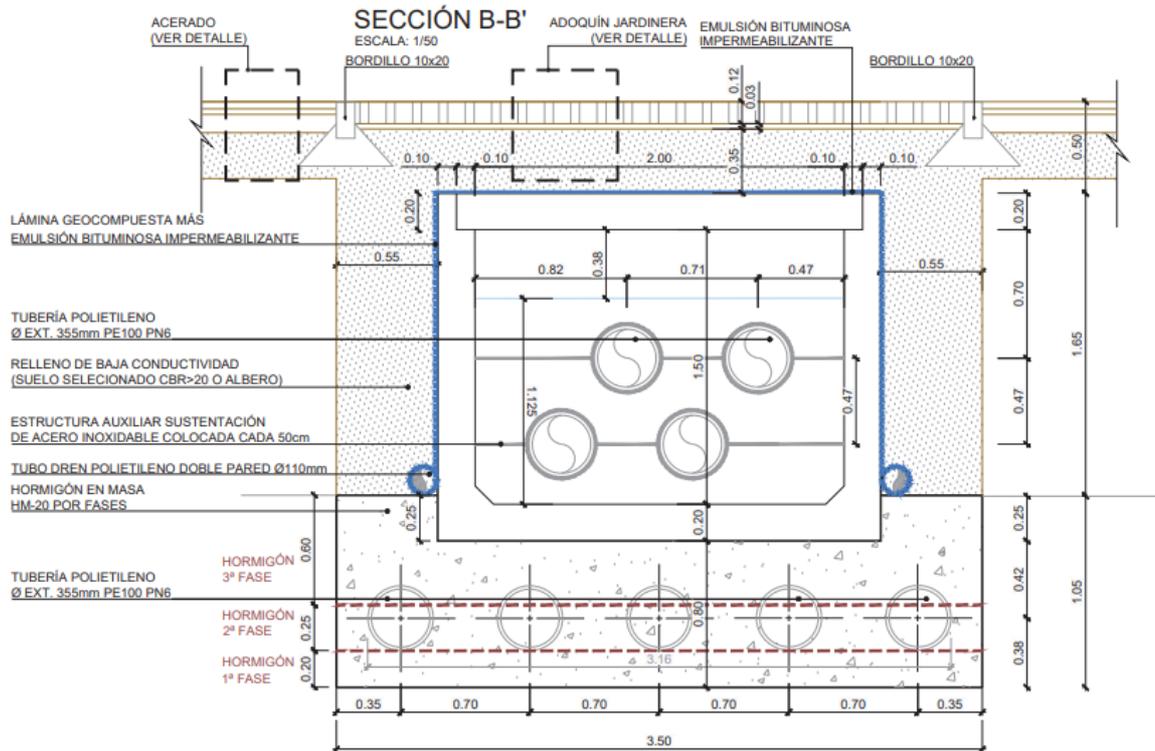


Figura 9. Corte transversal "Qanats"

- Elementos del sistema hidráulico:
 - Cántara de recirculación DEP-01

Se dispone de una cántara de recirculación de 10 m³ de volumen útil, siendo su superficie útil en planta de 10 m² y una altura útil de 1 m. La cántara dispone de un foso de aspiración desde donde aspiran las bombas que dan servicio a los diferentes sistemas de enfriamiento.

- Grupo de presión

El grupo de presión da servicio además del sistema de disipación de lámina descendente (DIS-3), a otros dos:

-Sistema de enfriamiento de agua del Qanat mediante Bomba de calor (SIS-4) en modo de operación arranque día.

- Sistema de control de la temperatura superficial de la cubierta del zoco (SIS-5) en modo de operación día

Este grupo de presión estará formado por tres bombas al 50% de caudal, cada una de las bombas dispondrá de un variador de frecuencia que permitirá ajustar el punto de funcionamiento de las bombas para los diferentes sistemas a los que da servicio. Para el sistema DIS-3, el grupo de presión suministrará el agua a las boquillas ubicadas sobre los paneles fotovoltaicos de la cubierta del zoco, para este sistema se requiere el siguiente punto de operación:

Q= 66 m³/h.

H= 38 m.c.a.

Como se ha previsto disponer de un grupo de presión formado por tres bombas trabajando al 50 % del caudal, de forma que una de ellas permanecerá en reserva, el punto de funcionamiento de cada una de las bombas será:

Q= 33 m³/h.

H= 38 m.c.a.

El volumen de agua a enfriar es la suma del contenido en los Qanats y en la cántara de recirculación (DEP-1) ubicada en la sala de instalaciones hidráulicas en el sótano del edificio técnico, y corresponde a un volumen total de 150 m³/h (140 m³/h + 10 m³/h).

- Red de tuberías de impulsión
- Boquillas de chorro plano sobre paneles fotovoltaicos

La lámina de agua descendente sobre los paneles fotovoltaicos se realizará mediante el uso de boquillas del tipo cortinas de agua de gran abertura. Las boquillas se distribuirán por la parte superior de los paneles fotovoltaicos de forma que la distancia entre ellas sea de un metro. Se disponen en la cubierta de 4 paños orientados al sur donde se ubican los paneles fotovoltaicos, cada uno de los paños tiene una longitud de 25 m, se ha previsto disponer de un circuito por cada uno de dichos paños. Cada circuito que da servicio a cada uno de los paños de la cubierta está dotado de una válvula de corte motorizada que permite actuar sobre el sistema según necesidades.

- Tipo: Boquillas de pulverización de chorro plano
- Caudal unitario: 10 l/min
- K: 18.26
- Presión de trabajo: 0'3 bar
- Unidades: 25 unidades por cada paño. Total 100 unidades.
- Marca / modelo: DELRIN/ACETAL CW-04 o similar

El número total de boquillas a disponer es de 100 unidades, siendo el caudal total de 1000 l/min (60 m³/h), considerando un gradiente hidráulico de 1'1 el caudal teórico de descarga será de 66 m³/h.

- Red de retorno por gravedad a la cántara de recirculación
- Arqueta para vertido a red en caso de Lluvia
- Elementos de control

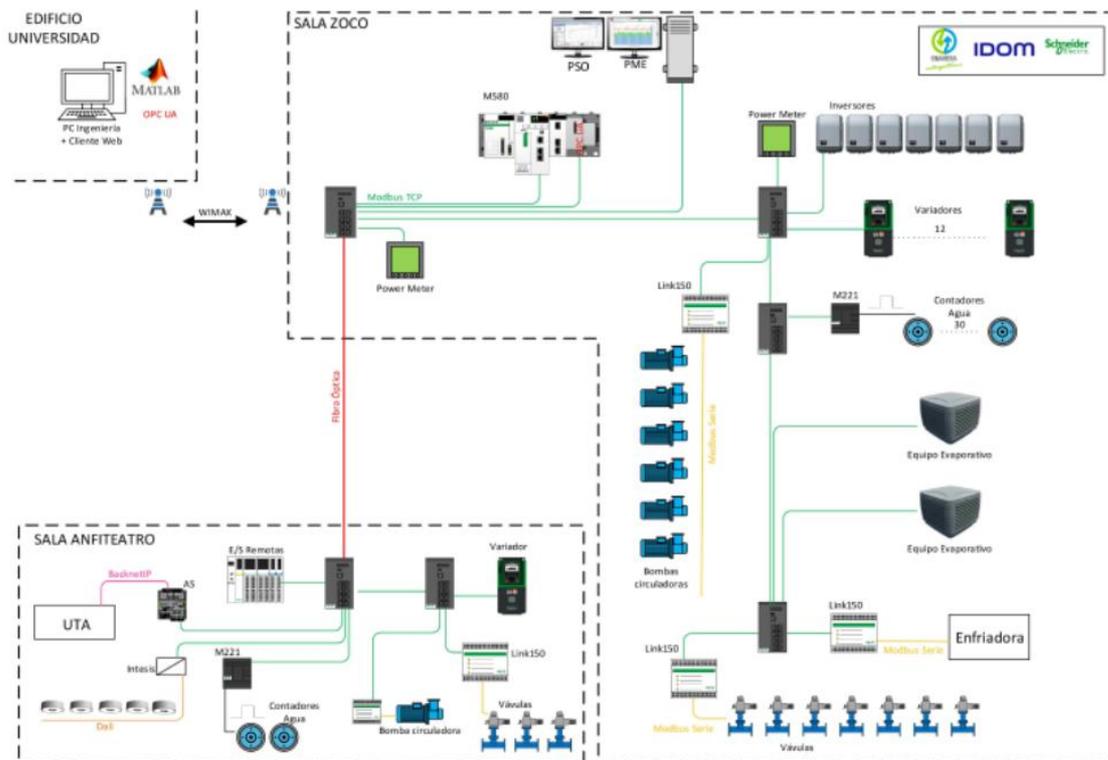


Figura 10. Elementos de control Cartuja Qanat

Temperatura de agua en la impulsión de las bombas.

- Temperatura del agua en las salidas de los intercambiadores.
- Temperatura del agua a la entrada de los Qanats.
- Temperatura del agua a la salida de los Qanats.
- Temperatura del agua en el circuito de retorno desde paneles fotovoltaicos.
- Presión a la entrada de los intercambiadores.
- Presión a la salida de los intercambiadores.
- Contadores de agua en la entrada de los Qanats
- Contadores de agua en cada uno de los circuitos de los paneles fotovoltaicos.
- Contador de agua en el circuito de retorno a la cántara desde los canalones de la cubierta del zoco.
- Válvulas todo/nada motorizadas para funcionamiento del sistema de intercambio con bomba de calor (SIS-4).
- Válvulas todo/nada motorizadas para circuito de retorno a la cántara desde intercambiadores.
- Válvulas todo/nada motorizadas para circuito de retorno en la red enterrada.
- Variadores de frecuencia para regulación de puntos de funcionamiento de las bombas.
- Trasmisores de presión diferencial en los filtros de aspiración y de impulsión.
- Transmisor de presión en aspiración y en impulsión de grupo de presión.

2.2.1.2 Funcionamiento

En el caso del Cartuja Qanat, existen numerosos sistemas bioclimáticos que interactúan entre ellos. Por lo tanto, no resulta tarea sencilla desacoplar el sistema de lámina de agua descendente del resto.

Para comprender el funcionamiento de este sistema, hay que entender que se trata de un paso intermedio para la refrigeración. Es decir, la finalidad del sistema es bajar la temperatura del agua almacenada en los qanats para utilizarla como producto posteriormente en la UTA (Unidad de Tratamiento del Aire) en una primera etapa de refrigeración. Gracias a este intercambio de calor, se consigue el acondicionamiento climático de zonas interiores del edificio durante el día.

Para mejorar su entendimiento, se puede dividir el sistema de lámina completo en 7 etapas.

- Etapa 1. Captación de agua de la red.
- Etapa 2. Bombeo del agua hasta zona de paneles fotovoltaicos.
- Etapa 3. Pulverización del agua sobre los paneles fotovoltaicos y recogida en canalización.
- Etapa 4. Llegada del agua al qanat (almacenaje) previa filtración.
- Etapa 5. Recirculación del agua del qanat para mezclar adecuadamente el fluido.
- Etapa 6. Bombeo del agua hasta zona UTA para acondicionamiento del aire del edificio.
- Etapa 7. Regreso del agua de la UTA al Qanat.

2.2.2 Water Cool

Al igual que el Cartuja Qanat, se trata de un proyecto donde hay varias instalaciones bioclimáticas. El proyecto original tiene por nombre “PROYECTO PARA EL DISEÑO DE PROTOTIPOS PARA GENERACIÓN DE CONDICIONES DE CONFORT EN EL ENCLAVE DEL PROYECTO PILOTO DE LA AVENIDA DE CRUZ ROJA” y se encuentra ubicado en la ciudad de Sevilla, dentro de las instalaciones de un colegio.

Dicho proyecto a pesar de ser también complejo como el Cartuja Qanat, tiene un matiz más práctico y no tan de investigación como su homólogo.

Las instalaciones bioclimáticas en este proyecto son 4:

- Plaza. Sistema de adecuación de aire mediante dos UTAs en la plaza (SIS1) y el sistema de barreras de la fuente basado en dos niveles de pulverización (SIS2). A todo ello se une la cobertura en forma de árboles artificiales.
- Parque (estancia no incluida en la ejecución de este proyecto). Dos UTA en los asientos del parque (SIS3) junto con un sistema de barreras evaporativas en las celosías de confinamiento que se sitúan en todo el perímetro (SIS4). A lo que se le suma la cobertura como elemento de protección solar.
- El patio de Colegio. Sistema de control de temperatura superficial en la cubierta del patio del colegio mediante película descendente (SIS5) sobre el policarbonato compacto de la cobertura de propiedades solares variables mediante lamas (SIS6), junto con la impulsión de aire frío usando la red de conductos y el sistema evaporativo de relleno (SIS7); y finalmente la barrera evaporativa de micronizadores en el perímetro de la cobertura (SIS 9).
- Marquesina. Sistema de control de la temperatura superficial de la marquesina de la parada de autobús (SIS8).

La adaptación bioclimática de estas cuatro estancias utiliza sistemas de enfriamiento de agua mediante disipación nocturna, y sistemas de enfriamiento/calentamiento de agua mediante bomba de calor aire/agua como apoyo para la realización de las diferentes pruebas experimentales. El sistema de disipación nocturna se realiza mediante lámina de agua sobre paneles fotovoltaicos situados en la cubierta del colegio. Estos paneles producen energía eléctrica durante el día equilibrando el consumo del conjunto de los equipos.

Los aljibes, dos de 25.000 l, las canalizaciones bajo calzada y el arquetón subterráneo para albergar las conexiones, valvulería y equipamiento hidráulico, se construyen en la adecuación de la avenida Cruz roja, antes mencionado.



Figura 11. Instalaciones de proyecto WaterCool

El modo de operación tiene como objetivo el enfriamiento/calentamiento del agua del aljibe, respondiendo a las necesidades de climatización de las estancias. Tiene dos sistemas independientes para conseguir este objetivo. En las épocas de año en que es necesario el enfriamiento de las estancias, está previsto el funcionamiento del sistema de disipación nocturna mediante lámina de agua sobre paneles fotovoltaicos de la cubierta del colegio (DIS1). La producción de agua fría se realiza durante la noche entre las 0:00h y las 8:00h.

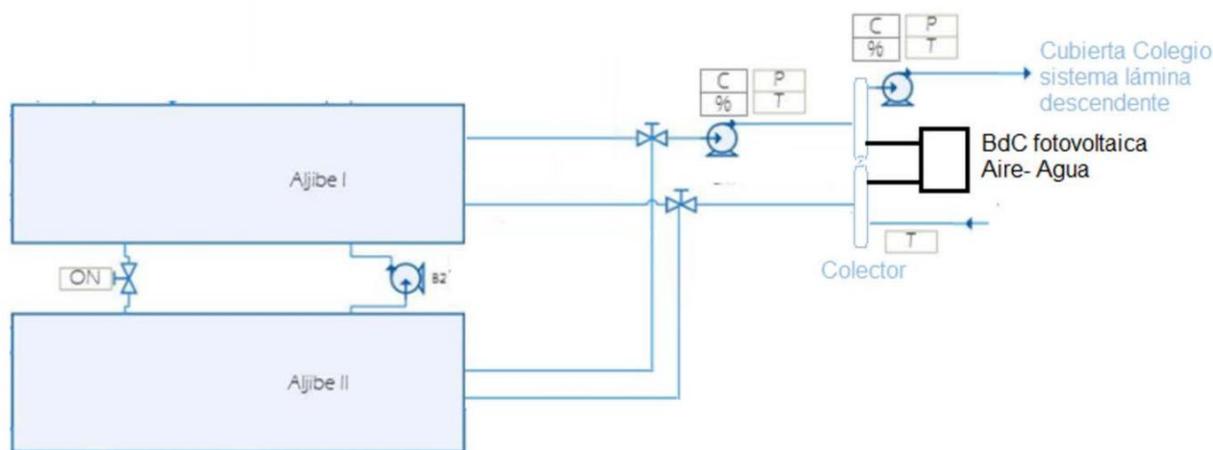


Figura 12. Sistema hidráulico Water Cool

El sistema de disipación de lámina descendente sobre la cubierta del colegio (DIS-1) se basa en la reducción de la temperatura del agua del sistema mediante la disipación térmica que se produce durante el recorrido que realiza el agua proyectada por los paneles fotovoltaicos instalados.

El agua desciende por los paneles y durante este recorrido se atempera con el ambiente exterior reduciendo su temperatura. El agua vertida sobre los paneles fotovoltaicos se recoge en los canalones de recogida de agua de lluvia de cada uno de los paños de la cubierta del colegio. El agua atemperada / refrigerada retorna por gravedad al aljibe.

En caso de lluvia los canales de recogida de los paños de cubierta donde se ubican los paneles fotovoltaicos recibirán el agua de lluvia y a través del sistema de drenaje la conducirá hacia los aljibes, se ha previsto disponer en la red enterrada de drenajes de una arqueta dotada de válvulas de corte motorizadas que permita, en los casos que sea necesario, verter el agua de lluvia a la red de saneamiento.

2.2.2.1 Equipos y elementos principales

Se procede a detallar los elementos principales característicos del Sistema. No son objeto de este punto el pequeño material como puede ser las canalizaciones de cableado, cables eléctricos, cuadros, etc.

- Paneles fotovoltaicos

Para disminuir el consumo de energía eléctrica desde la red de ENDESA, se proyecta un sistema de producción, mediante placas fotovoltaicas que además se utiliza para el enfriamiento del agua de los depósitos durante la noche.

Se proyectan 5 playas independientes con 24 placas cada una de ellas lo que representa un total de 120 placas con una potencia pico de 400 w lo supone una potencia total de 48 kw. Las placas van conectadas a 3 inversores, dos de 25 kw y uno de 15 kw.

Cada inversor cuenta con cuatro salidas independientes que es alimentado por 12 placas cada uno de ellos. Las placas se disponen sobre una estructura de perfiles de aluminio fijadas a la cubierta del edificio.

El agua para su enfriamiento es transportada mediante tuberías de PP SDR 11 de diferentes diámetros, en las que se disponen las válvulas motorizadas necesarias para aislar cualquiera de las playas proyectadas. El trazado

de las conducciones se realiza bajo las placas de manera que quedan protegidas al sol. Para el reparto del agua sobre las placas se proyectan 14 boquillas en cada playa, capaces de distribuir 1000 l/h trabajando a una presión de 1 bar. Las boquillas son del tipo abanico de gran apertura de 160°.

Se comprueba que con una superficie en la cubierta del colegio de 212,3 m² para disipadores el rango de enfriamiento diario oscila entre los 250 y los 350 kWh dependiendo de la temperatura del agua del depósito.

- Almacenaje de agua (Aljibes)

En el subsuelo de la nueva plaza, se construirán dos aljibes cada uno de ellos de 25.000 litros de capacidad que darán soporte a las necesidades funcionales de agua de las distintas estancias. Estos aljibes y el sistema de circulación de agua, se combinarán con fuentes para enfriar de forma pasiva el agua almacenada.

Para un salto de temperatura diario en depósito de 5°C y tomando la opción más conservadora de rango de enfriamiento mencionada anteriormente, se tendría:

$$250 \text{ kWh} = M \cdot 4.18 \text{ [kJ/kg}\cdot\text{K]} \cdot 1[\text{h}]/3600[\text{s}] \cdot 5[\text{K}].$$

Despejando se obtiene una masa de agua de 43000kg que se corresponde con dos depósitos de 20 m³ cada uno. Se diseñan dos aljibes con resguardo de 5 m³ cada uno, es decir de 25 m³.

- Elementos del sistema hidráulico.
 - Red de tuberías de impulsión
 - Boquillas de chorro plano sobre paneles fotovoltaicos

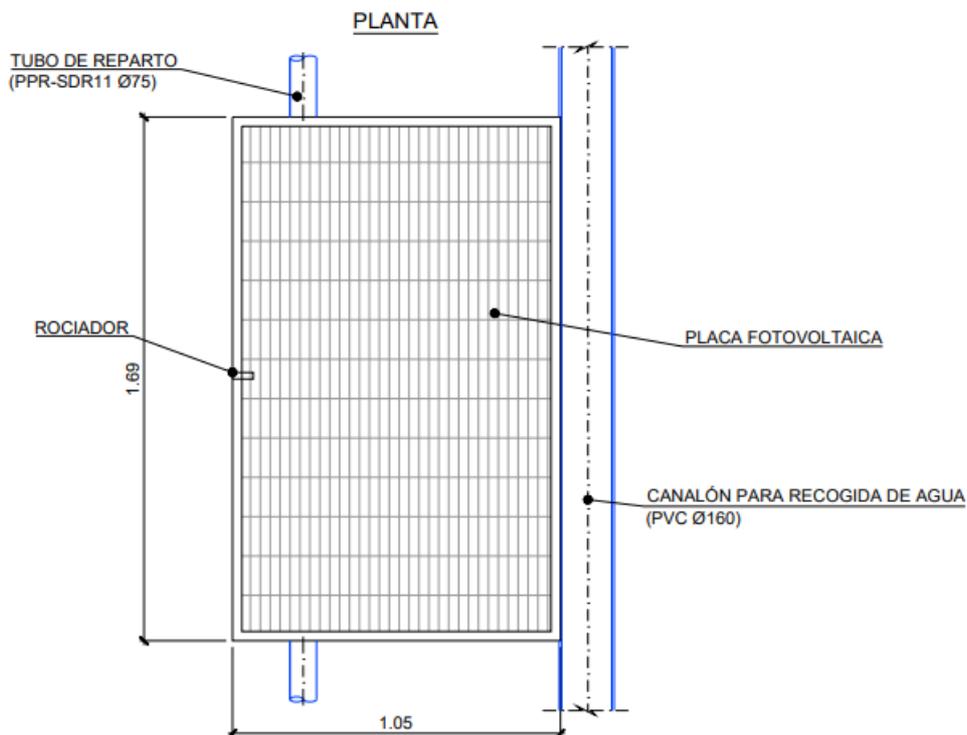


Figura 13. Plano de planta panel fotovoltaico proyecto WaterCool

El agua se distribuirá en cada playa a través de 14 boquillas de 1.000 l/h cada una trabajando a una presión de 1 bar en salida. Estas boquillas serían del tipo: CW04 – abanico de gran apertura 1/2" bspt (gas) – Cortina o lámina de agua de 160° – (delrin/acetel) o equivalente.

Estas boquillas permiten un rango de caudales en función de la presión a la que se someta. En el

dimensionamiento de la impulsión se establecerá las posibilidades de modificar el punto de trabajo.

Caudal de diseño por playa: 14 boquillas * 1 m³ /h = 14 m³ /h

Caudal de diseño total 5 playas x 14 m³ /h = 70 m³ /h

- Red de retorno por gravedad

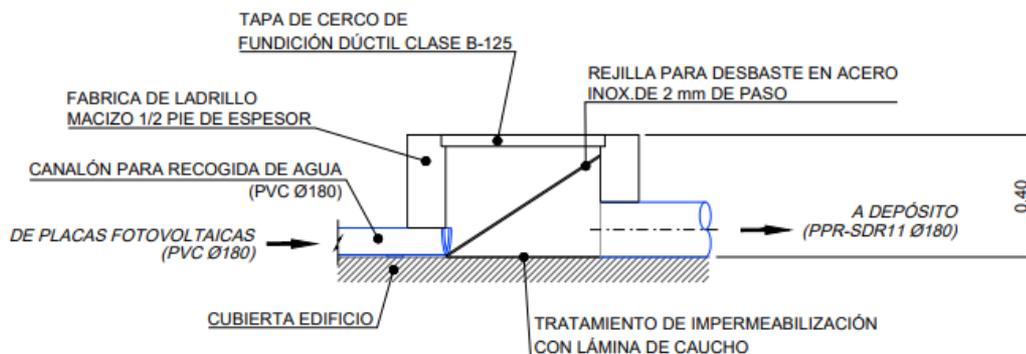


Figura 14. Sistema de tuberías proyecto Water Cool

- Arqueta para vertido a red en caso de Lluvia

- Elementos de control

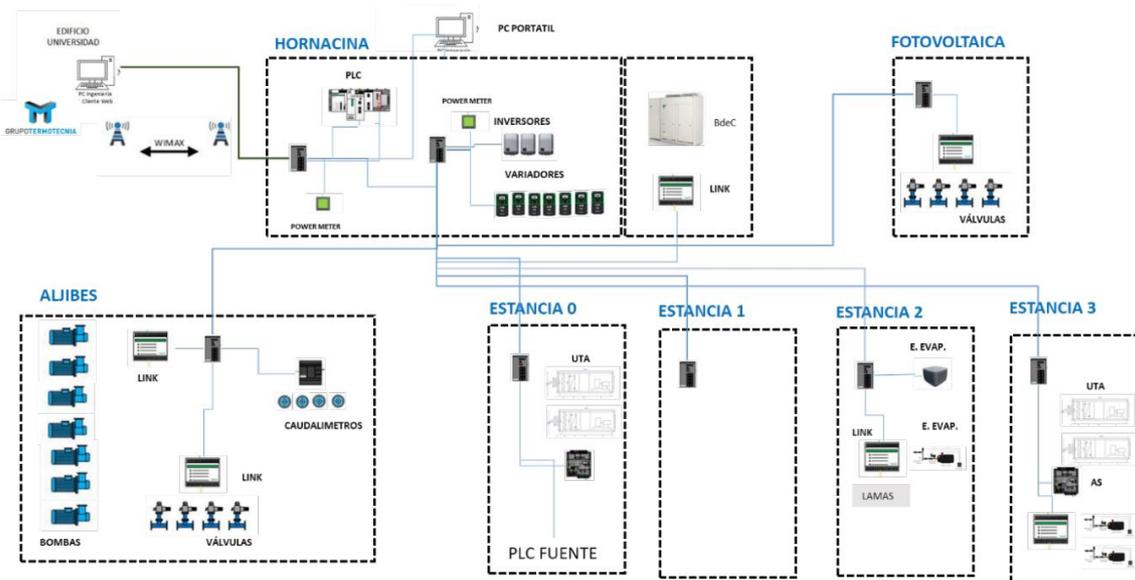


Figura 15. Sistema de control. Proyecto Water Cool

Temperatura de agua en la impulsión de las bombas.

- Temperatura del agua en las salidas de los intercambiadores.
- Temperatura del agua a la entrada de los Aljibes
- Temperatura del agua a la salida de los Aljibes
- Temperatura del agua en el circuito de retorno desde paneles fotovoltaicos.
- Presión a la entrada de los intercambiadores.
- Presión a la salida de los intercambiadores.

- Contadores de agua
- Válvulas todo/nada motorizadas para funcionamiento del sistema de intercambio
- Válvulas todo/nada motorizadas para circuito de retorno
- Variadores de frecuencia para regulación de puntos de funcionamiento de las bombas.
- Trasmisores de presión diferencial en los filtros de aspiración y de impulsión.

2.2.2.2 Funcionamiento

En el caso del Water Cool, existen numerosos sistemas bioclimáticos que interactúan entre ellos. Por lo tanto, no resulta tarea sencilla desacoplar el sistema de lámina de agua descendente del resto.

Para comprender el funcionamiento de este sistema, hay que entender que se trata de un paso intermedio para la refrigeración. Es decir, la finalidad del sistema es bajar la temperatura del agua almacenada en los qanats para utilizarla como producto posteriormente en la UTA (Unidad de Tratamiento del Aire) en una primera etapa de refrigeración. Gracias a este intercambio de calor, se consigue el acondicionamiento climático de zonas interiores del edificio durante el día.

Para mejorar su entendimiento, se puede dividir el sistema de lámina completo en 6 etapas.

- Etapa 1. Captación de agua de la red.
- Etapa 2. Bombeo del agua hasta zona de paneles fotovoltaicos.
- Etapa 3. Pulverización del agua sobre los paneles fotovoltaicos y recogida en canalización.
- Etapa 4. Llegada del agua al qanat (almacenaje) previa filtración.
- Etapa 5. Bombeo del agua hasta zona interior para acondicionamiento del aire del edificio.
- Etapa 6. recirculación del agua de vuelta a los depósitos.

2.3 Propuesta tecnológica

En el siguiente punto se procede a desarrollar en mayor detalle las características técnicas de la instalación propuesta. Como cada proyecto ingenieril, la propuesta final será única y concreta para cada instalación, aun así, se propone una serie de equipos comunes para la instalación.

De esta manera se intenta aterrizar una solución comercial realizable. La implantación de la propuesta con diferentes variantes y con simulaciones para ver su viabilidad real, se realizará en el capítulo 3.

2.3.1 Antecedentes y síntesis de los proyectos de partida

En primer lugar, se procede a realizar una comparativa entre los dos proyectos tomados como base, añadiendo apreciaciones y detalles propios, para luego describir y definir en mayor detalle la solución compacta que se propone.

Ambos proyectos tomados como base son muy parecidos, pero con pequeños detalles que los hacen diferentes. A grandes rasgos, Water Cool se trata de una solución “optimizada” a partir de Cartuja Qanat, siendo mucho más práctica y sencilla su implementación.

En este subapartado se comparará las dos soluciones tomando como base las etapas de funcionamiento de Water Cool, siendo estas las etapas tipo con las que se quiere contar en la propuesta tecnológica.

Para realizar esta síntesis parece adecuado, como en todo proyecto, dividir el trabajo en varias etapas (ya comentadas en el punto 2.2.2):

- Etapa 1. Captación de agua de la red.
- Etapa 2. Bombeo del agua hasta zona de paneles fotovoltaicos.
- Etapa 3. Pulverización del agua sobre los paneles fotovoltaicos y recogida en canalización.
- Etapa 4. Llegada del agua al depósito previa filtración.
- Etapa 5. Bombeo del agua hasta zona interior para acondicionamiento del aire de la vivienda.
- Etapa 6. recirculación del agua de vuelta al depósito.

Es importante empezar a diferenciar también en 2 modos de trabajo:

-Modo 1: enfriamiento del agua. Tiene lugar durante la noche. Se estima de 00:00 h a 8:00 h. Abarca las etapas 1,2,3 y 4.

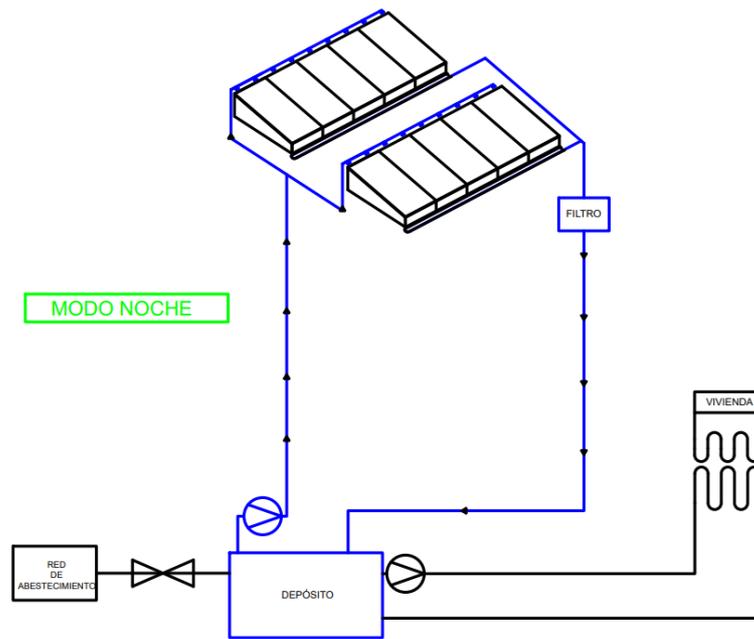


Figura 16. Esquema de funcionamiento. Modo Noche

-Modo 2: acondicionamiento del edificio. Tiene lugar a lo largo de día, dependiendo de la demanda se pondrá en funcionamiento a horas programadas o a elección in situ. Abarca las etapas 5 y 6.

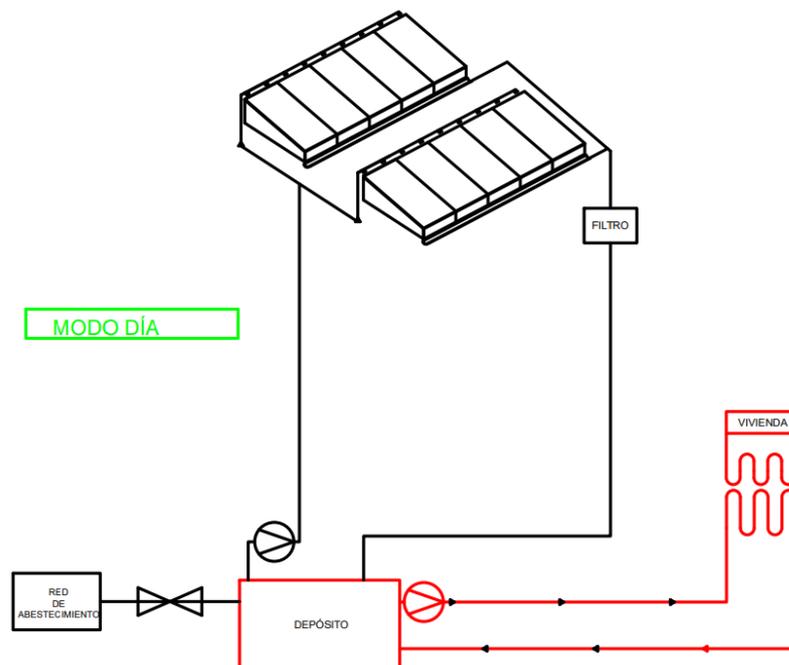


Figura 17. Esquema de funcionamiento. Modo Día

Los modos de funcionamiento serán activados automáticamente mediante automatismos eléctricos (deelay relé y plc).

2.3.1.1 Etapa 1. Captación de agua de la red

En esta primera etapa se capta el agua directamente de la red pública de abastecimiento. No es una etapa que haya que repetir en ciclo como sí el resto. Cada ciertos días puede ser conveniente rellenar los depósitos con nueva agua por si ha habido perdidas por evaporación, etc.

En caso de lluvia los canales de recogida de los paños de cubierta donde se ubican los paneles fotovoltaicos recibirán el agua de lluvia y a través del sistema de drenaje la conducirá hacia los depositos, se ha previsto disponer en la red enterrada de drenajes de una arqueta dotada de válvulas de corte motorizadas que permita, en los casos que sea necesario, verter el agua de lluvia a la red de saneamiento.

No hay discrepancias en los proyectos en esta primera etapa, extrayendo algunos elementos comunes que serán necesarios para la nueva propuesta:

- Depósito de agua de capacidad adecuada
- Válvula de corte
- Red de agua hacia la cubierta

2.3.1.2 Etapa 2. Bombeo del agua hasta zona de paneles fotovoltaicos.

En ambos proyectos, el agua almacenada en los depósitos es bombeada mediante bombas de impulsión hasta la cubierta. La red de agua en ambos casos es una red bastante compleja y abarca muchos mas sistemas de los necesarios en el alcance de este trabajo.

Extrayendo la parte interesante que incumbe a la propuesta tecnológica del presente trabajo, se destaca la necesidad de los siguientes elementos:

- Bomba de impulsión
- Arqueta para desbaste

2.3.1.3 Etapa 3. Pulverización del agua sobre los paneles fotovoltaicos y recogida en canalización.

Una vez el agua proveniente de los depósitos se encuentra en la cubierta, se divide en los diferentes ramales de paneles mediante tuberías y se rocía dicha agua sobre la superficie de los paneles, siendo esta recogida por canalones y llevadas de vuelta a los depósitos tras pasar por un filtro.

Elementos necesarios:

- Instalación fotovoltaica
- Red de tuberías en la cubierta
- Rociadores
- Canalones y recogida de aguas

2.3.1.4 Etapa 4. Llegada del agua al depósito previa filtración.

Desde la cubierta, el agua presumiblemente enfriada se vuelve a llevar a los depósitos por la red de agua a instalar. Dicho proceso, al igual que las etapas anteriores, tiene lugar durante la noche siendo parte del modo 1 “enfriamiento del agua”.

Los elementos a destacar son:

- Red de tuberías de retorno

- Filtro

2.3.1.5 Etapa 5. Bombeo del agua hasta zona interior para acondicionamiento del aire de la vivienda.

Una vez finalizada el modo 1, comienza el modo 2 con esta etapa. Como se verá en el capítulo 3, se propondrá varias soluciones para el uso del agua refrigerada. La principal será el uso de una UTA o Fan Coil que unifique el uso mediante dos baterías de un sistema convencional de enfriamiento con este. Dependiendo de las características de la instalación primigenia, se podrá implementar una solución u otra.

Los elementos necesarios serán:

- Red de agua a la unidad
- Unidad de Tratamiento de Aire / Fan Coil

2.3.1.6 Etapa 6. Recirculación del agua de vuelta al depósito.

Una vez utilizado el agua enfriada como fluido portador, vuelve al depósito con el consiguiente aumento de temperatura para volver a comenzar el proceso.

Los elementos necesarios serán:

- Red de agua al deposito

2.3.2 Definición de la propuesta

Se procede en este punto, a desarrollar la solución ensamblada comercial. La idea general es establecer las bases de la instalación, buscando un estándar implementable en un alto porcentaje de viviendas unifamiliares, y estableciendo unos datos tipo de partida.

Al igual que en el capítulo anterior, se realiza la subdivisión de la instalación en 6 etapas.

2.3.3 Datos de partida

Para establecer una vivienda unifamiliar tipo, y antes de entrar en mayor detalle, se establecen unos datos/condiciones de partida:

-Se puede ejecutar el soterramiento de un depósito de poliéster bajo tierra de medidas aproximadas 2,43 x 1,85 x 1,55 m.

-Altura de la vivienda desde depósito enterrado hasta zona de paneles fotovoltaicos de 10 m como máximo.

-Cubierta visitable plana con suficiente sustentación para albergar estructura de hormigón a la que se fijarán 10 módulos fotovoltaicos de 2279 x 1134 x 35 mm con la siguiente configuración: 2 filas consecutivas de 5 módulos cada una con una separación entre ellas de 1,5 m. Dando una superficie necesaria disponible de 6x6 m aproximadamente.

2.3.4 Solución ensamblada

La solución ensamblada se tratará de una instalación modular que comprende diferentes equipos. La potencia fotovoltaica de la instalación será de 5,5 kWp y 5 kW nominales.

Al igual que el subcapítulo anterior, se procede a detallar por etapas la solución definitiva propuesta. Finalmente se facilita una lista de material necesario así como una valoración económica aproximada.

2.3.4.1 Etapa 1. Captación de agua de la red

El sistema se alimenta directamente de la red de distribución de agua y no necesitan un dimensionado hidráulico por ser equipos estándar.

- Válvula de corte:

Se trata de una electroválvula encargada de rellenar cuando sea necesario el depósito de agua.



Figura 18. Válvula de corte

- Depósito de agua de capacidad adecuada

Teniendo en cuenta que se debe tratar de una instalación tipo para una vivienda unifamiliar, se propone una instalación de 10 módulos fotovoltaicos. Esto resulta una superficie disponible de 20 m² aproximadamente, oscilando para ellos rangos de disipación de 25-35 kWh.

Para un salto de temperatura diario en depósito de 5°C y tomando la opción más conservadora se tendría:

$$25 \text{ kWh} = M \cdot 4.18 \text{ [kJ/kg} \cdot \text{K]} \cdot 1[\text{h}]/3600[\text{s}] \cdot 5[\text{K}].$$

Despejando se obtiene una masa de agua de 4300 kg que se corresponde con un depósito de 5 m³.



Figura 19. Depósito enterrado

Este depósito deberá ser enterrado en los terrenos de la vivienda. Aportando de este modo aislamiento natural térmico gracias a la tierra.

El depósito deberá contar con 5 entradas/salidas:

- Abastecimiento desde la red para su relleno.
- Salida hacia paneles fotovoltaicos (agua a acondicionar).
- Entrada desde paneles fotovoltaicos (agua acondicionada).

- Salida hacia intercambiador interior vivienda (acondicionamiento de la vivienda).
- Entrada desde intercambiador interior vivienda (agua ya utilizada para que comience el ciclo).

2.3.4.2 Etapa 2. Bombeo del agua hasta zona de paneles fotovoltaicos.

Se parte de datos tipo como una altura de vivienda de 10 m y un caudal a manejar que se procede a calcular.

El agua se distribuirá en cada playa a través de 14 boquillas de 1.000 l/h cada trabajando a una presión de 1 bar en salida. Estas boquillas serían del tipo: CW04 – abanico de gran apertura 1/2" bspt (gas) – Cortina o lámina de agua de 160° – (delrin/acetal) o equivalente. Estas boquillas permiten un rango de caudales en función de la presión a la que se someta. En el dimensionamiento de la impulsión se establecerá las posibilidades de modificar el punto de trabajo.

Caudal de diseño: 2 (boquillas / columna de 2 módulos) * 5 (columnas de 2 módulos) * 1 m³ /h = 10 m³ /h

- Bomba de impulsión



Figura 20. Bomba de impulsión

Se selecciona una bomba tipo de 1,5 cv que trabaje dentro del rango de funcionamiento necesario.

Curva de funcionamiento a 2900 rpm

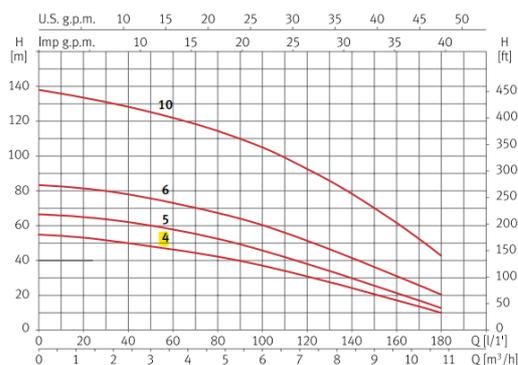


Figura 21. Curva de funcionamiento bomba

- Arqueta para desbaste

Tiene como objeto retener y separar los cuerpos voluminosos flotantes y en suspensión, que arrastra consigo el agua residual. Pueden llevar una o dos rejillas (una para materiales desbaste grueso y fino).

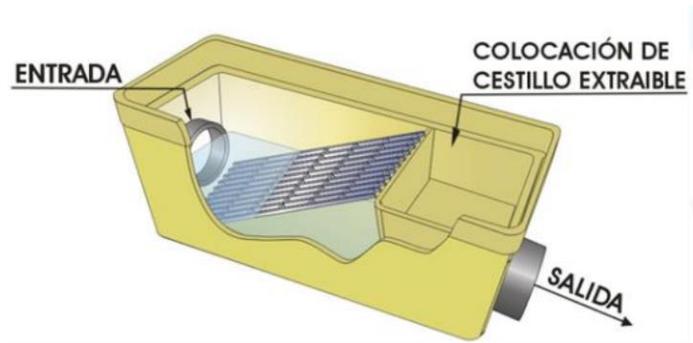


Figura 22. Arqueta de desbaste

2.3.4.3 Etapa 3. Pulverización del agua sobre los paneles fotovoltaicos y recogida en canalización.

- Instalación fotovoltaica

Se propone una instalación de autoconsumo fotovoltaico con vertido de excedentes conectada a la red. Esta modalidad es la más común en la actualidad. Permite generar energía propia durante las horas de sol, excediendo energía a la red con una correspondiente compensación en los momentos que esta no se consume, y, por ende, disminuyendo la dependencia de la red.

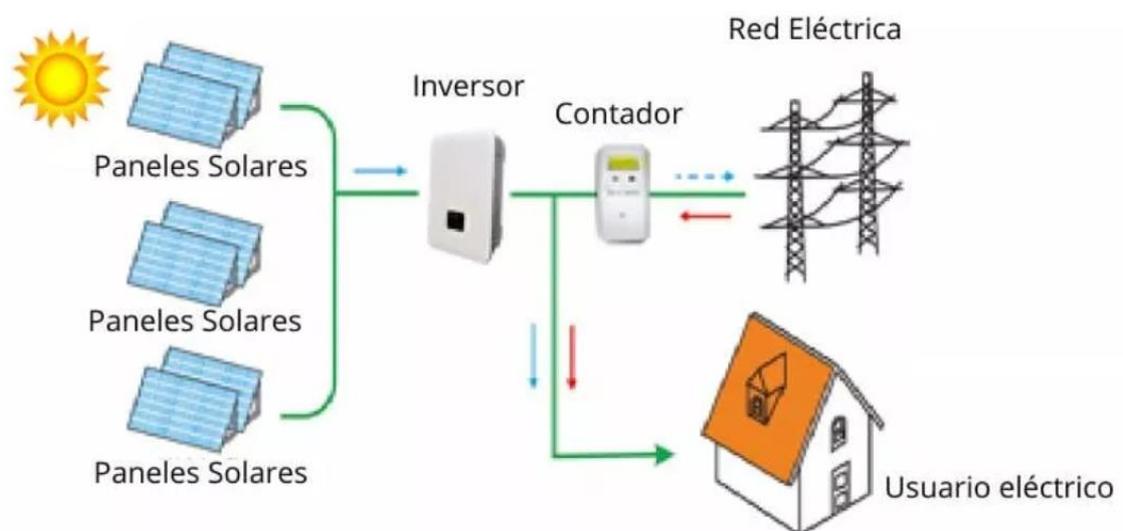


Figura 23. Esquema funcional sistema fotovoltaico

Para la solución estándar se propone:

- Módulos fotovoltaicos de 550 Wp

con las siguientes características:

- Potencia del Panel Solar: 550W
- Tipo de Célula del Panel Solar: Monocristalina PERC
- Dimensiones del Panel Solar: 2279x1134x35mm
- Tensión Máxima Potencia: 41.95V

- Corriente en Cortocircuito ISC: 13.98A
- Eficiencia del Módulo: 21.3%
- Amperios Máximos de Salida IMP: 13.12A
- Tensión en Circuito Abierto: 49.80V
- Peso del Panel Solar: 27.2kg
- Marco del Panel Solar: Aluminio anodizado

estableciéndose un total de 10 módulos, dando una potencia total de 5500 Wp.

➤ Estructuras triangulares

Para la correcta colocación de los módulos y el uso de los rociadores y canalones, se necesita de una estructura. Se selecciona una tipo con un ángulo de inclinación de 12° grados.



Figura 24. Estructura para paneles fotovoltaicos

Quedando la instalación de la siguiente manera con dos filas de 5 módulos y calculando una separación óptima entre ellas de 1,5 m:

Harán falta 12 soportes de este tipo.

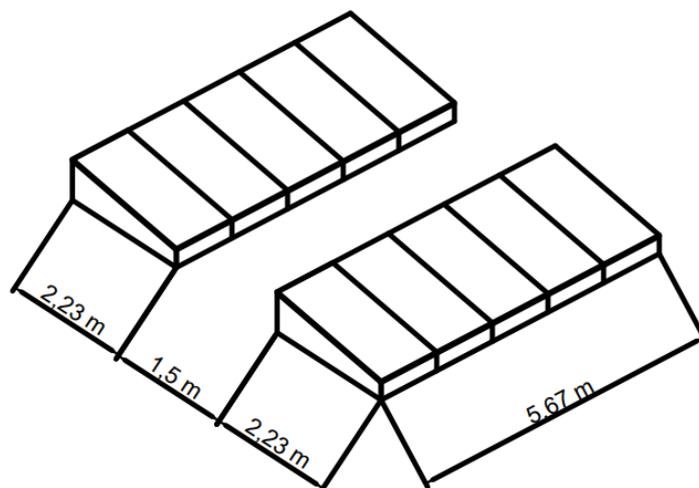


Figura 25. Disposición de los módulos fotovoltaicos

➤ Inversor y medidor de energía

Dependiendo de la conexión a la red, la vivienda puede tener una conexión monofásica o trifásica y una potencia contratada.

Siendo en el mayor de los casos la conexión monofásica, se selecciona para la solución tipo un inversor monofásico diseñado acorde a la potencia en paneles disponible.



Figura 26. Inversor de red

con las siguientes características:

- Pico de Potencia del Inversor: 5000W
- Potencia de Salida continuada: 5000W
- Rango de Funcionamiento del MPP: 90-560V
- Peso del Inversor: 12Kg

Al inversor también hay que añadir como equipo importante el medidor de energía o vatímetro. Este es el encargado de informar de cuanta potencia se genera y discernir cual es la consumida en la vivienda y cual la importada/exportada a la red.

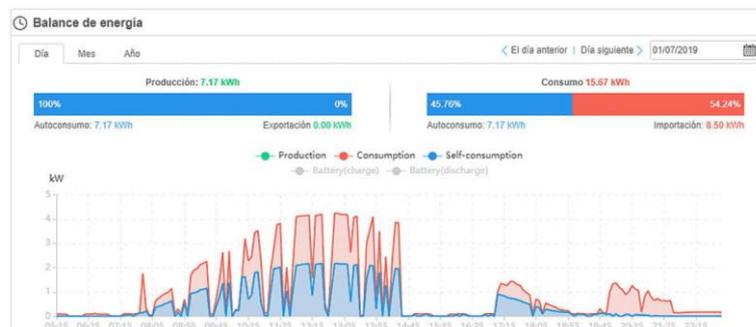


Figura 27. Sistema de medición de energía

➤ Canalizaciones y cuadro eléctrico

Para realizar todo el conexionado eléctrico será necesario el siguiente material:

- Tubos para canalización eléctrica desde cuadro general de la vivienda hasta la ubicación del inversor, y de este, a los módulos fotovoltaicos.
- Cableado de corriente continua para la conexión módulos fotovoltaicos – inversor.
- Cableado de corriente alterna para la conexión inversor – cuadro general de la vivienda.
- Cuadro auxiliar a instalar con protecciones de corriente alterna (magnetotérmico, diferencial y sobretensiones).

● Red de tuberías en la cubierta

Atendiendo a los cálculos comentados de los proyectos tomados como orden de magnitud, se estima la siguiente red de tuberías considerando que pueden estar dimensionadas para varias casuísticas.

El agua para su enfriamiento es transportada mediante tuberías de PP SDR 11 de diámetro 160 mm. El trazado de las conducciones se realiza bajo las placas de manera que quedan protegidas al sol.

● Rociadores

Para el reparto del agua sobre las placas se proyectan 10 boquillas (1 por cada módulo), capaces de distribuir 1000 l/h trabajando a una presión de 1 bar. Las boquillas son del tipo abanico de gran apertura de 160°.

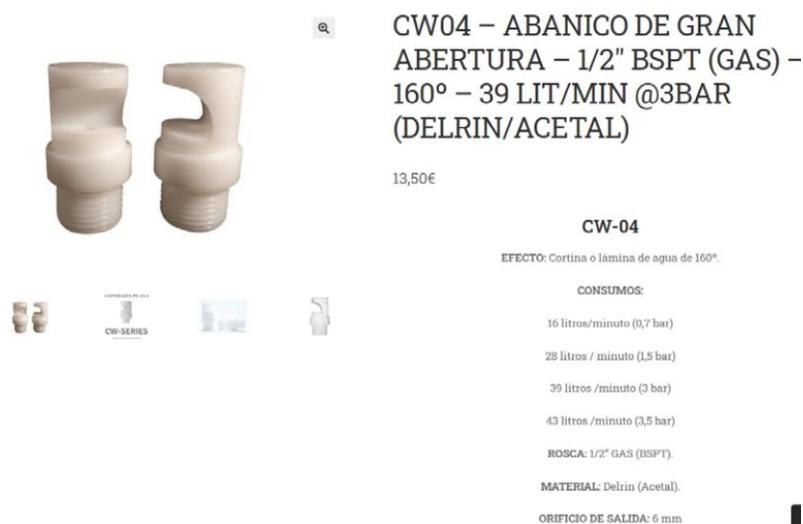


Figura 28. Boquillas rociadoras

● Canales y recogida de aguas

El agua vertida sobre los paneles fotovoltaicos se recoge en los canales de recogida de agua de lluvia de cada uno de los paños de la cubierta del colegio. El agua atemperada / refrigerada retorna por gravedad al depósito. Estos canales, siguiendo las pautas de los proyectos de referencia, se dimensiona un canalón PVC de diámetro 160 mm. Harán falta unos 12 metros lineales.

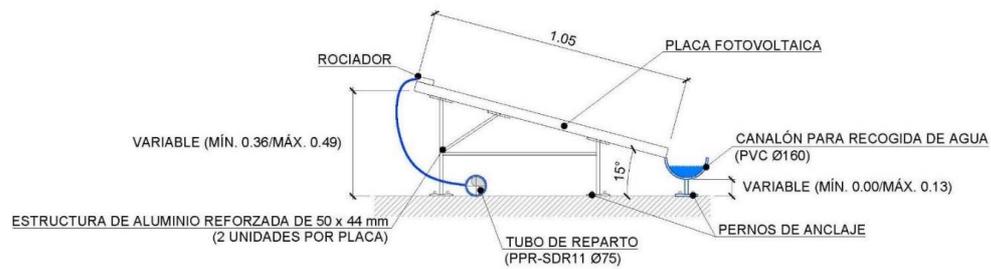


Figura 29. Esquema de módulo fotovoltaico

2.3.4.4 Etapa 4. Llegada del agua al depósito previa filtración.

Desde la cubierta, el agua presumiblemente enfriada se vuelve a llevar a los depósitos por la red de agua a instalar. Dicho proceso, al igual que las etapas anteriores, tiene lugar durante la noche siendo parte del modo 1 “enfriamiento del agua”.

Los elementos a destacar son:

- Red de tuberías de retorno

También se utilizará tuberías de PP SDR 11 de diámetro 160 mm para el retorno. Este se hará por gravedad.

- Filtro de arena

Previo paso al depósito, se filtrará el agua mediante un filtro de arena para el caudal necesario máximo (10 m³/h).



Figura 30. Filtro de arena

2.3.4.5 Etapa 5. Bombeo del agua hasta interior para acondicionamiento del aire del edificio.

- Red de agua a la unidad

En el caso de esta instalación, a diferencia de la de los proyectos de referencia, en principio solo habrá un equipo receptor del agua. Este equipo se tratará de un Fan Coil en el caso de que tenga ya ventilación propia la vivienda, y de una Unidad de Tratamiento de Aire en el caso que no lo tenga.

Es por ello que se dimensionará la red de tuberías igual en todo su recorrido siendo el dimensionamiento seleccionado de PP SDR 11 de diámetro 160 mm.

- Unidad de Tratamiento de Aire / Fan Coil

No se entrará en detalle en este momento en cual será el equipo receptor del agua acondicionada para su uso. Para ello, en el capítulo 3 se parte de diferentes escenarios para establecer cual puede ser el equipo idóneo y su mejor implementación con otras tecnologías.

A modo de ejemplo, el caso más sencillo y cómodo de tratar es el de un Fan Coil el cual trabaja con una batería de agua (proveniente del depósito) y enfría el aire.

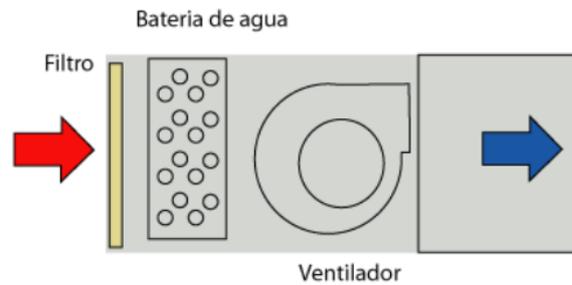


Figura 31. Unidad de Tratamiento de Aire

2.3.4.6 Etapa 6. Recirculación del agua de vuelta a los Depósitos.

- Red de agua al deposito

Mediante tuberías tipo PP SDR 11 de diámetro 160 mm volverá el agua al depósito para comenzar de nuevo el ciclo.

2.3.5 Valoración económica: Presupuesto de Ejecución Material

A continuación, se realiza una valoración económica general para una instalación tipo. Se tratan de precios actualizado al mercado a la fecha de la realización de este trabajo (agosto de 2023) y para obtener un orden de magnitud.

A partir de esta valoración se procederá en el capítulo 3 a analizar la viabilidad de la instalación en base a la simulación de ahorro económico/energético que se genera con la implantación de esta tecnología híbrida.

| PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE SISTEMA DE LÁMINA DESCENDENTE + FV | | | | |
|--|---|---------|------------|-----------------|
| Cod. | Descripción | Totales | Precio (€) | Importe (€) |
| CAPÍTULO 1: TRABAJOS PREVIOS | | | | |
| 1.01 | <p>ud. Estudio de la instalación Estudio particular de la instalación. Diseño y planificación de la ubicación de los elementos y particularidades propias de cada instalación.</p> <p style="text-align: right;">Total</p> | 1.00 | 300.00 € | 300.00 € |
| TOTAL CAPÍTULO 1 | | | | 300.00 € |
| CAPÍTULO 2: INSTALACIÓN HIDRAÚLICA | | | | |
| 2.01 | <p>ud. Válvula de corte Estudio geotécnico del terreno en cualquier tipo de suelo. Todo ello recogido en el correspondiente informe geotécnico con especificación de cada uno de los resultados obtenidos, conclusiones y validez del estudio sobre parámetros para el diseño de las cimentaciones.</p> <p style="text-align: right;">Total</p> | 1.00 | 200.00 € | 200.00 € |
| 2.02 | <p>ud. Deposito soterrado Depósito de 5000 litros de polietileno de alta densidad de medidas 2,43 (Largo) x 1,85 (Ancho) x 1,55 (Alto) m y con un peso de 160 kg.</p> <p>Incluye la excavación necesaria de 3 x 2,5 x 2 m mediante medios mecánicos para que quede soterrado. Incluye las tomas / adecuación de entradas y salidas con las necesidades de la instalación.</p> <p>La unidad incluye l toda la mano de obra, maquinaria, medios auxiliares y pequeño material necesarios para su completa instalación.</p> <p style="text-align: right;">Total</p> | 1.00 | 3.200.00 € | 3.200.00 € |
| 2.03 | <p>ud. Bomba de 1,5 CV Bomba Centrífuga Multietapa Vertical Espa Multi 35-4 MN o similar. Potencia 1,50 Hp. Caudal máximo 10.500 litros a la hora. Altura manométrica máxima 56,9 metros. Tensión de alimentación: 230V monofásica. La unidad incluye l toda la mano de obra, maquinaria, medios auxiliares y pequeño material necesarios para su completa instalación e implementación.</p> <p style="text-align: right;">Total</p> | 2.00 | 600.00 € | 1.200.00 € |

| | | | | | |
|-----------------------------------|---|-------|-------|----------|-------------------|
| 2.04 | ud. Arqueta de desbaste de gruesos Proporciona una acción de filtrado de los materiales más gruesas presentes en el agua (piedras, hojas , tejas de escombros , basura, etc). Incluye su instalación y pequeño material necesario. | Total | 1.00 | 400.00 € | 400.00 € |
| 2.05 | ud. Filtro de arena de polietileno Filtro de arena previo paso a depósito de almacenamiento de agua. Incluye su instalación y pequeño material necesario. | Total | 1.00 | 200.00 € | 200.00 € |
| 2.06 | ml. Canalones de recogida Instalación de canalones de recogida de agua de 125 mm de diametro y de PVC, resistente a los rayos UV. Se instalarán bajo los módulos fotovoltaicos y hasta la red de regreso al depósito. Se incluye todo el material necesario para su instalación. | Total | 12.00 | 25.00 € | 300.00 € |
| 2.07 | ud. Rociadores Rociadores CW04 - abánico de gran apertura 160º, 39 l/min o similar. Incluye su instalación y pequeño material necesario como el sistema de acople a la tubería y fijación a la estructura del modulo fotovoltaico. | Total | 10.00 | 18.00 € | 180.00 € |
| 2.08 | ml. Tuberías PP SDR 11 Tubos de Polipropileno Random con estructura monocapa PP-R SERIE 5 - SDR 11 para instalaciones de agua caliente y fría en el interior de la estructura de los edificios. Incluye su instalación entre los diferentes elementos de la instalación, así como su fijación en fachada mediante abrazaderas adecuadas para el tipo de recubrimiento. Se incluye los medios auxiliares y pequeño material necesario. | Total | 42.00 | 16.00 € | 672.00 € |
| TOTAL CAPÍTULO 2 | | | | | 6.352.00 € |
| CAPÍTULO 3: INSTALACIÓN FV | | | | | |
| 3.01 | ud. Módulo fotovoltaico de 550W Suministro y montaje de módulo fotovoltaico de silicio monocristalino de 550 Wp de potencia máxima cada uno, cable de DC de 1,5 m, incluidos medios auxiliares de elevación, material auxiliar, así como p.p. de pequeño material y accesorios, totalmente la unidad terminada. | Total | 10.00 | 160.00 € | 1.600.00 € |

| | | | | |
|--------------------------|---|-------|------------|-------------------|
| | | | | |
| 3.02 | <p>ud. Inversor Huawei 5 kW monofasico Suministro y montaje de inversor fotovoltaico DC/AC Huawei de 5 kW de potencia, incluidos medios auxiliares de elevación, material auxiliar, así como p.p. de pequeño material y accesorios, totalmente la unidad terminada.</p> <p style="text-align: right;">Total</p> | 1.00 | 720.00 € | 720.00 € |
| 3.03 | <p>ud. Medidor y gestor de la energia Vatímetro Suministro y montaje de gestor de la energía y vatímetro que permite ver el consumo eléctrico en tiempo real a través de la nube , incluidos material auxiliar, así como p.p. de pequeño material y accesorios, totalmente la unidad terminada.</p> <p style="text-align: right;">Total</p> | 1.00 | 150.00 € | 150.00 € |
| 3.04 | <p>ud. Soporte para los módulos fotovoltaicos Soporte de hormigón para cubierta plana, fácil instalación con 12º de inclinación.incluye l toda la mano de obra, maquinaria, medios auxiliares y pequeño material necesarios para su completa instalación e implementación.</p> <p style="text-align: right;">Total</p> | 12.00 | 50.00 € | 600.00 € |
| 3.05 | <p>ud. Instalación eléctrica FV Se incluye la instalación eléctrica necesaria y pequeño material para su conexión a la red de la vivienda. A incluir: -Canalizaciones -Cuadro CA: proteccion magnetotermica y diferencial superinmunizado clase A. -Cuadro CC: fusibles y sobretensiones. - Cableado CC de 4 mm2 rojo y negro incluidos material auxiliar, así como p.p. de pequeño material y accesorios, totalmente la unidad terminada.</p> <p style="text-align: right;">Total</p> | 1.00 | 1.500.00 € | 1.500.00 € |
| TOTAL CAPÍTULO 3 | | | | 4.570.00 € |
| CAPÍTULO 4: OTROS | | | | |
| 4.01 | <p>ud. Sistema de control Sistema de control que incluye deelay Relé y pequeño plc para activar los modos noche / día respectivamente y la alimentación de la electroválvula cuando el depósito baje su nivel de llenado. Incluidos material auxiliar, así como p.p. de pequeño material y accesorios, totalmente la unidad terminada.</p> <p style="text-align: right;">Total</p> | 1.00 | 350.00 € | 350.00 € |

| | | | | | |
|---|---|-------|------|----------|--------------------|
| 4.02 | ud. Instalación eléctrica para bombas Cuadro eléctrico de alimentación y cableado necesario para alimentar los componentes eléctrico de la instalación hidráulica. Incluidos material auxiliar, así como p.p. de pequeño material y accesorios, totalmente la unidad terminada. | Total | 1.00 | 600.00 € | 600.00 € |
| 4.03 | ud. Revisión final y puesta en marcha Comprobación del funcionamiento de los sistemas y su implementación. Puesta en marcha. | Total | 1.00 | 400.00 € | 400.00 € |
| TOTAL CAPÍTULO 4 | | | | | 1.350.00 € |
| TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL | | | | | 12.572.00 € |
| TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL | | | | | 12.572.00 € |
| GASTOS GENERALES + BENEFICIO INDUSTRIAL (19%) | | | | | 2.388.68 € |
| TOTAL PRESUPUESTO GENERAL | | | | | 14.960.68 € |

Tabla 1. Presupuesto de la instalación

2.4 Conclusiones

Una vez analizado los dos proyectos de referencia con mayor detalle (Cartuja Qanat y WaterCool) se puede obtener la información necesaria para plantear la propuesta tecnológica concreta objeto de este estudio.

Dicha propuesta se trata de una solución “tipo comercial” quedando asentadas las bases de la solución para ahora estudiar su implantación real y estudiar, de manera detallada, si es viable dicha propuesta.

Para ello se realizará una simulación en una vivienda tipo real, y se calculará numéricamente los datos de la instalación en cuanto a consumo y ahorro energético para posteriormente estudiar su viabilidad económica con respecto al presupuesto estimado de la instalación.

híbrido fotovoltaico + falling film.

Una manera de realizar esta estimación es atendiendo a lo propuesto por Red Eléctrica de España en su proyecto Indel donde se expone un Atlas de consumo en base al estudio de hogares españoles. A partir de unos porcentajes del reparto de consumo horarios en función de unos parámetros como la localización, edad de los habitantes, personas ocupadas laboralmente y la población de la localidad podemos establecer a partir de los datos globales datos particulares.

Aunque es obvio que no aporta la misma certeza los datos de consumo real horario a los estimados, resulta muy útil esta herramienta cuando no se cuenta con equipos modernos de teled medida.

En el presente perfil de consumo, se ha incluido el consumo de las bombas y equipos electrónicos necesarios para la tecnología falling-film.

En este caso se parte del siguiente perfil de consumo:

| MES | kWh |
|-------------|--------------------|
| Enero | 350 |
| Febrero | 300 |
| Marzo | 350 |
| Abril | 320 |
| Mayo | 400 |
| Junio | 600 |
| Julio | 600 |
| Agosto | 450 |
| Septiembre | 400 |
| Octubre | 350 |
| Noviembre | 350 |
| Diciembre | 350 |
| 4770 | Total anual |

Tabla 2. Consumos medios mensuales vivienda tipo

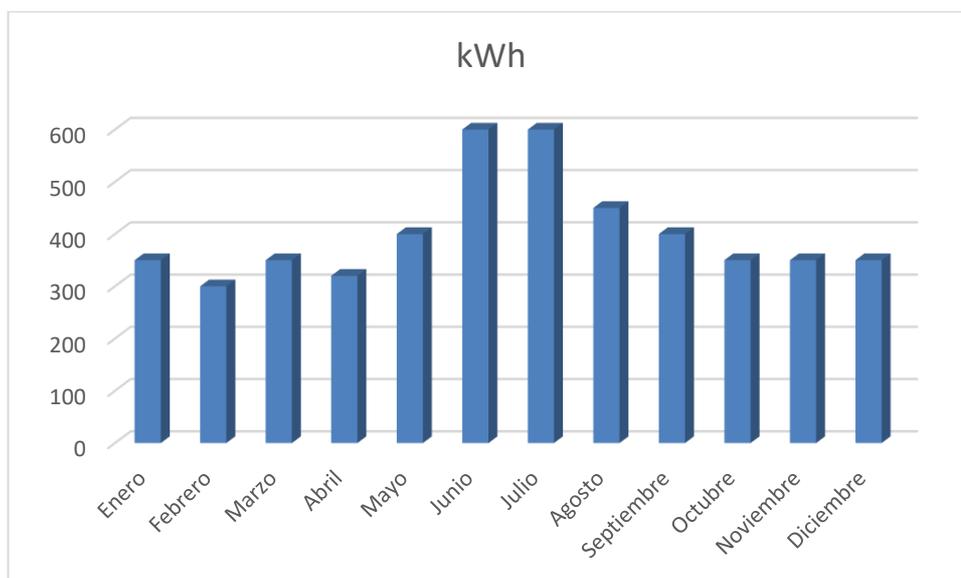


Figura 33. Consumos medios mensuales vivienda tipo

Estos consumos divididos en horas en base al estudio de Red Eléctrica anteriormente comentado dejan un consumo diario de este tipo:

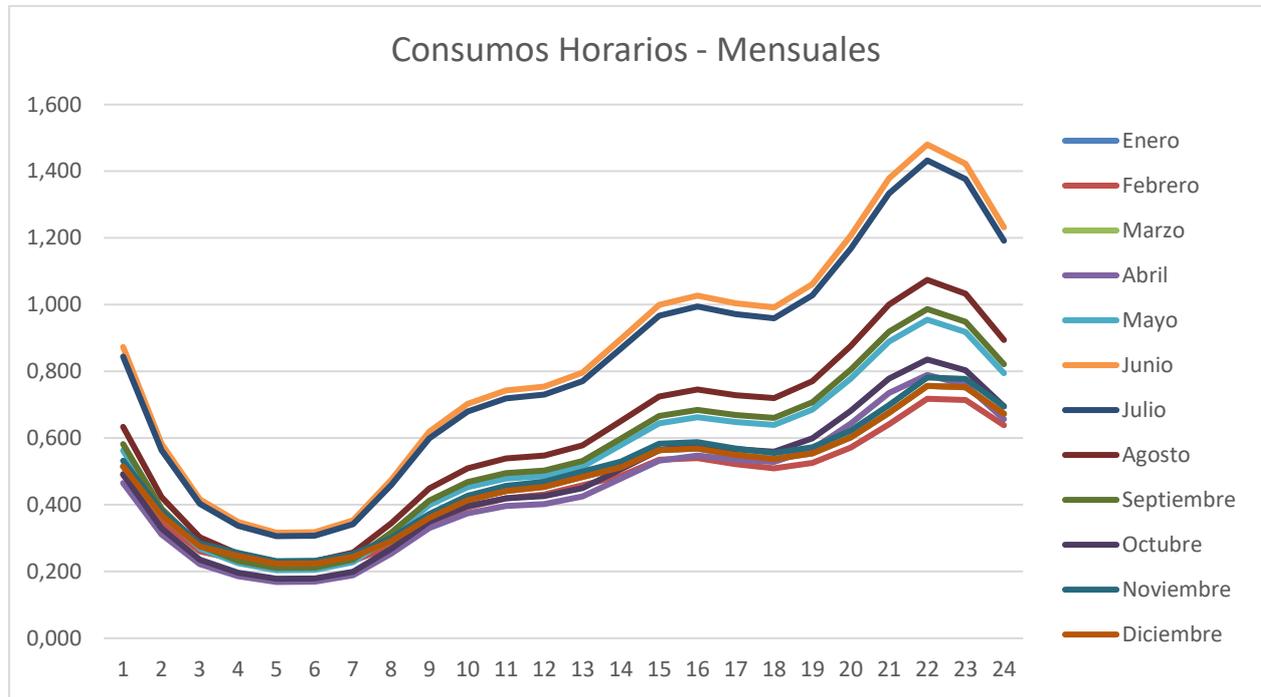


Figura 34. Consumo horarios de un día tipo y por meses

Estos datos de consumo horarios serán los utilizados más adelante para los cálculos.

- Consideración 3: la vivienda cuenta con sistema de refrigeración convencional (Fan-Coil) para las demandas que no puedan satisfacerse con el nuevo sistema falling-film.

Se establece que la vivienda en cuestión cuenta desde el inicio con sistema convencional de refrigeración con las siguientes características:

| | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Caudal impulsión kg/s | |
| 1,6813 | |
| Tª consigna aire ventilación | Eficiencia UTA |
| 25 °C | 0,85 |
| Hora inicial | Consigna apagado depósito |
| 15:00 h | 32 °C |
| Hora fin | |
| 23:40 h | |

Tabla 3. Consideraciones del sistema falling-film

- Consideración 4: el sistema de refrigeración será necesario en los días comprendidos entre el 01/05 y 30/09.

El sistema de refrigeración se diseña principalmente para verano y semanas anteriores según las necesidades

climáticas y el histórico de temperaturas consultado en la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet).

- Consideración 5: las horas de funcionamiento del sistema de refrigeración en la vivienda serán de 15:00 h a 23:40 h

Se establece que las necesidades de refrigeración del habitáculo de la vivienda surgen en dicha franja horaria.

- Consideración 6: las horas de funcionamiento del sistema falling film serán de 00:00 h a 9:00 h

En dicha franja horaria se bombeará el agua desde el depósito a los paneles.

- Consideración 7: la temperatura consigna de aire de ventilación en la vivienda será de 25 °C

- Consideración 8: el sistema falling-film no funcionará si el depósito alcanza una temperatura igual o superior a 32 °C

Si el depósito tiene una temperatura demasiado alta, no tendrá sentido utilizar el agua para la refrigeración.

3.2 Modelo de producción de frío

Teniendo ya la propuesta tecnológica definida en el capítulo 2, se resumen los datos más importantes:

Se va a utilizar una hoja de Excel donde se estima que proporción de calor de referencia del local (vivienda) es posible evacuar gracias al sistema de falling-film.

Para ello se cuenta con los siguientes datos experimentales aportados por grupo de Termotecnia de la universidad de Sevilla en el cual se desarrolla un modelo simplificado para la evaluación de los módulos solares en la zona climática seleccionada (Sevilla) [3].

Los datos están comprendidos desde mayo a septiembre del año 2015 en periodos de diez minutos, siendo dichos datos los siguientes:

- Temperatura seca exterior (°C)
- Temperatura de cielo (°C)
- Calor de referencia del local (W)
- Temperatura de bulbo húmedo (°C)

A parte de las premisas generales consideradas previamente, en el modelo de producción de frío, más concretamente se tomarán las siguientes condiciones iniciales:

- Para calcular el caudal impulsado se supondrá una diferencia de temperatura 15 °C.
- El caudal impulsado se calculará con el máximo valor del calor de referencia del local.
- El rendimiento de refrigeración nominal es $EER_{nom} = 3$.
- La temperatura del aire en el interior de la vivienda la supondremos estable y a 25 °C ($T_{int} = 25^{\circ}C$)
- Calor específico del aire de $C_{paire} = 1005 J/kg$
- Calor específico del agua de $C_{pagua} = 4178 J/kg$
- La densidad del agua es $\rho = 1000 kg/m^3$
- Volumen del depósito del falling-film de $V = 5 m^3$
- Se suponen los mismos coeficientes que en el estudio “Falling-film as natural cooling technique: Modelling and energy impact assessment” de los profesores de la universidad de Sevilla [2].

| | | |
|--|--------------------------|-------|
| Coefficiente evaporativo convectivo cuando predomina la zona evaporativa | hcv (W/m ² K) | 5 |
| Coefficiente evaporativo convectivo cuando predomina la zona radiante | hr (W/m ² K) | 5 |
| Coefficiente radiante | he (W/m ² K) | 33.11 |

Tabla 4. Coeficientes de estudio falling-film

3.2.1 Base teórica de cálculo

A pesar de que no es la esencia de este trabajo el estudio de la base de cálculo de la tecnología falling-film, basándose en otros trabajos del departamento de ingeniería energética de la Universidad de Sevilla, se procede a comentar sus fórmulas elementales.

El marco teórico del sistema de disipación nocturna está basado en la fórmula desarrollada por Duffie y Beckmann para calcular la temperatura del agua en un captador solar [4]. Si el balance energético se realiza en un sistema falling-film en el que suponemos que está completamente aislado en la superficie inferior, la variación

energética del agua se refiere a las pérdidas de calor por convección y radiación con el ambiente exterior ($Q_{cv} + Q_{rad}$) y también al fenómeno de enfriamiento por evaporación cuando el aire y el agua están en contacto directo ($Q_{evaporative}$) favoreciendo la disipación de calor. [2].

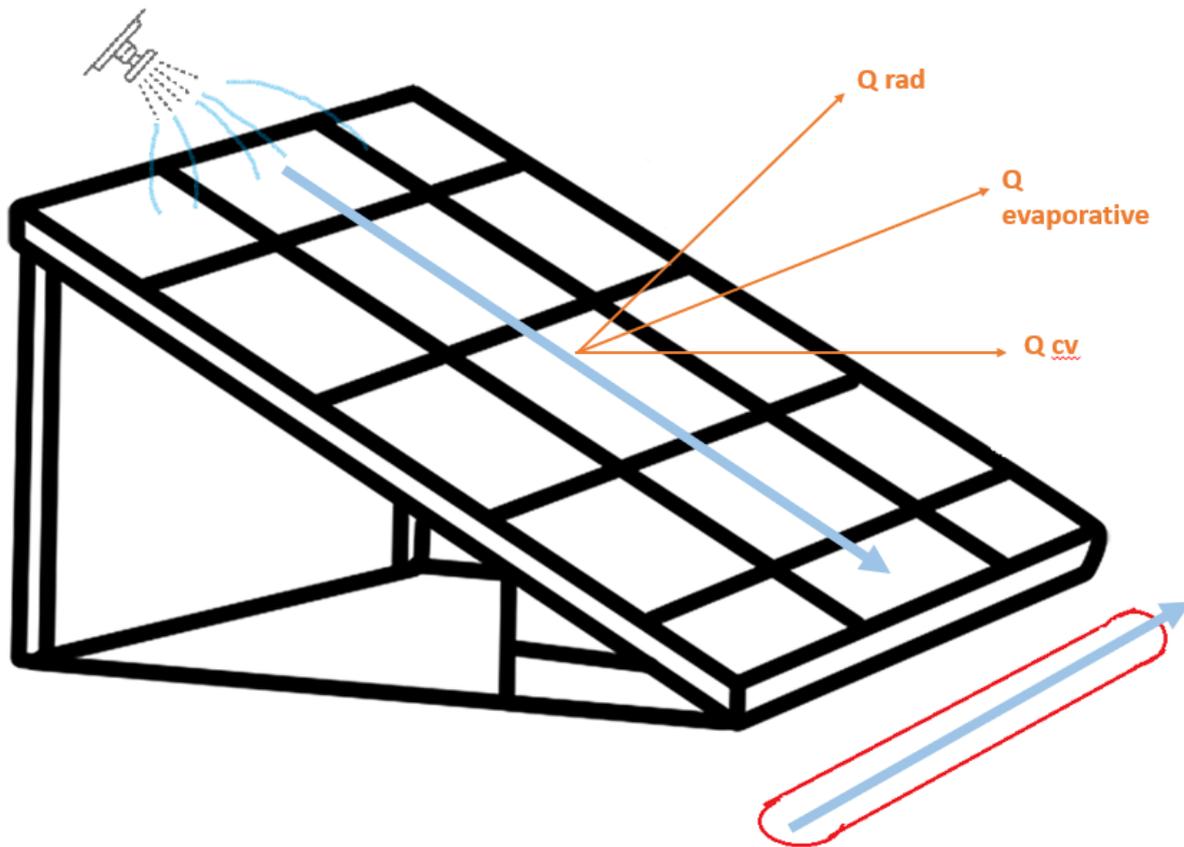


Figura 35. Funcionamiento sistema falling-film en el módulo fotovoltaico

Por lo tanto, el balance de energía será:

$$-mv * Cpw * (dT_w / dx) = Q_{cv} + Q_{rad} + Q_{evaporative}$$

Siendo,

- mv , el flujo de agua que circula por la superficie inclinada
- Cpw , el calor específico del agua
- dT_w / dx , donde T_w es la temperatura del agua

Si desarrollamos los flujos de calor del balance observamos:

$$Q_{cv} = h * A * (T_w - T_a)$$

$$Q_{rad} = A * F_{sky} * \sigma * \epsilon * (T_w^4 - T_{sky}^4) + A * F_{downflow-surroundings} * \sigma * \epsilon * (T_w^4 - T_{surroundings})$$

$$Q_{evaporative} = m_{evap} * h_{fg}$$

Siendo,

- A , el área de transferencia de disipación del sistema.
- T_a , la temperatura del aire.
- T_{sky} , la temperatura del cielo.
- $T_{surroundings}$, la temperatura de los alrededores.
- F_{sky} , el factor de forma del flujo de agua con el cielo.
- $F_{downflow-surroundings}$, el factor de forma del flujo de agua con los alrededores. –
- $\epsilon = 0.9$, la emisividad de la superficie de intercambio radiante.
- m_{evap} , el flujo de agua que se evapora.
- h_{fg} , el calor latente de evaporación.

La caracterización simplificada de los flujos de transferencia de calor producidos en el sistema de película de agua descendente se basa en la expresión teórica del enfriamiento de un líquido a lo largo de una longitud L , que se formula en

$$T_L = T_\infty - (T_\infty - T_0) * e^{-(UP/pmCp)*L}$$

Donde,

- T_L es la temperatura del agua cuando recorre la longitud L .
- T_∞ es la temperatura de equilibrio o estancamiento.
- T_0 la temperatura inicial al inicio del enfriamiento.
- U es el coeficiente global de la transferencia de calor.
- P el ancho del sistema de disipación.
- L es la longitud de del sumidero.

Para simplificar el modelo se va a tratar el calor convectivo y el evaporativo como un solo flujo de calor.

$$Q = Q_{cv} + Q_{rad} + Q_{evaporative} \rightarrow Q = Q_{rad} + Q_{cv-evaporative}$$

Desarrollando tenemos que:

$$Q_{cv-evaporative} = h_{cv-evaporative} * A * (T_w - T_{wb})$$

$$Q_{rad} = h_{rad} * A * (T_w - T_{sky})$$

$$hrad = 4 * \sigma * \epsilon * ((Tw + Tsky) / 2)^3$$

$$Q = hcv\text{-}evaporative * A * (Tw - Twb) + hrad * A * (Tw - Tsky)$$

$$Q = (hcv\text{-}evaporative + hrad) * A * (Tw - ((hcv\text{-}evaporative * Twb + hrad * Tsky) / (hcv\text{-}evaporative + hrad)))$$

Siendo,

- *hcv-evaporative* el coeficiente de transferencia de calor convectivo-evaporativo ($W / m^2 \text{ } ^\circ C$).

- *hrad* el coeficiente de transferencia de calor radiante ($W / m^2 \text{ } ^\circ C$).

- *Twb* la temperatura del bulbo húmedo ($^\circ C$).

De esta manera, se puede calcular la cantidad de calor que se puede evacuar gracias al sistema falling-film.

3.2.2 Análisis del modelo de producción de frío

A continuación, y una vez establecida la base de cálculo, se analiza la evolución de los diferentes parámetros a estudiar. Estos parámetros son los inputs de partida facilitados por el grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla [2].

Evolución temperaturas del cielo

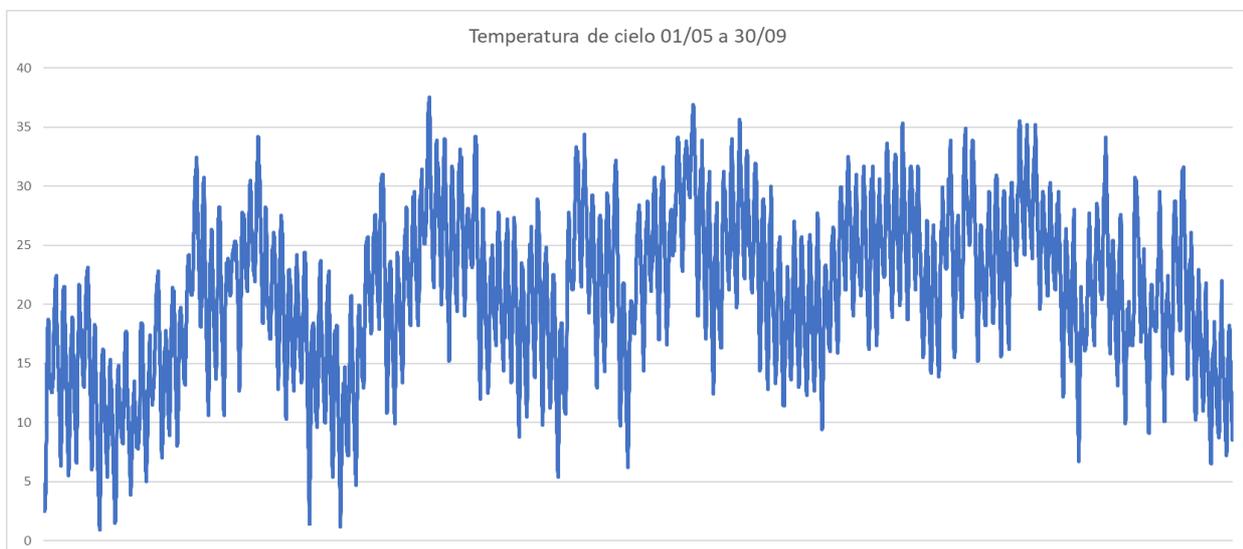


Figura 36. Evolución de temperaturas del cielo

Evolución temperaturas de bulbo húmedo

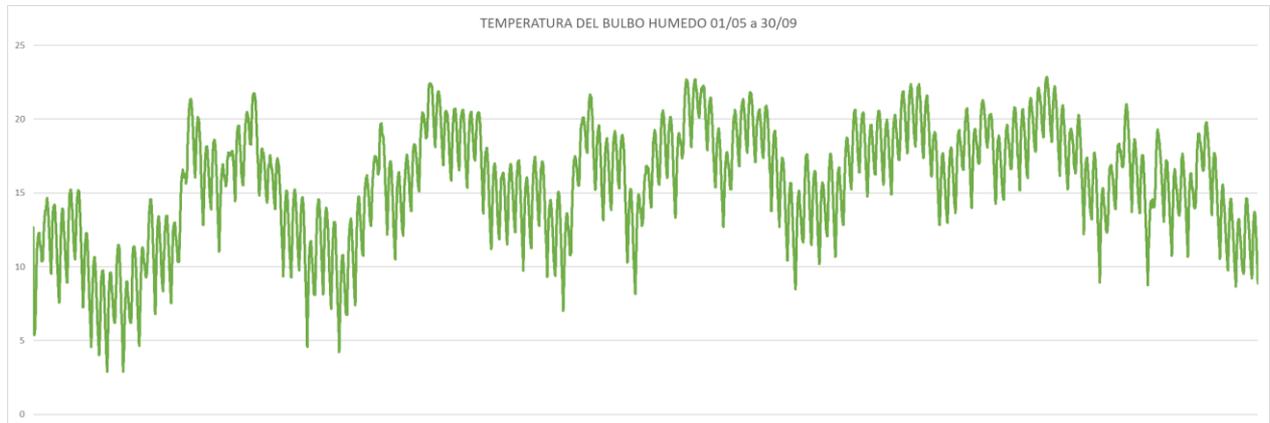


Figura 37. Evolución temperaturas de bulbo húmedo

Evolución temperaturas exterior seca

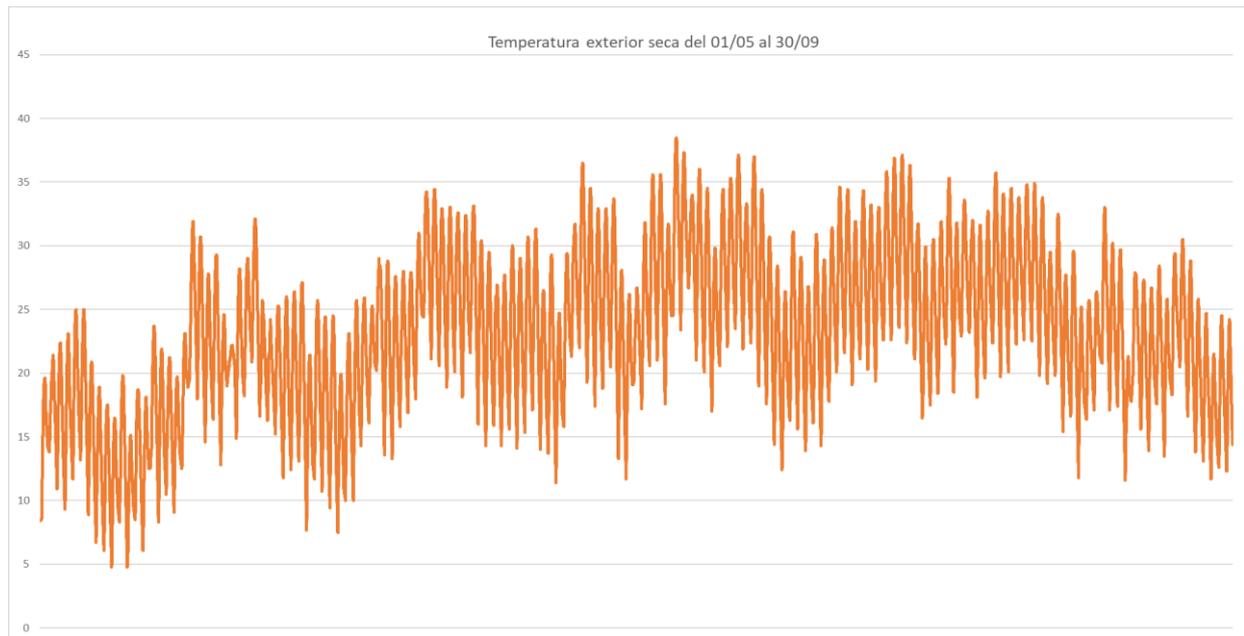


Figura 38. Evolución temperaturas exterior seca

3.2.2.1 Análisis del caso principal de estudio (5 m³)

A continuación, se estudia como quedan los outputs derivados de las consideraciones del caso principal de estudio ya comentadas al comienzo de esta sección 3.2. Es importante hacer especial atención al volumen del depósito seleccionado (5m³), ya que posteriormente se va a estudiar la variación de temperaturas en el caso de elegir un depósito de mitad de capacidad (2,5 m³), y otro del doble (10 m³).

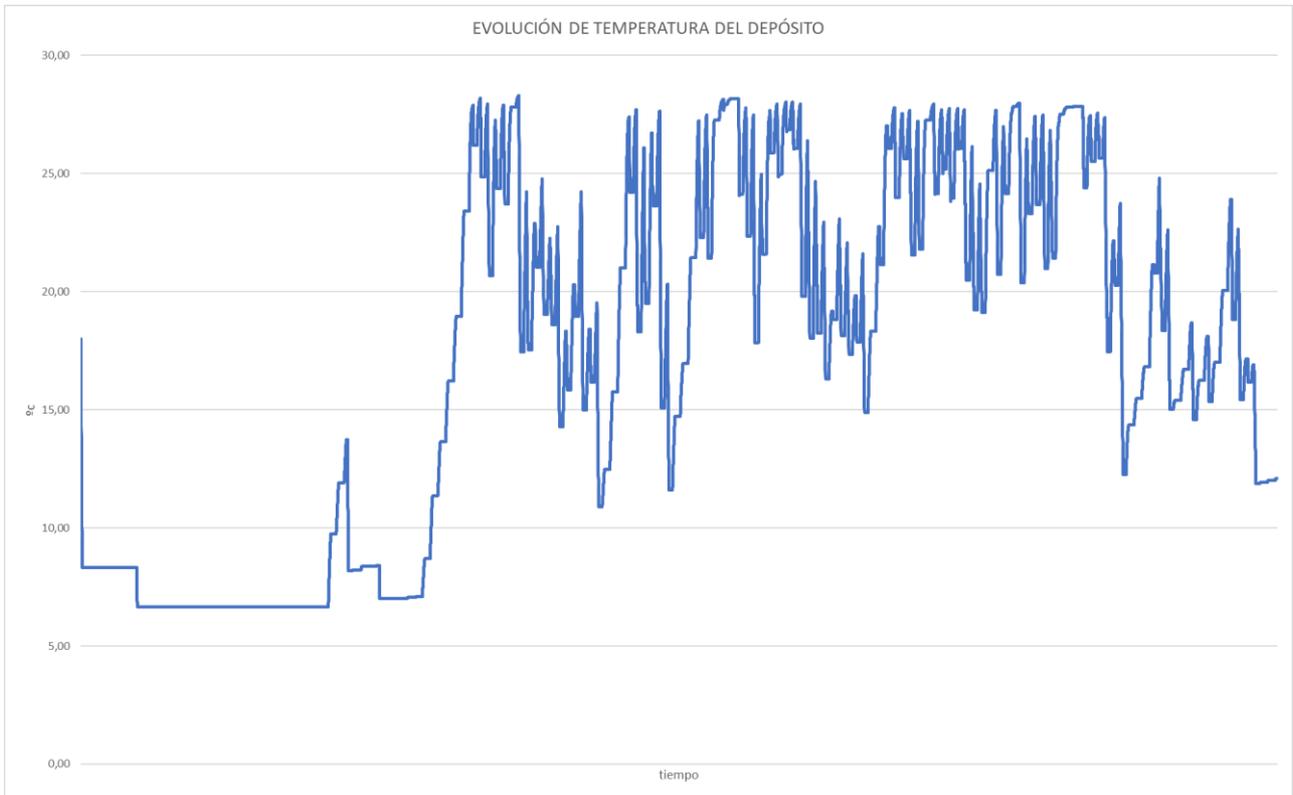


Figura 39. Evolución temperaturas de depósito (5 m3)

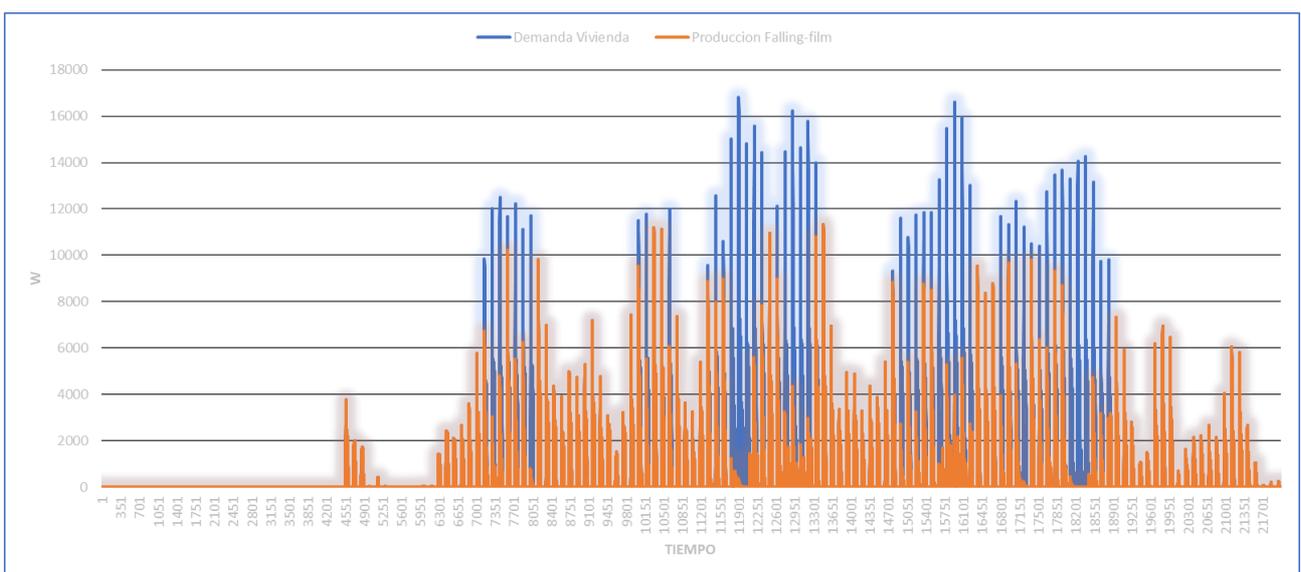


Figura 40. Demanda de producción de frío de la vivienda VS producción de frío sistema falling-film (5 m3)

| | |
|--|------|
| Demanda de producción de la vivienda (kWh) | 1543 |
| Producción falling-film 5 m ³ (kWh) | 925 |

Tabla 5. Producción falling-film depósito 5 m³

3.2.2.2 Análisis del caso doble capacidad en depósito (10 m³)

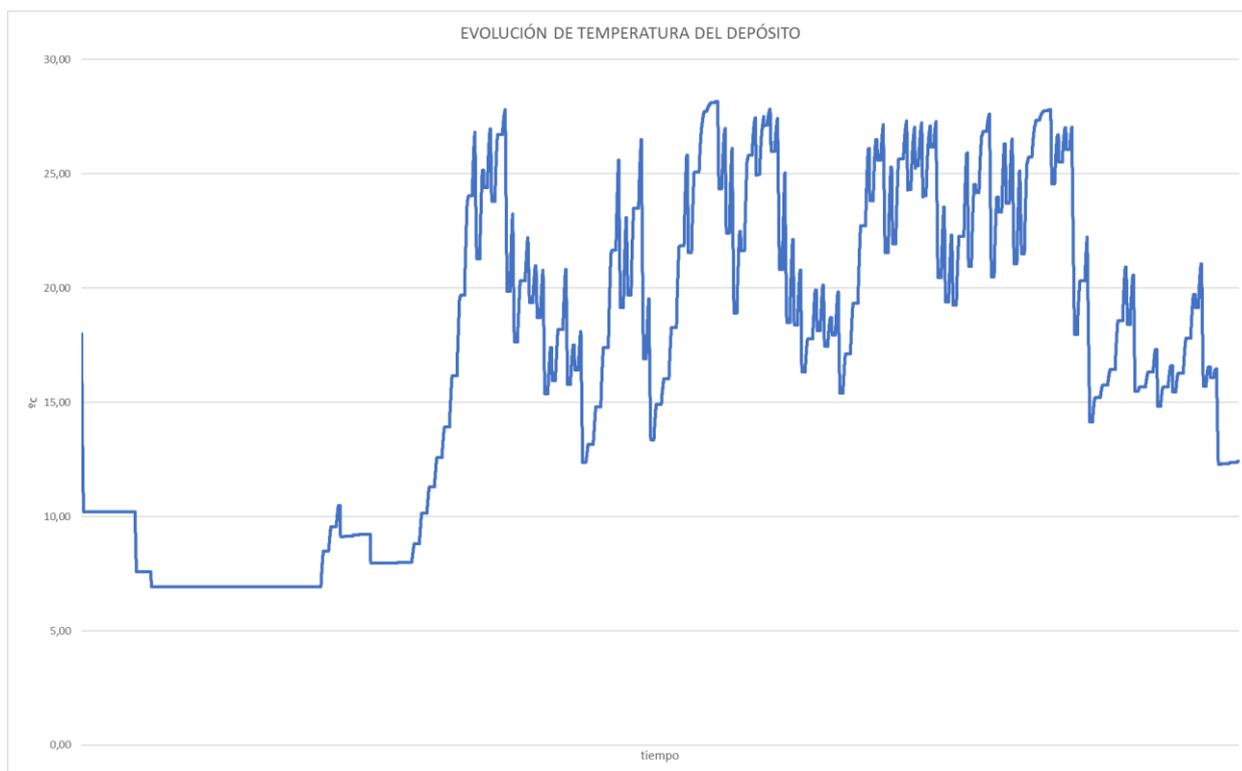


Figura 41. Evolución temperaturas de depósito (10 m³)

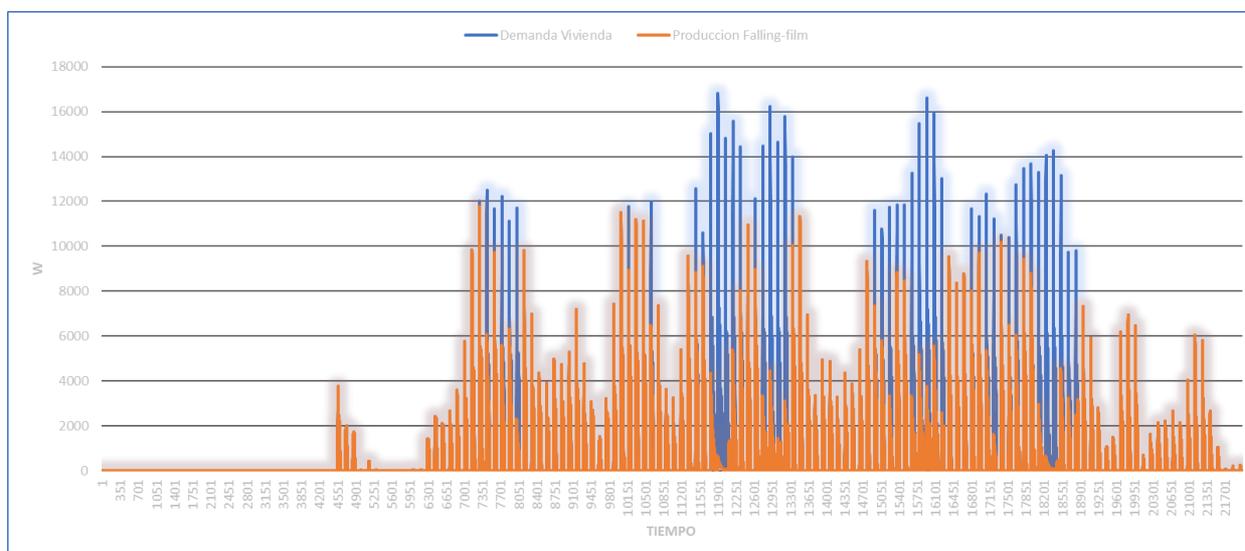


Figura 42. Demanda de producción de frío de la vivienda VS producción de frío sistema falling-film (5 m³)

| | |
|---|------|
| Demanda de producción de la vivienda (kWh) | 1543 |
| Producción falling-film 10 m ³ (kWh) | 1139 |

Tabla 6. Producción falling-film depósito 10 m3

3.2.2.3 Análisis del caso mitad capacidad en depósito (2,5 m³)

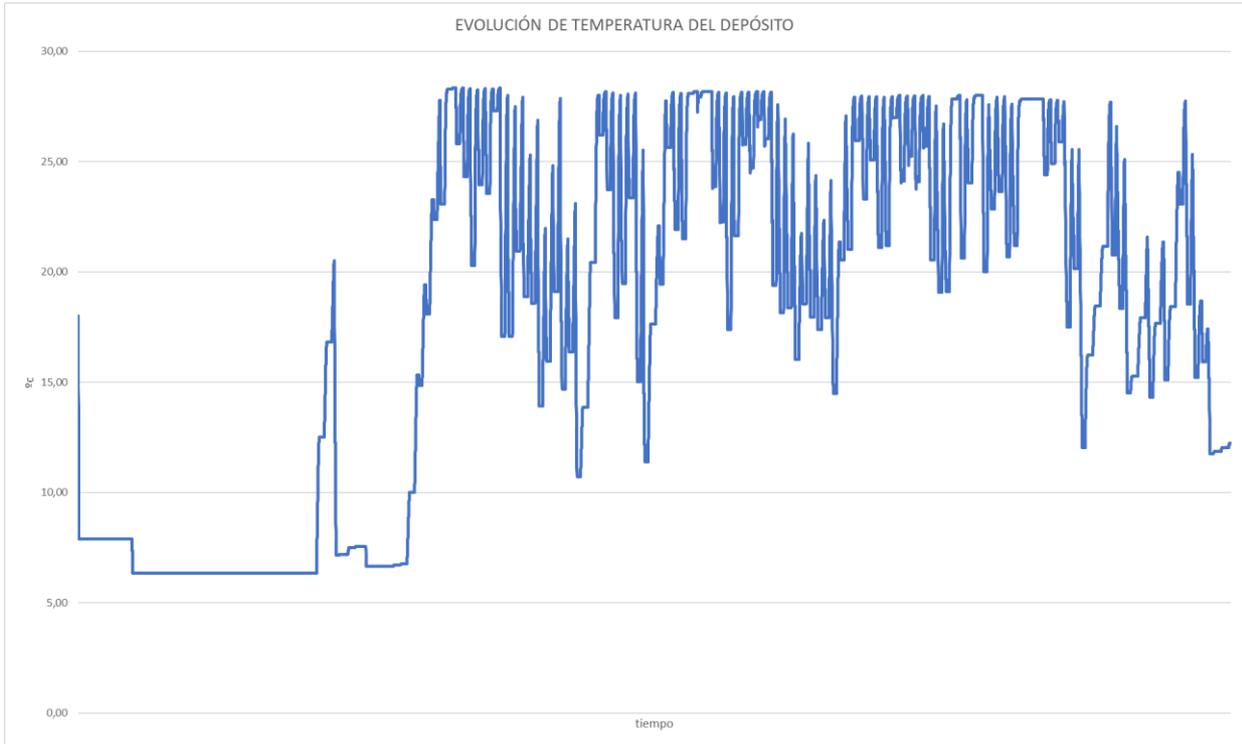


Figura 43. Evolución temperaturas de depósito (2,5 m3)

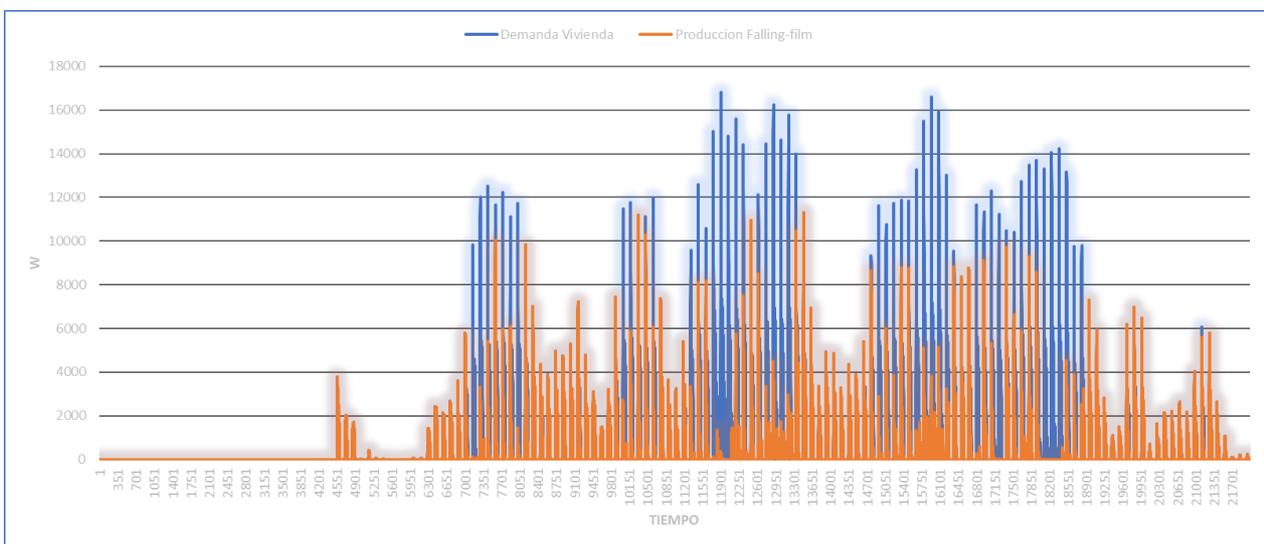


Figura 44. Demanda de producción de frío de la vivienda VS producción de frío sistema falling-film (2,5 m3)

| | |
|--|------|
| Demanda de producción de la vivienda (kWh) | 1543 |
| Producción falling-film 2,5 m ³ (kWh) | 698 |

Tabla 7. Producción falling-film depósito 2,5 m³

3.2.2.4 Comparación de la variación de capacidad de depósito

Como se ha podido comprobar, el depósito seleccionado es capaz de cubrir prácticamente un 60% de la demanda.

Un depósito mayor aumenta la producción de frío proveniente del sistema de falling-film, pero conlleva una instalación y costes asociados mayores.

Por otro lado, con un depósito de mitad de volumen también se cubre un importante porcentaje de la demanda de frío. Será cuestión particular de cada caso que volumen de depósito puede resultar más beneficioso.

En el caso expuesto, se tiende a seleccionar el de 5 m³, buscando una solución universal aplicable a la mayoría de viviendas unifamiliares.

| | kWh | % |
|--|------|-------|
| Demanda de producción de la vivienda | 1543 | 100 |
| Producción falling-film 5 m ³ | 925 | 59,95 |
| Producción falling-film 10 m ³ | 1139 | 73,82 |
| Producción falling-film 2,5 m ³ | 698 | 45,24 |

Tabla 8. Comparativa de producción de frío con diferente volumen de depósito

3.3 Modelo de producción de energía fotovoltaica

Para poder simular la cantidad de energía que pueden producir los paneles fotovoltaicos instalados hay que entender previamente cómo funciona la tecnología fotovoltaica.

Para la ubicación de los módulos, la mejor orientación en cuanto a producción total es al Sur en zona libre de sombras y corrigiendo la latitud del lugar con una inclinación adecuada para que los rayos solares incidan perpendicularmente en su superficie.

Aunque esta filosofía se tome como norma, hay que tener en cuenta que no siempre será lo más conveniente. En los casos en que el consumo esté más extendido en un tramo concreto del día o en una de las épocas del año será adecuado intentar maximizar la producción en esos momentos. Para ello se puede jugar con la inclinación (incidencia en épocas del año) y la orientación (incidencia en las horas del día).

En el caso concreto que nos ocupa, se contará con orientación sur perfecta y con una inclinación de 12° (aportados por el soporte seleccionado).

3.3.1 Simulación de la producción de energía

Se procede a estimar la producción de energía por m² y hora para compararlo con el consumo y establecer que número de paneles es el adecuado tanto desde el punto de vista del consumo, como el económico.

Existen diferentes fuentes a las que acudir para obtener los datos de radiación solar en el lugar de la instalación. Entre las más conocidas encontramos PVGIS, base de datos de ámbito europeo.

En este caso, se opta por utilizar una base de datos local que ofrece la Agencia Andaluza de la Energía. Los valores que se proporcionan pertenecen a años típicos meteorológicos y radiométricos obtenidos a partir de las bases de datos de valores medidos en estaciones de tierra y valores estimados a partir de imágenes de satélite.

Agencia Andaluza de la Energía
CONSEJERÍA DE INNOVACIÓN, CIENCIA Y EMPRESA

Radiación Solar

Resumen de su consulta >> Loc. Sevilla
Est. La Rinconada

Seleccionar localización

Desde esta opción podrá seleccionar la localización sobre la que desea efectuar la consulta de los datos, para ello dispone de varios métodos de búsqueda. Puede señalar una posición sobre el mapa, buscar una localidad por su nombre, seleccionar una estación, o introducir directamente las coordenadas deseadas.

LOCALIZACIÓN SELECCIONADA

Localidad de Sevilla

Latitud: 37.383
Longitud: -5.983

Localidad más cercana al punto seleccionado de la que se disponen datos de satélite.

Estación de La Rinconada

Latitud: 37.458
Longitud: -5.924

Estación de medidas en tierra más cercana al punto seleccionado.

Coordenadas geográficas

Latitud:

Longitud:

Localidades

Texto:

Estaciones

Ver mapas satélite

Una vez introducidas las coordenadas de la instalación se debe introducir los parámetros propios de la instalación.

Figura 45. Introducción de datos de radiación

De esta manera se obtiene un archivo Excel con la radiación media en Wh/m² desglosado por horas para cada día del año. Al mismo Excel le colocamos ya el consumo por horas visto en el apartado 3.1.

azimut 0º S

| Fecha | Hora Inicio | Consumo (kWh) | Radiación 1 (Wh/m ²) |
|------------|-------------|---------------|----------------------------------|
| 2015/01/01 | 0 | 0,515 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 1 | 0,369 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 2 | 0,275 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 3 | 0,248 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 4 | 0,224 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 5 | 0,224 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 6 | 0,245 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 7 | 0,291 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 8 | 0,361 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 9 | 0,413 | 76,1 |
| 2015/01/01 | 10 | 0,442 | 195,0 |
| 2015/01/01 | 11 | 0,454 | 300,8 |
| 2015/01/01 | 12 | 0,484 | 382,4 |
| 2015/01/01 | 13 | 0,512 | 409,9 |
| 2015/01/01 | 14 | 0,564 | 382,4 |

| | | | |
|------------|----|-------|-------|
| 2015/01/01 | 15 | 0,569 | 300,8 |
| 2015/01/01 | 16 | 0,550 | 195,0 |
| 2015/01/01 | 17 | 0,537 | 76,1 |
| 2015/01/01 | 18 | 0,554 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 19 | 0,602 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 20 | 0,676 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 21 | 0,757 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 22 | 0,752 | 0,0 |
| 2015/01/01 | 23 | 0,673 | 0,0 |

Tabla 9. Radiación media

El siguiente paso es calcular a partir de la radiación solar la producción que se puede obtener a partir de un número concreto de módulos fotovoltaicos y con unas características del panel conocidas.

En esta instalación las características son ya conocidas, 10 módulos de 550 W, dando un total de 5500 W.

Conociendo ya la potencia de los módulos se procede a pasar la radiación a producción a través de la siguiente formula:

$$Prod (kWh) = \frac{n \times Wp (W) \times HSP(h) \times Ef}{1000}$$

Siendo,

n: número de módulos

Wp: potencia del módulo

HSP: Horas de sol pico

Ef: eficiencia del panel

HSP es el número de horas equivalente que tendría que brillar el sol a una intensidad de 1000 W /m² para obtener la insolación total de esa hora. Por ello se define como la radiación entre intensidad solar:

$$HSP (h) = \frac{Radiación\ global(Wh/m^2)}{1000\ W/m^2}$$

La eficiencia se estima en un 85% teniendo en cuenta ensuciamiento y deterioro establecido por el fabricante.

Se tendrá en cuenta las restricciones de espacio y número de paneles máximos en serie para cada orientación establecidos por los inversores de continua a alterna que se elijan.

Para establecer un primer cálculo y estudiar la viabilidad del proyecto se deben definir algunos términos y tener claras ciertas ideas.

Se tiene que diferenciar entre autoconsumo y autosuficiencia, siendo el primero, del total que producimos,

cuanto se consume directamente en la vivienda.

La autosuficiencia en cambio se define como la proporción del consumo de la vivienda que se puede suplir con la instalación generadora sin necesitar red.

A la parte que se genera y no se consume directamente en la vivienda se le llama excedente.

Este excedente se vierte a la red y la comercializadora bonifica a un precio por kWh generado.

La bonificación se descuenta del precio de los kWh de energía consumidos de la red, no siendo posible una factura negativa o favorable al consumidor. Dado el caso de llegar a la compensación máxima, se tratarán de excedentes que se inyectan a la red y no son compensables.

El precio al que compra la comercializadora siempre será bastante más reducido que al que vende, por ello no interesa tener demasiados excedentes y ajustar nuestra producción al autoconsumo en mayor medida.

Otro punto importante a tener en cuenta es que la compensación con excedentes estipulada en el RD 244/2019 establece como requisito que dicha compensación se realice mes a mes, esto quiere decir que en el caso que la producción supere mucho al consumo la mayor parte se transformará en excedentes no compensables.

El proceso de cálculo es sumar la producción total que generarían todos los módulos y compararlo con el consumo hora a hora y realizando el sumatorio mensual. De igual manera se calcula el nivel de autoconsumo, autosuficiencia y los excedentes.

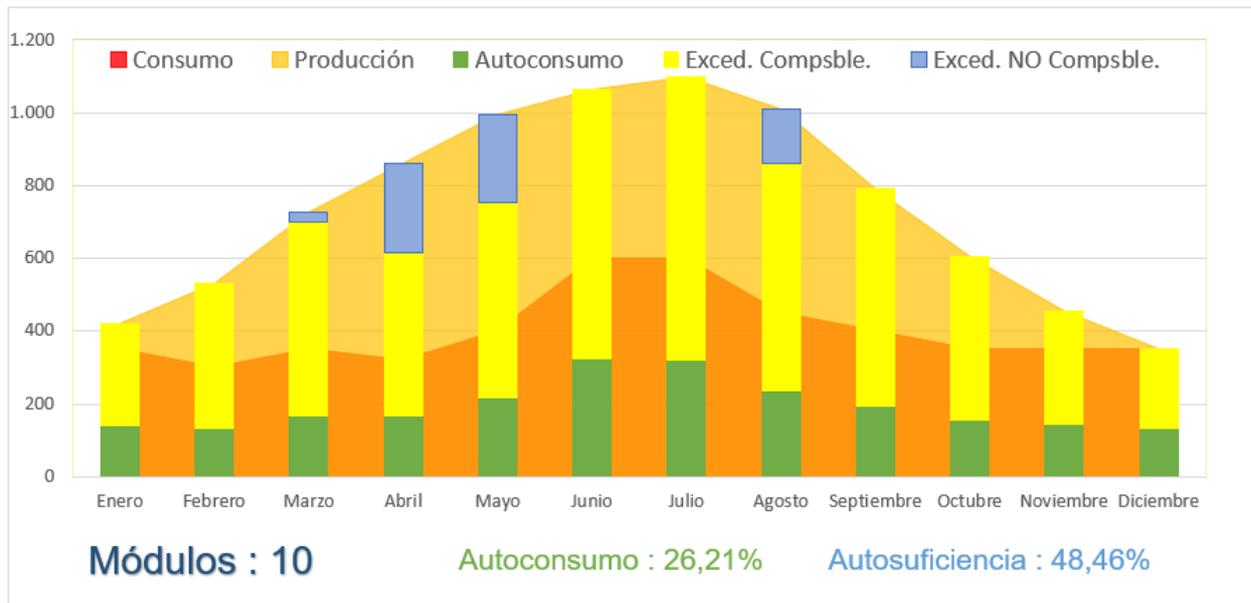


Figura 46. Análisis de consumo con 10 módulos.

Es importante discernir entre los períodos horarios eléctricos, para ver en cuales se produce/consume la energía y así realizar un cálculo lo más fidedigno posible a la realidad. Estos periodos están establecidos de la siguiente forma en la actualidad:



Figura 47. Horarios tarifas eléctricas

De esta manera, la producción fotovoltaica recogida en datos mensuales queda así:

Producción mensual

| Modulos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | |
|------------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|-------|-----|
| 10 | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | | |
| P1 | 230 | 283 | 374 | 438 | 498 | 531 | 550 | 511 | 406 | 318 | 247 | 195 | 4.579 | 51% |
| P2 | 191 | 250 | 350 | 417 | 480 | 513 | 531 | 490 | 383 | 287 | 209 | 157 | 4.260 | 48% |
| P3 | 0 | 0 | 1 | 7 | 15 | 20 | 18 | 11 | 2 | 0 | 0 | 0 | 74 | 1% |
| Producción | 421 | 533 | 725 | 862 | 993 | 1.065 | 1.099 | 1.011 | 791 | 605 | 456 | 352 | 8.913 | kWh |

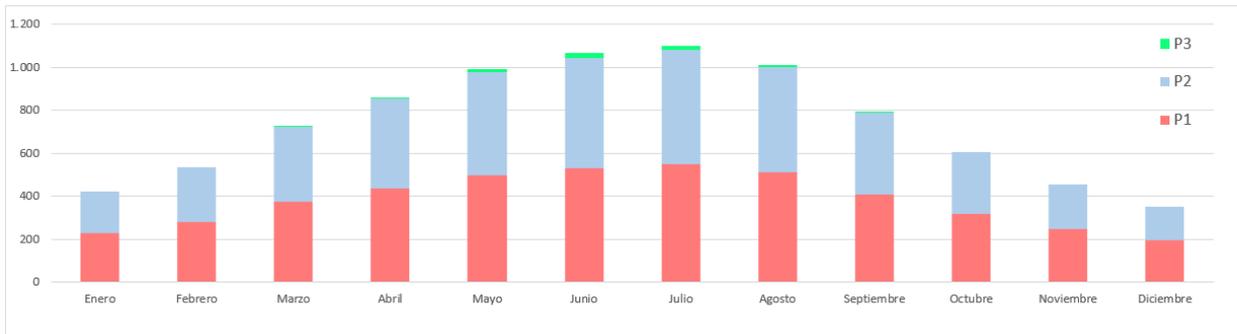


Figura 48. Producción fotovoltaica mensual

El consumo, teniendo en cuenta la instalación falling-film:

Consumo mensual

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | |
|---------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|-------|-----|
| | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | | |
| P1 | 139 | 119 | 139 | 133 | 166 | 250 | 250 | 187 | 166 | 146 | 139 | 139 | 1.972 | 41% |
| P2 | 153 | 131 | 153 | 142 | 177 | 266 | 266 | 200 | 177 | 155 | 153 | 153 | 2.127 | 44% |
| P3 | 58 | 50 | 58 | 45 | 56 | 84 | 84 | 63 | 56 | 49 | 58 | 58 | 721 | 15% |
| Consumo | 350 | 300 | 350 | 320 | 400 | 600 | 600 | 450 | 400 | 350 | 350 | 350 | 4.820 | kWh |

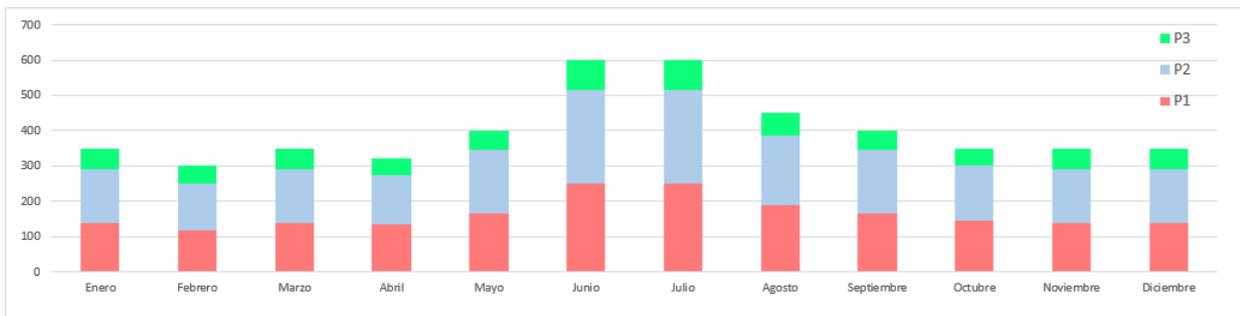


Figura 49. Consumo mensual

De esta manera, queda definida la producción y el consumo eléctrico de la planta fotovoltaica para poder ahora añadir el sistema de hibridación de producción de frío (falling-film) y estudiar, a partir de estos datos, su implantación.

3.4 Estudio del sistema híbrido

En la presente sección se va a estudiar la interacción del sistema de producción de energía fotovoltaico y el de producción de frío falling-film

3.4.1 Datos

Una vez obtenido de un lado el modelo de producción de frío, y de otro, el modelo de producción del sistema fotovoltaico se procede a combinar los datos para obtener resultados aclaratorios.

Como se comentó en el apartado 3.1, se dispone de un modelo simulado de una vivienda tipo al que, añadiendo los cálculos de producción de frío del sistema falling-film seleccionado, arrojan los siguientes datos que serán útiles en este momento:

-Q del local: necesidades frigoríficas de la vivienda. Simulada en la zona climática de estudio.

-Q falling-film: potencia frigorífica que es capaz de dar el sistema falling-film modelado.

-Q auxiliar: será la potencia necesaria a aportar por un equipo auxiliar de refrigeración.

-P auxiliar: será la potencia eléctrica a aportar por un equipo auxiliar para la refrigeración.

-Consumo con falling-film: será el consumo total de energía en la vivienda contemplando la “P auxiliar”.

-Consumo sin falling-film: será el consumo total de la vivienda sin contemplar consumos de sistema falling-film y asumiendo que toda la Q del local se aporta con la Q auxiliar de un equipo de refrigeración tradicional alimentado eléctricamente.

-Producción de energía: la producción de energía producida por la planta fotovoltaica instalada según el proceso descrito en el apartado anterior.

-Necesidad eléctrica de la red con falling-film y fotovoltaica: energía necesaria de la red teniendo activo el sistema híbrido propuesto.

-Necesidad eléctrica de la red sin falling-film y con fotovoltaica: energía necesaria de la red sin instalar el sistema falling-film pero sí la instalación fotovoltaica.

-Necesidad eléctrica de la red sin falling-film y sin fotovoltaica: energía necesaria de la red sin instalar el sistema híbrido.

Para ello se realiza una hoja Excel de elaboración propia con todos estos datos y se procede a analizar hora a hora un año natural (en este caso 2015 por contar con la simulación de este año aportadas por el departamento de ingeniería energética de la universidad de Sevilla [2]).

3.4.2 Base de cálculo del modelo

En este caso, como se ha comentado, se cuenta con datos experimentales facilitados por la Universidad de Sevilla cada 10 min desde el 01/05 al 30/09 para la simulación de la producción de frío del sistema falling-film. [2]

Esta simulación se ha particularizado para la instalación fotovoltaica propuesta y con los materiales comentados en el capítulo 2.

Por otro lado, se cuenta con los datos simulados de producción eléctrica por el sistema fotovoltaico de hora en hora y para todo el año.

El primer paso es pasar los horarios experimentales de 10 min a horarios, y de esta manera cotejar de manera adecuada como afecta durante el periodo mencionado (01/05 al 30/09) el consumo eléctrico con y sin sistema de falling-film.

Posteriormente, ya se puede hacer un análisis rápido de cómo afecta al consumo eléctrico el uso o no del sistema de falling-film.

Una vez obtenidos estos datos de consumo, se puede analizar los 3 casos de estudios diferentes para comprobar

su viabilidad económica con mayor detalle y añadiendo como afecta el beneficio de la instalación eléctrica.

El resumen de consumos eléctricos para este periodo es el siguiente:

| 01/05 al 30/09 | | | |
|--|--|--------------------------------|--|
| Consumo tipo de vivienda unifamiliar SIN refrigeración (kWh) | Consumo tipo + Q-local necesario (kWh) | Consumo con falling-film (kWh) | Ahorro eléctrico con el sistema falling-film (kWh) |
| 2450 | 3994 | 3374 | 620 |

Tabla 10. Resumen de consumos

En esta primera aproximación ya podemos observar que, sin contar la producción de energía debido a la planta fotovoltaica, ya existe un ahorro considerable en consumo eléctrico debido al sistema falling-film.

3.4.3 Casos de estudio

Una vez recopilados todos los datos necesarios, se procede a analizar diferentes situaciones claves para estudiar la viabilidad técnico-económica de la propuesta. Se mostrarán los resultados de cada uno de los casos y, finalmente, se hará una comparativa para concluir cual puede ser el mejor escenario.

Para el apartado económico se han tomado las siguientes consideraciones:

-El estudio se realiza a 25 años vista.

-Se contempla un incremento anual medio del precio de la energía de un 3,5% (valor conservador teniendo en cuenta que el IPC anual medio en los últimos 10 años ha sido de un 4%, y que el incremento de precio de la energía anual medio en los últimos 10 años ha sido de un 5%).

-Se contempla el mantenimiento del consumo del último año.

-Los precios de la potencia contratada, la energía eléctrica consumida y alquiler de equipos de medida contemplados en el estudio son los actualmente existentes.

-La T.I.R. – Tasa Interna de Retorno de la Inversión y el V.A.N.- Valor Actualizado Neto de la Inversión. han sido calculados a 25 años (vida media útil de la instalación) para una tasa del 0,1%, correspondiente al tipo de interés pasivo aplicado a depósitos a plazo a más de 2 años por las entidades de crédito en España en 09/2019.

-Se contempla una pérdida anual de producción solar de los módulos fotovoltaicos de un 0,85%.

-El Ahorro por Autoconsumo contempla el ahorro económico por la energía que se deja de consumir de la red externa.

-El Ahorro por Excedente Compensable contempla el ahorro económico por la energía solar excedentaria compensable económicamente en la facturación al precio de 0,05 €/kWh (precio de referencia actual) según lo previsto en el nuevo RD 244/2019 de Autoconsumo.

-No se tienen en cuenta ahorros de otro tipo como puede ser bonificaciones fiscales (IBI por instalación renovable) ni tampoco gastos adicionales.

-Se tienen en cuenta los siguientes precios tipo de tarifa eléctrica:

| | Precio Energía Comprada | Precio Energía Excedentaria | Precio de la Potencia | Potencia Contratada |
|----|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|
| | €/kWh | €/kWh | €/kW día | kW |
| P1 | 0,170000 | 0,050000 | 0,135031 | 5,750 |
| P2 | 0,120000 | 0,050000 | | |
| P3 | 0,090000 | 0,050000 | | |

Tabla 11. Precios tarifa eléctrica tipo

3.4.3.1 Caso 1: Sistema híbrido. Falling-film y generación fotovoltaica

Estudio eléctrico a 25 años vista:

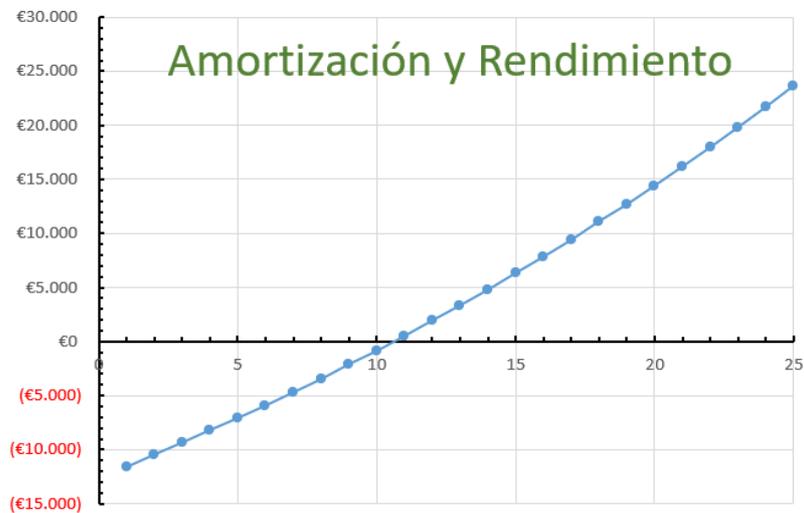
| Año | Consumo Actual de la Red (kWh) | Producción Solar + Falling Film (kWh) | Autoconsumo (kWh) | Excedente Compensable (kWh) | Excedente NO Compensable (kWh) | Consumo Futuro de la Red (kWh) |
|-----|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0 | | | | | | |
| 1 | 6.364 | 9.839 | 3.817 | 5.340 | 682 | 2.547 |
| 2 | 6.364 | 9.765 | 3.788 | 5.295 | 682 | 2.576 |
| 3 | 6.364 | 9.691 | 3.759 | 5.250 | 682 | 2.604 |
| 4 | 6.364 | 9.617 | 3.731 | 5.205 | 682 | 2.633 |
| 5 | 6.364 | 9.543 | 3.702 | 5.160 | 682 | 2.662 |
| 6 | 6.364 | 9.470 | 3.674 | 5.114 | 682 | 2.690 |
| 7 | 6.364 | 9.396 | 3.645 | 5.069 | 682 | 2.719 |
| 8 | 6.364 | 9.322 | 3.616 | 5.024 | 682 | 2.748 |
| 9 | 6.364 | 9.248 | 3.588 | 4.979 | 682 | 2.776 |
| 10 | 6.364 | 9.175 | 3.559 | 4.934 | 682 | 2.805 |
| 11 | 6.364 | 9.101 | 3.530 | 4.889 | 682 | 2.833 |
| 12 | 6.364 | 9.027 | 3.502 | 4.843 | 682 | 2.862 |
| 13 | 6.364 | 8.953 | 3.473 | 4.798 | 682 | 2.891 |
| 14 | 6.364 | 8.879 | 3.445 | 4.753 | 682 | 2.919 |
| 15 | 6.364 | 8.806 | 3.416 | 4.708 | 682 | 2.948 |
| 16 | 6.364 | 8.732 | 3.387 | 4.663 | 682 | 2.977 |
| 17 | 6.364 | 8.658 | 3.359 | 4.618 | 682 | 3.005 |
| 18 | 6.364 | 8.584 | 3.330 | 4.572 | 682 | 3.034 |
| 19 | 6.364 | 8.510 | 3.301 | 4.527 | 682 | 3.062 |
| 20 | 6.364 | 8.437 | 3.273 | 4.482 | 682 | 3.091 |
| 21 | 6.364 | 8.363 | 3.244 | 4.437 | 682 | 3.120 |
| 22 | 6.364 | 8.289 | 3.216 | 4.392 | 682 | 3.148 |
| 23 | 6.364 | 8.215 | 3.187 | 4.347 | 682 | 3.177 |
| 24 | 6.364 | 8.141 | 3.158 | 4.301 | 682 | 3.206 |
| 25 | 6.364 | 8.068 | 3.130 | 4.256 | 682 | 3.234 |

Tabla 12. Estudio eléctrico falling-film y generación fv

Estudio económico a 25 años vista:

| Año | Ahorro en el Término de Potencia | Ahorro en el Término de Energía por Autoconsumo | Compensación en el Término de Energía por Excedentes | Otros Ahorros | Ahorro Anual | Gasto Anual | Resultado Anual | Resultado Acumulado |
|-----|----------------------------------|---|--|---------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|
| 0 | | | | | | 12.572 € | -12.572 € | |
| 1 | 0 € | 702 € | 340 € | 0 € | 1.041 € | 0 € | 1.041 € | -11.531 € |
| 2 | 0 € | 721 € | 349 € | 0 € | 1.070 € | 0 € | 1.070 € | -10.461 € |
| 3 | 0 € | 741 € | 358 € | 0 € | 1.098 € | 0 € | 1.098 € | -9.363 € |
| 4 | 0 € | 761 € | 367 € | 0 € | 1.128 € | 0 € | 1.128 € | -8.235 € |
| 5 | 0 € | 781 € | 377 € | 0 € | 1.158 € | 0 € | 1.158 € | -7.077 € |
| 6 | 0 € | 802 € | 386 € | 0 € | 1.189 € | 0 € | 1.189 € | -5.889 € |
| 7 | 0 € | 824 € | 396 € | 0 € | 1.220 € | 0 € | 1.220 € | -4.668 € |
| 8 | 0 € | 846 € | 406 € | 0 € | 1.253 € | 0 € | 1.253 € | -3.416 € |
| 9 | 0 € | 869 € | 417 € | 0 € | 1.286 € | 0 € | 1.286 € | -2.130 € |
| 10 | 0 € | 892 € | 428 € | 0 € | 1.320 € | 0 € | 1.320 € | -810 € |
| 11 | 0 € | 916 € | 439 € | 0 € | 1.354 € | 0 € | 1.354 € | 544 € |
| 12 | 0 € | 940 € | 450 € | 0 € | 1.390 € | 0 € | 1.390 € | 1.934 € |
| 13 | 0 € | 965 € | 461 € | 0 € | 1.426 € | 0 € | 1.426 € | 3.360 € |
| 14 | 0 € | 991 € | 473 € | 0 € | 1.463 € | 0 € | 1.463 € | 4.823 € |
| 15 | 0 € | 1.017 € | 485 € | 0 € | 1.501 € | 0 € | 1.501 € | 6.325 € |
| 16 | 0 € | 1.044 € | 497 € | 0 € | 1.540 € | 0 € | 1.540 € | 7.865 € |
| 17 | 0 € | 1.071 € | 509 € | 0 € | 1.580 € | 0 € | 1.580 € | 9.446 € |
| 18 | 0 € | 1.099 € | 522 € | 0 € | 1.621 € | 0 € | 1.621 € | 11.066 € |
| 19 | 0 € | 1.128 € | 535 € | 0 € | 1.663 € | 0 € | 1.663 € | 12.729 € |
| 20 | 0 € | 1.157 € | 548 € | 0 € | 1.705 € | 0 € | 1.705 € | 14.434 € |
| 21 | 0 € | 1.187 € | 561 € | 0 € | 1.749 € | 0 € | 1.749 € | 16.183 € |
| 22 | 0 € | 1.218 € | 575 € | 0 € | 1.793 € | 0 € | 1.793 € | 17.976 € |
| 23 | 0 € | 1.249 € | 589 € | 0 € | 1.838 € | 0 € | 1.838 € | 19.814 € |
| 24 | 0 € | 1.281 € | 603 € | 0 € | 1.885 € | 0 € | 1.885 € | 21.699 € |
| 25 | 0 € | 1.314 € | 618 € | 0 € | 1.932 € | 0 € | 1.932 € | 23.631 € |

Tabla 13. Estudio económico falling-film + sistema fv



| | | |
|-----------------------|-------------------|------------|
| VAN | 48.261 € | |
| TIR | 9,14 % | |
| AMORTIZACIÓN | 10 años y 7 meses | |
| GASTO ELÉCTRICO ANUAL | ANTERIOR | 1.499,87 € |
| | ACTUAL (1er AÑO) | 530,87 € |

3.4.3.2 Caso 2: Sistema de generación fotovoltaica sin falling-film

Estudio eléctrico a 25 años vista:

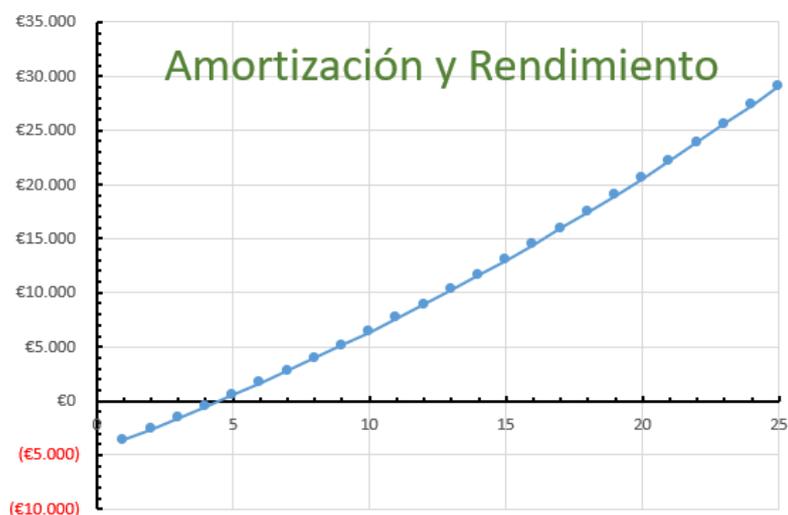
| Año | Consumo Actual de la Red (kWh) | Producción Solar (kWh) | Autoconsumo (kWh) | Excedente Compensable (kWh) | Excedente NO Compensable (kWh) | Consumo Futuro de la Red (kWh) |
|-----|--------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0 | | | | | | |
| 1 | 6.364 | 8.913 | 3.720 | 4.511 | 682 | 2.643 |
| 2 | 6.364 | 8.846 | 3.693 | 4.472 | 682 | 2.671 |
| 3 | 6.364 | 8.779 | 3.665 | 4.433 | 682 | 2.699 |
| 4 | 6.364 | 8.712 | 3.637 | 4.394 | 682 | 2.727 |
| 5 | 6.364 | 8.645 | 3.609 | 4.355 | 682 | 2.755 |
| 6 | 6.364 | 8.579 | 3.581 | 4.316 | 682 | 2.783 |
| 7 | 6.364 | 8.512 | 3.553 | 4.277 | 682 | 2.811 |
| 8 | 6.364 | 8.445 | 3.525 | 4.238 | 682 | 2.839 |
| 9 | 6.364 | 8.378 | 3.497 | 4.199 | 682 | 2.867 |
| 10 | 6.364 | 8.311 | 3.469 | 4.160 | 682 | 2.895 |
| 11 | 6.364 | 8.244 | 3.441 | 4.121 | 682 | 2.922 |
| 12 | 6.364 | 8.178 | 3.414 | 4.082 | 682 | 2.950 |
| 13 | 6.364 | 8.111 | 3.386 | 4.043 | 682 | 2.978 |
| 14 | 6.364 | 8.044 | 3.358 | 4.004 | 682 | 3.006 |
| 15 | 6.364 | 7.977 | 3.330 | 3.965 | 682 | 3.034 |
| 16 | 6.364 | 7.910 | 3.302 | 3.926 | 682 | 3.062 |
| 17 | 6.364 | 7.843 | 3.274 | 3.888 | 682 | 3.090 |
| 18 | 6.364 | 7.776 | 3.246 | 3.849 | 682 | 3.118 |
| 19 | 6.364 | 7.710 | 3.218 | 3.810 | 682 | 3.146 |
| 20 | 6.364 | 7.643 | 3.190 | 3.771 | 682 | 3.174 |
| 21 | 6.364 | 7.576 | 3.162 | 3.732 | 682 | 3.201 |
| 22 | 6.364 | 7.509 | 3.134 | 3.693 | 682 | 3.229 |
| 23 | 6.364 | 7.442 | 3.107 | 3.654 | 682 | 3.257 |
| 24 | 6.364 | 7.375 | 3.079 | 3.615 | 682 | 3.285 |
| 25 | 6.364 | 7.309 | 3.051 | 3.576 | 682 | 3.313 |

Tabla 14. Estudio eléctrico SIN falling-film y generación fv

Estudio económico a 25 años vista:

| Año | Ahorro en el Término de Potencia | Ahorro en el Término de Energía por Autoconsumo | Compensación en el Término de Energía por Excedentes | Otros Ahorros | Ahorro Anual | Gasto Anual | Resultado Anual | Resultado Acumulado |
|-----|----------------------------------|---|--|---------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|
| 0 | | | | | | 4.570 € | -4.570 € | |
| 1 | 0 € | 683 € | 287 € | 0 € | 969 € | 0 € | 969 € | -3.601 € |
| 2 | 0 € | 701 € | 294 € | 0 € | 996 € | 0 € | 996 € | -2.605 € |
| 3 | 0 € | 720 € | 302 € | 0 € | 1.022 € | 0 € | 1.022 € | -1.583 € |
| 4 | 0 € | 740 € | 310 € | 0 € | 1.050 € | 0 € | 1.050 € | -533 € |
| 5 | 0 € | 760 € | 318 € | 0 € | 1.078 € | 0 € | 1.078 € | 545 € |
| 6 | 0 € | 780 € | 326 € | 0 € | 1.106 € | 0 € | 1.106 € | 1.651 € |
| 7 | 0 € | 801 € | 334 € | 0 € | 1.136 € | 0 € | 1.136 € | 2.787 € |
| 8 | 0 € | 823 € | 343 € | 0 € | 1.166 € | 0 € | 1.166 € | 3.953 € |
| 9 | 0 € | 845 € | 352 € | 0 € | 1.197 € | 0 € | 1.197 € | 5.149 € |
| 10 | 0 € | 868 € | 361 € | 0 € | 1.228 € | 0 € | 1.228 € | 6.377 € |
| 11 | 0 € | 891 € | 370 € | 0 € | 1.260 € | 0 € | 1.260 € | 7.638 € |
| 12 | 0 € | 914 € | 379 € | 0 € | 1.293 € | 0 € | 1.293 € | 8.931 € |
| 13 | 0 € | 939 € | 389 € | 0 € | 1.327 € | 0 € | 1.327 € | 10.258 € |
| 14 | 0 € | 964 € | 398 € | 0 € | 1.362 € | 0 € | 1.362 € | 11.620 € |
| 15 | 0 € | 989 € | 408 € | 0 € | 1.397 € | 0 € | 1.397 € | 13.017 € |
| 16 | 0 € | 1.015 € | 418 € | 0 € | 1.433 € | 0 € | 1.433 € | 14.451 € |
| 17 | 0 € | 1.042 € | 429 € | 0 € | 1.470 € | 0 € | 1.470 € | 15.921 € |
| 18 | 0 € | 1.069 € | 439 € | 0 € | 1.508 € | 0 € | 1.508 € | 17.429 € |
| 19 | 0 € | 1.097 € | 450 € | 0 € | 1.547 € | 0 € | 1.547 € | 18.976 € |
| 20 | 0 € | 1.125 € | 461 € | 0 € | 1.586 € | 0 € | 1.586 € | 20.562 € |
| 21 | 0 € | 1.155 € | 472 € | 0 € | 1.627 € | 0 € | 1.627 € | 22.189 € |
| 22 | 0 € | 1.184 € | 484 € | 0 € | 1.668 € | 0 € | 1.668 € | 23.857 € |
| 23 | 0 € | 1.215 € | 495 € | 0 € | 1.710 € | 0 € | 1.710 € | 25.568 € |
| 24 | 0 € | 1.246 € | 507 € | 0 € | 1.753 € | 0 € | 1.753 € | 27.321 € |
| 25 | 0 € | 1.278 € | 519 € | 0 € | 1.797 € | 0 € | 1.797 € | 29.118 € |

Tabla 15. . Estudio económico SIN falling-film + sistema fv



| | | |
|-----------------------|------------------|------------|
| VAN | 37.780 € | |
| TIR | 23,67 % | |
| AMORTIZACIÓN | 4 años y 6 meses | |
| GASTO ELÉCTRICO ANUAL | ANTERIOR | 1.499,87 € |
| | ACTUAL(1er AÑO) | 624,87 € |

3.4.3.3 Caso 3: Sistema de refrigeración tradicional

En este caso, no hay necesidad de simular nada. El consumo eléctrico medio anual con las necesidades de refrigeración (6364 kWh) se mantendría constante y dadas las consideraciones económicas comentadas (aumento precio electricidad, etc) si no se acomete la instalación 1 o 2 el gasto anual irá incrementándose y las pérdidas serán el coste de oportunidad de no acometer ninguna de las dos instalaciones.

| | | |
|-----------------------|------------------|------------|
| VAN | - | |
| TIR | - | |
| AMORTIZACIÓN | - | |
| GASTO ELÉCTRICO ANUAL | ANTERIOR | 1.499,87 € |
| | ACTUAL (1er AÑO) | 1.499,87 € |

3.4.4 Comparativa de los casos

| | CASO 1: FALLING-FILM + FV | | CASO 2: FV SIN FALLING-FILM | | CASO 3: SIN INSTALACIÓN (REFRIGERACIÓN TRADICIONAL) | |
|-------------------------|---------------------------|------------|-----------------------------|------------|---|------------|
| VAN | 48.261 € | | 37.780 € | | - | |
| TIR | 9,14 % | | 23,67 % | | - | |
| AMORTIZACIÓN | 10 años y 7 meses | | 4 años y 6 meses | | - | |
| GASTO ELÉCTRICO ANUAL | ANTERIOR | 1.499,87 € | ANTERIOR | 1.499,87 € | ANTERIOR | 1.499,87 € |
| | ACTUAL | 530,87 € | ACTUAL | 624,87 € | ACTUAL | 1.499,87 € |
| CONSUMO ELÉCTRICO TOTAL | 5744 kWh | | 6364 kWh | | 6364 kWh | |
| COSTE | 12.572 € | | 4.570 € | | 0 € | |

Tabla 16. Resumen comparativo casos de estudio

Como se puede observar en las tablas correspondientes a cada uno de los dos primeros casos, no acometer ninguna instalación sería lo menos rentable a nivel económico.

Entre las dos opciones de instalación, encontramos que el caso de la instalación fotovoltaica simple puede ser más beneficiosa a nivel de amortización y simplicidad técnica de la instalación.

A pesar de esto, a niveles globales de retorno de inversión la instalación de falling-film hace que, a pesar de una

amortización más tardía, en números globales se consigue un mayor beneficio en términos de Valor Actual Neto.

Es importante considerar, que se trata de una simulación experimental donde no se tienen en cuenta muchos factores asociados y que pueden afectar como puede ser el incremento anual de temperatura, donde el sistema falling-film se vería beneficiado.

Por otro lado, si es cierto que la instalación que contempla el falling-film conlleva mayores costes al ser más tediosa. Si dicha instalación estuviera realizada desde un principio en la propia construcción de la vivienda, los costes serían mucho menores.

3.4.5 Estudio de la viabilidad de añadir baterías

Una idea sería añadir baterías para aprovechar al máximo la producción fotovoltaica. Al funcionar el sistema en modo nocturno, necesita alimentación eléctrica proveniente de la calle.

Se parte del caso de la instalación híbrida de fotovoltaica y falling-film. Haciendo los cálculos de producción y consumo horarios, se puede estimar los excedentes de la planta fotovoltaica:

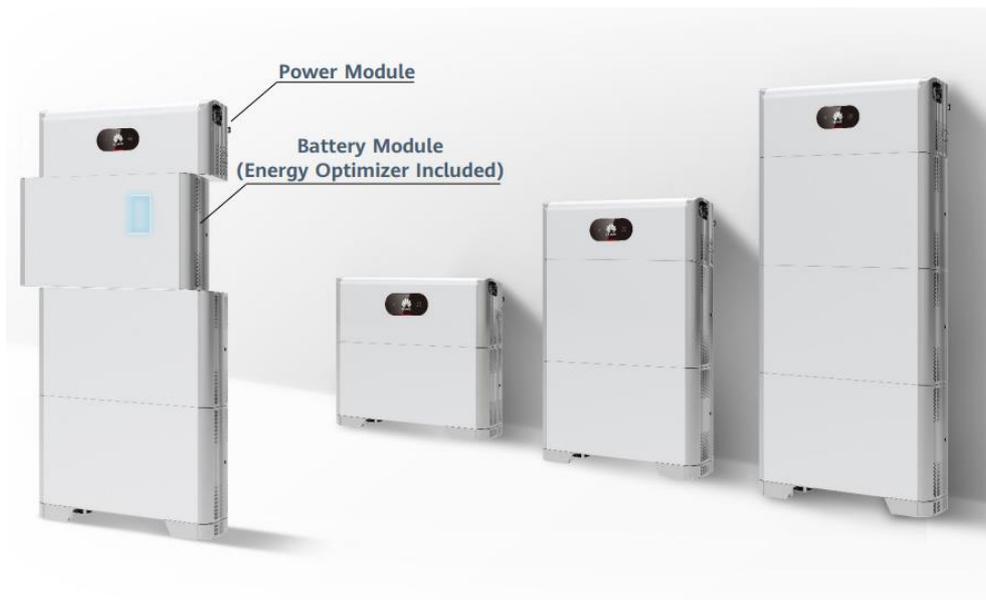
Se puede estimar en base a la producción y al consumo de la vivienda y cuanto excedente existe a lo largo del año:

| Excedente mensual | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|-------|-----|
| Modulos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | |
| 10 | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | | |
| P1 | 171 | 226 | 299 | 362 | 398 | 350 | 304 | 305 | 267 | 252 | 186 | 136 | | |
| P2 | 111 | 174 | 257 | 332 | 373 | 317 | 274 | 277 | 233 | 195 | 126 | 82 | | |
| P3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 4 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| Excedente | 282 | 400 | 557 | 695 | 776 | 671 | 581 | 583 | 501 | 447 | 313 | 218 | | |
| | | | | | | | | | | | | | 3.257 | 54% |
| | | | | | | | | | | | | | 2.751 | 46% |
| | | | | | | | | | | | | | 14 | 0% |
| | | | | | | | | | | | | | 6.022 | kWh |

Tabla 17. Excedente fotovoltaico para almacenaje de baterías

Este excedente en mayor parte es compensable y se percibe un descuento por parte de la comercializadora al inyectarlo a la red. Aun así, es mas beneficioso si se consume in situ ya que el precio al que se compra el kWh a las comercializadoras siempre será mayor al precio de compensación.

Teniendo en cuenta el modelo de inversor seleccionado, se puede escoger unas baterías de litio del mismo fabricante:



| Performance | | | |
|---|-----------------|------------|------------|
| Power module | LUNA2000-5KW-C0 | | |
| Number of power modules | 1 | | |
| Battery module | LUNA2000-5-E0 | | |
| Battery module energy | 5 kWh | | |
| Number of battery Modules | 1 | 2 | 3 |
| Battery usable energy ¹ | 5 kWh | 10 kWh | 15 kWh |
| Max. output power | 2.5 kW | 5 kW | 5 kW |
| Peak output power | 3.5 kW, 10 s | 7 kW, 10 s | 7 kW, 10 s |
| Nominal voltage (single phase system) | 450 V | | |
| Operating voltage range (single phase system) | 350 – 560 V | | |
| Nominal voltage (three phase system) | 600 V | | |
| Operating voltage range (three phase system) | 600 – 980 V | | |

Figura 50. Baterías de litio

Teniendo en cuenta que el consumo horario medio nocturno es de 0,7 kWh por hora, y se recomienda una autonomía de unas 10 horas, parece conveniente seleccionar 10 kWh de almacenamiento.

El coste total de la batería con la instalación se estima en 6200 €.

Se calcula cuanta energía anual se puede almacenar en la batería para su uso, siendo el resumen eléctrico el siguiente:

| | |
|---------------------------------------|----------|
| CONSUMO TOTAL DE LA VIVIENDA | 6364 kWh |
| PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA | 9839 kWh |
| ENERGÍA CONSUMIDA DE LA BATERÍA | 2404 kWh |
| ENERGÍA AUTOCONSUMIDA DIRECTAMENTE | 3820 kWh |
| ENERGÍA NECESARIA DE LA RED | 3615 kWh |

Tabla 18. Comparativa de consumos con baterías

Se puede estimar un precio medio de ahorro por utilizar energía de baterías de 0,15 €/kWh, dando como resultado un ahorro anual de 360,4 €

| Año | Ahorro en el Término de Potencia | Ahorro en el Término de Energía por Autoconsumo | Compensación en el Término de Energía por Excedentes | Ahorro por consumo en Baterías | Ahorro Anual | Préstamo | Otros Gastos | Gasto Anual | Resultado Anual | Resultado Acumulado |
|-----|----------------------------------|---|--|--------------------------------|--------------|----------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|
| 0 | | | | | | 0 € | 18.772 € | 18.772 € | -18.772 € | |
| 1 | 0 € | 534 € | 341 € | 360 € | 1.236 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.236 € | -17.536 € |
| 2 | 0 € | 548 € | 350 € | 360 € | 1.259 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.259 € | -16.277 € |
| 3 | 0 € | 563 € | 360 € | 360 € | 1.283 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.283 € | -14.994 € |
| 4 | 0 € | 578 € | 369 € | 360 € | 1.308 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.308 € | -13.686 € |
| 5 | 0 € | 594 € | 379 € | 360 € | 1.333 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.333 € | -12.353 € |
| 6 | 0 € | 610 € | 389 € | 360 € | 1.359 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.359 € | -10.994 € |
| 7 | 0 € | 627 € | 399 € | 360 € | 1.386 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.386 € | -9.608 € |
| 8 | 0 € | 643 € | 409 € | 360 € | 1.413 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.413 € | -8.195 € |
| 9 | 0 € | 661 € | 420 € | 360 € | 1.441 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.441 € | -6.754 € |
| 10 | 0 € | 678 € | 430 € | 360 € | 1.469 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.469 € | -5.285 € |
| 11 | 0 € | 696 € | 442 € | 360 € | 1.498 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.498 € | -3.787 € |
| 12 | 0 € | 715 € | 453 € | 360 € | 1.528 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.528 € | -2.258 € |
| 13 | 0 € | 734 € | 464 € | 360 € | 1.559 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.559 € | -700 € |
| 14 | 0 € | 753 € | 476 € | 360 € | 1.590 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.590 € | 890 € |
| 15 | 0 € | 773 € | 488 € | 360 € | 1.622 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.622 € | 2.512 € |
| 16 | 0 € | 794 € | 501 € | 360 € | 1.655 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.655 € | 4.167 € |
| 17 | 0 € | 814 € | 513 € | 360 € | 1.688 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.688 € | 5.855 € |
| 18 | 0 € | 836 € | 526 € | 360 € | 1.722 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.722 € | 7.578 € |
| 19 | 0 € | 858 € | 539 € | 360 € | 1.757 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.757 € | 9.335 € |
| 20 | 0 € | 880 € | 553 € | 360 € | 1.793 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.793 € | 11.128 € |
| 21 | 0 € | 903 € | 566 € | 360 € | 1.830 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.830 € | 12.957 € |
| 22 | 0 € | 926 € | 580 € | 360 € | 1.867 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.867 € | 14.824 € |
| 23 | 0 € | 950 € | 595 € | 360 € | 1.905 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.905 € | 16.729 € |
| 24 | 0 € | 974 € | 609 € | 360 € | 1.944 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.944 € | 18.673 € |
| 25 | 0 € | 999 € | 624 € | 360 € | 1.984 € | 0 € | 0 € | 0 € | 1.984 € | 20.657 € |

Tabla 19. Estudio económico con baterías en el sistema falling film

Haciendo la comparación:

| | SIN BATERÍA | CON BATERÍA |
|--------------|-------------------|-------------------|
| INVERSIÓN | 12.572 € | 18.772 € |
| AHORRO ANUAL | 932 € | 1.236 € |
| AMORTIZACIÓN | 10 años y 7 meses | 13 años y 5 meses |

Tabla 20. Comparativa económica con baterías

Como se puede observar, se tardaría algo más en amortizar la inversión debido al alto precio de las baterías de litio. Por otro lado, se tendría mucho mayor autonomía e independencia de la red, con los beneficios que ello supone. Otro punto a favor es el de contar con consumos nocturnos estables como es el caso de las bombas de falling-film y la posible carga de un vehículo eléctrico.

3.5 Conclusiones

Es muy interesante, como en este capítulo se ha podido observar, la multitud de variantes que se pueden añadir a la instalación (baterías, cambio de volumen del depósito, etc) y como afecta a la producción de frío y a la inversión.

Es complicado decir cual es el punto óptimo, ya que dependerá de cada concreto. En termino generales, se puede decir que una instalación fotovoltaica con un pequeño sistema de falling-film el cual no sea difícil de implementar en una vivienda, puede ser rentable en términos económicos y de eficiencia energética.

4 CONCLUSIONES

Dado los últimos años climáticos y el aumento y registro de temperaturas máximas parece muy interesante las líneas de investigación en la búsqueda de aumentar la eficiencia energética en construcciones residenciales.

Era el fin de este trabajo estudiar la viabilidad económica de una instalación novedosa investigada por el grupo de Termotecnia de la Universidad de Sevilla.

Como se ha podido demostrar, parece seguro y muy rentable instalar paneles fotovoltaicos. Se trata de una tecnología asentada después de varios años y con un estado de arte avanzado.

En el caso de falling-film, parece que tiene mucho desarrollo por delante y es una tecnología que puede funcionar muy bien. Aun así, los costes de la instalación hacen que su rentabilidad no sea tan favorable como con el caso de paneles fotovoltaicos únicamente. Al necesitar instalar depósitos soterrados y lo que conlleva (transporte, movimiento de tierras, etc) los años de amortización son mayores en comparación con un sistema único de FV que apoye a los sistemas de refrigeración eléctricos tradicionales. Esto no significa que no sea rentable, ya que el

Aun así, las simulaciones realizadas hacen pensar que se puede optimizar mucho el tipo de instalación y buscar un punto de mayor eficiencia a nivel de producción de frío y de disminución de costes constructivos.

Como se ha podido comprobar, variando elementos como puede ser la capacidad volumétrica del depósito soterrado, la producción de frío que puede aportar el sistema falling-film puede aumentar o disminuir considerablemente. Esto hace que sea un sistema adaptable a las necesidades y particularidades de las posibles instalaciones domésticas objeto de este trabajo.

Por otro lado, con la inclusión de baterías de litio se puede reducir el consumo eléctrico nocturno debido a las bombas del sistema. Se ha comprobado que a medio-largo plazo, los beneficios pueden verse aumentados si consideramos la importancia de la independencia con respecto a la red y las posibles subidas del precio de la electricidad.

Todo esto se puede implementar con nuevas tecnologías del hogar como son la aerotermia, el punto de recarga del vehículo eléctrico (consumo nocturno), enchufes inteligentes para dirigir el consumo a las horas de producción, etc.

Personalmente me parece apasionante este campo de estudio, buscando una eficiencia total a través de una energía limpia en viviendas residenciales.

REFERENCIAS

- [1] «IEA – International Energy Agency,» septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-final-consumption-by-sector-1974-2019>.
- [2] M. Guerrero Delgado, J. Sánchez Ramos, J. A. Tenorio Ríos, S. Álvarez Domínguez y M. Pavón , Experimental analysis of atmospheric heat sinks as heat dissipators, *Energy Conversion and Management*, 2020.
- [3] M. Guerrero Delgado, J. Sánchez Ramos, M. Pavón, J. A. Tenorio Ríos y S. Álvarez Domínguez, Falling-film as natural cooling technique: Modelling and energy impact assessment, *Energy Conversion and Management*, 2020.
- [4] M. Guerrero Delgado, J. Sánchez Ramos y S. Álvarez Domínguez, Using the sky as heat sink: Climatic applicability of night-sky based natural cooling techniques in Europe, *Energy Conversion and Management*, 2020.
- [5] J. A. Duffie, *Solar Engineering of Thermal Processes*, New Jersey, 2006.
- [6] «Agencia Andaluza de la Energía,» [En línea]. Available: <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/Radiacion>.
- [7] «Monsolar, cálculo de separación entre paneles fotovoltaicos,» [En línea]. Available: <https://www.monsolar.com/separacion-paneles-solares>.
- [8] «SolarBloc, soluciones de soporte para paneles fotovoltaicos,» [En línea]. Available: <https://solarbloc.es/productos/>.
- [9] «Web de precios fotovoltaica,» [En línea]. Available: <https://elalmacenfotovoltaico.com/>.

