

Proyecto Fin de Grado

Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

Modelado y evaluación del sistema de climatización LIFEWATERCOOL

Autor: Adelaida Molina Salvador

Tutor: Servando Álvarez Domínguez

Co-Tutor: José Sánchez Ramos

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Proyecto Fin de Grado
Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales

Modelado y evaluación del sistema de climatización LIFEWATERCOOL

Autor:

Adelaida Molina Salvador

Tutor:

Servando Álvarez Domínguez
Catedrático de Universidad

Co-Tutor:

José Sánchez Ramos
Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

A mi familia

A mis maestros

Resumen

El presente proyecto tiene por objeto alcanzar confort en zonas exteriores y espacios abiertos en la época estival de climas cálidos. Se pretende conseguir mediante enfriamiento de aire y sistemas radiantes, gracias a un intercambio aire-agua, a través de técnicas de acondicionamiento pasivo.

A su vez, se pretende fomentar el uso de la calle como dinamizador social así como el empleo de arquitecturas bioclimáticas, disminuyendo los impactos ambientales y reduciendo los consumos de energía. Gracias a esto, se evita el uso de sistemas convencionales de acondicionamiento, los cuales requieren de energías no renovables, consumiendo más y expulsando al ambiente mayor cantidad de CO₂.

En primer lugar, se hará una contextualización sobre la influencia que tienen las ciudades sobre el cambio climático y la problemática de la creación de la isla de calor urbano. También se comentará las diferentes técnicas de acondicionamiento pasivo existentes en la actualidad, comentando algunos de los sistemas que se implantarán en el proyecto. Seguidamente, se hará una descripción general del proyecto Life Watercool desarrollado en la Av. Cruz Roja, en Sevilla y las tecnologías a integrar en cada una de las zonas de interés.

En el tercer capítulo, se comentarán los objetivos y condiciones de diseño óptimos para posteriormente, describir cada una de las zonas que conforman el proyecto, junto con el modelo de simulación que permitieron determinar la influencia y el impacto de cada una de ellas sobre el agua como fluido caloportado.

Finalmente, se harán una serie de simulaciones que nos permitirán alcanzar los objetivos impuestos previamente, llegando a una solución que nos permita reducir el consumo de energía y la pérdida de agua por evaporación.

Resumen	vii
Índice	ix
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xiii
1 Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Actualidad	2
1.2.1. Arquitectura bioclimática	2
1.2.2. Técnicas de acondicionamiento pasivo	2
2 Proyecto Life Watercool	4
3.3. Tecnologías a integrar en el marco del proyecto	5
2.1.1. Sistema evaporativo	5
2.1.2. Sistema de película descendente (Falling Film)	6
2.1.3. Sistema convectivo-radiante (Marquesina)	6
3 Metodología	9
3.1. Objetivos	9
3.2. Condiciones de diseño	9
3.4. Datos climáticos	10
4 Zonas WaterGrid	13
3.1. Parque	13
3.1.1. Acondicionamiento y confinamiento del espacio	15
3.1.2. Sistema de control parque	16
3.1. Plaza	17
3.1.1. Acondicionamiento y confinamiento del espacio	17
3.1.2. Sistema de control plaza	18
3.2. Marquesina	19
3.2.1. Sistema de control de la marquesina	19
3.3. Colegio	20
3.3.1. Sistema de control del colegio	21
3.4. Modelo de simulación	21
3.4.1. Aljibes	21
3.4.2. Unidad de tratamiento de aire	22
3.4.3. Sistema evaporativo	23
3.4.4. Falling film	25
3.4.5. Sistema convectivo-radiante (Thermatop)	26
5 Resultados	11
4.1. Justificación enfriamiento Falling Film	11
4.1.1. Conexiones WaterGrid	18
4.2. Justificación del volume de los aljibes	19
4.3. Justificación dimensionado de los paneles Falling Film	27
6 Conclusión	33
Referencias	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos climáticos	10
Tabla 2. Características climáticas día tipo	10
Tabla 3. ACH en el parque	15
Tabla 4. ACH en la plaza	17
Tabla 5. Comparación de los diferentes modos de enfriamiento según las conexiones en los aljibes	18
Tabla 6. Temperaturas máximas de los recintos según los diferentes casos	18
Tabla 7. Variación de las temperaturas de los aljibes en función de los volúmenes	20
Tabla 8. Incrementos de temperatura de los aljibes en función del volumen de acumulación.	22
Tabla 9. % Trecinto > T _{max} y °C/h aportado por el agua en función del volumen.	24
Tabla 10. % Trecinto > T _{max} en función del volumen y confinamiento.	25
Tabla 11. % Tplaza > T _{max} en función de la eficiencia de los sistemas evaporativos.	26
Tabla 12. Estudio del número de paneles en serie.	28
Tabla 13. Estudio del número de paneles en serie.	29
Tabla 14. Estudio del número de boquillas	30
Tabla 15. Estudio de la cantidad de caudal por boquilla	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto isla de calor urbano	1
Figura 2 .Intercambios de energía durante el día entre un árbol y un edificio	2
Figura 3. Diagrama de flujo de ventilación de una habitación con chimenea solar	3
Figura 4. Pozo canadiense	3
Figura 5. Av Cruz Roja, antes	4
Figura 6. Av Cruz Roja, simulación.	4
Figura 7. Simulación zonas proyecto Life Watercool	5
Figura 8. Enfriamiento evaporativo directo	5
Figura 9. Sistema de película descendente	6
Figura 10. Sistema convectivo-radiante (Thermatop)	7
Figura 11. Esquema Water-Grid	13
Figura 12. Zona acondicionada del parque	14
Figura 13. Distribución de las UTAs en el parque	14
Figura 14. Medidas bancos donde van situadas las UTA	14
Figura 15. Vegetación en el parque	15
Figura 16. ACH de la parque	16
Figura 17. Situación actual de la plaza	17
Figura 18. ACH de la plaza	18
Figura 19. Marquesina desde calle Manuel Villalobos dirección Fray Isidoro de Sevilla	19
Figura 20. Marquesina	19
Figura 21. Mapa de la cubierta del colegio	20
Figura 22. Patio del colegio. Recreación Revit	21
Figura 23. Esquema UTAs	22
Figura 24. Esquema fuente de la parque	24
Figura 25. Falling film	25
Figura 26. Vista en planta marquesina	27
Figura 27. Vista frontal marquesina	27
Figura 28. Especificaciones panel Thermatop	27
Figura 29. Configuración Thermatop	27
Figura 30. Diferentes superficies de la marquesina	29
Figura 31. Enfriamiento del agua procedente de los aljibes mediante diferencia de temperatura.	11
Figura 32. Enfriamiento del agua procedente de los aljibes mediante la mezcla de ambos.	12
Figura 33. CASO 1 (ALJ1: 1UTAS parque + UTA plaza; ALJ2: 1UTAS parque + marquesina). Diferencia de T	13

Figura 34. CASO 1 (ALJ1: 1UTAS parque + UTA plaza; ALJ2: 1UTAS parque + marquesina). Mezcla	14
Figura 35. CASO 2 (ALJ1: UTA plaza; ALJ2: 2UTAS parque + marquesina). Diferencia de T	15
Figura 36. CASO 2 (ALJ1: UTA plaza; ALJ2: 2UTAS parque + marquesina). Mezcla	16
Figura 37. CASO 3 (ALJ1: Todas las UTAS; ALJ2: marquesina). Diferencia de T	16
Figura 38. CASO 3 (ALJ1: Todas las UTAS; ALJ2: marquesina). Mezcla	17
Figura 39. Conexiones en los aljibes.	19
Figura 40. Temperatura del agua de los aljibes a las 20:00 h en función del volumen de acumulación	20
Figura 41. Evolución de la temperatura del agua del aljibe 1 para 6 volúmenes dados.	21
Figura 42. Evolución de la temperatura del agua del aljibe 2 para 6 volúmenes dados	21
Figura 43. Evolución temperatura en el parque para diferentes volúmenes de acumulación.	23
Figura 44. Evolución temperatura en el plaza para diferentes volúmenes de acumulación.	23
Figura 45. Evolución de la temperatura en los recintos.	26
Figura 46. Evolución de la temperatura del agua de los aljibes para un volumen de 20 m ³ .	27
Figura 47. Dimensiones paneles.	28
Figura 48. Dimensiones cubierta colegio.	28
Figura 49. Evolución de la temperatura de los aljibes en función del número de paneles en serie.	29
Figura 50. Distribución general para dos paneles en serie	32
Figura 51. Evolución de la temperatura del agua de los aljibes. Resultado final.	32

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

Las ciudades son las principales emisoras de dióxido de carbono antropogénico, de gases de efecto invernadero en general, de ozono troposférico y clorofluorocarbonos, que contribuyen a alrededor del 85% de las emisiones globales y además consumen alrededor del 75% de los recursos naturales del mundo (Despini et al., 2021).

Se espera que el cambio climático global y local, en combinación con el aumento de población proyectado y el desarrollo económico, aumente enormemente la demanda futura de energía de refrigeración de los edificios y la convierta en el componente energético dominante. Por ello, se han hecho numerosos estudios (Mat Santamouris, 2016) sobre el consumo energético global tanto actual como futuro sujeto a factores económicos, ambientales, tecnológicos y sociales para concienciar e informar de este hecho tan importante.

Por ello, y tomando responsabilidad la política energética europea, se ha aprobado el (*Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030*, n.d.) con el fin de acelerar la lucha contra el cambio climático y cuyos objetivos son la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, implantación de energías renovables y un aumento de la eficiencia energética.

Uno de los hechos que se han visto reflejados a raíz de esta problemática, es la creación de la **isla de calor urbano**, en cuyo fenómeno se puede observar una diferencia significativa de temperatura dentro de una ciudad o entre una ciudad y sus suburbios y / o las áreas rurales circundantes, disminuyendo así el confort térmico y aumentando la temperatura en los espacios interiores y exteriores (figura 1).

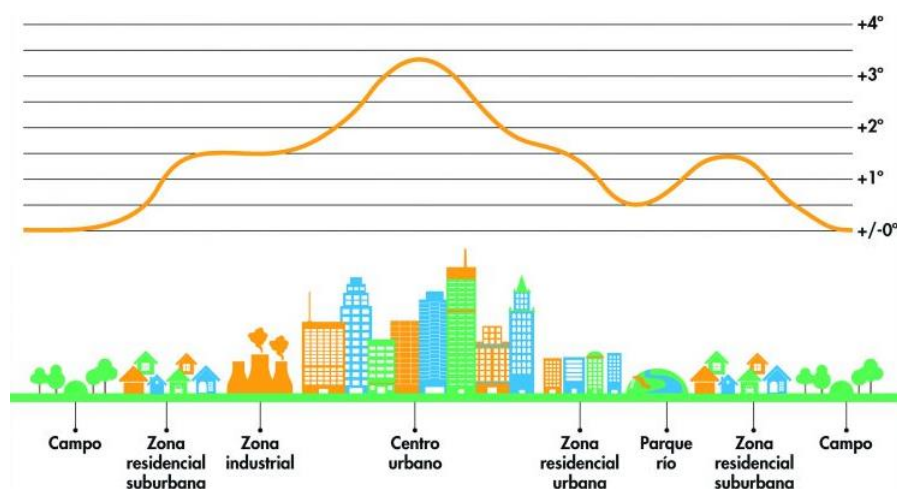


Figura 1. Efecto isla de calor urbano (Aislamiento y Sostenibilidad, n.d.)

Los estudios han utilizado diferentes herramientas y técnicas, incluida la medición y el seguimiento in situ (Borbora & Das, 2014; Busato et al., 2014), la simulación CFD en combinación con la medición in situ

(Dimoudi et al., 2014; Georgakis et al., 2014) y una red neuronal artificial ya sea en combinación o independientemente de la lógica difusa, para ayudar a medir, evaluar y predecir la magnitud y los efectos de la isla de calor.

Uno de los efectos de este fenómeno es el aumento en el nivel de incomodidad en espacios públicos al aire libre, obligando a los ocupantes a permanecer en los espacios interiores. Una investigación de campo sobre el espacio público y la vía pública en Australia, refleja esta influencia en referencia a un umbral térmico de entre 28 y 32 °C (Soltani & Sharifi, 2017). También se ha hecho una evaluación de las condiciones de confort térmico y las resupuestas de salud durante un verano extremadamente caluroso en Atenas (Pantavou et al., 2011)

1.2. Actualidad

1.2.1. Arquitectura bioclimática

Para mitigar el efecto de la isla de calor, además de la rehabilitación de edificios, se propone la utilización de una **arquitectura bioclimática** que aproveche las condiciones medioambientales con el objetivo de conseguir el máximo confort térmico con el mínimo consumo energético.

El **aprovechamiento de la vegetación** es uno de los métodos más efectivos contribuyendo en la absorción de la radiación solar (F. Kong, H. Yin, P. James, L.R. Hutyra, n.d.; Kleerekoper et al., 2012) (figura 2), junto con el control de la orientación, aislamiento térmico y la integración de energías renovables.

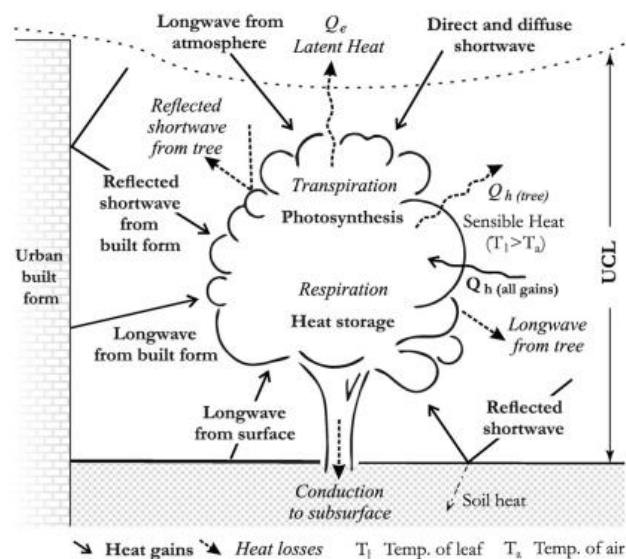


Figura 2. Intercambios de energía durante el día entre un árbol y un edificio (Gunawardena et al., 2017)

1.2.2. Técnicas de acondicionamiento pasivo

Paralelamente, las técnicas de acondicionamiento pasivo se utilizan ampliamente en espacios al aire libre para mejorar el microclima local y combatir la isla de calor urbano (Mattheos Santamouris & Kolokotsa, 2013)

El **aire como fluido disipador** se puede utilizar como refrigeración por convección, o ventilación. La mayoría de los estudios concluyen que el uso de ventilación nocturna en edificios flotantes puede disminuir la temperatura interior máxima del día siguiente hasta 3 K (Blondeau et al., 1997; V Geros, M Santamouris, Tsangrasoulis, n.d.). Por otro lado, resulta muy interesante su utilización como refrigeración por convección, ya que aprovecha la energía solar de forma pasiva para regular la temperatura de la vivienda mediante la

creación de una corriente de aire ascendente en la zona donde está el colector solar al calentarse el fluido. (*Chimeneasonline*, n.d.)

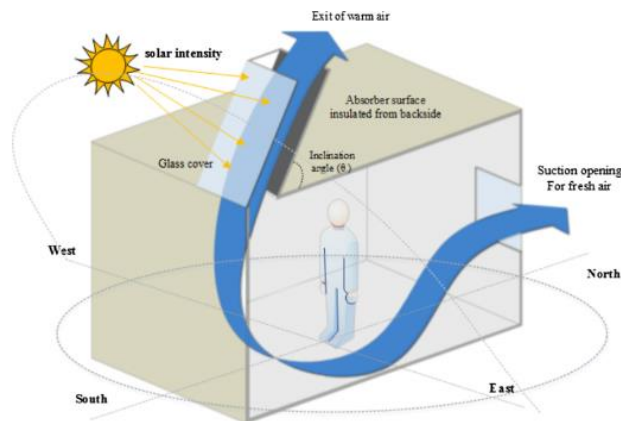


Figura 3. Diagrama de flujo de ventilación de una habitación con chimenea solar (Abdeen et al., 2019)

El suelo como disipador de calor, se utiliza en los (intercambiadores de calor de tierra-aire. Consisten en un sistema de conductos enterrados cuyo funcionamiento se basa en el aprovechamiento de la inercia térmica del terreno y la temperatura estable que se alcanza a poca profundidad. Para este tipo de sistemas, se han realizado cientos de estudios para desarrollar modelos capaces de predecir la eficiencia de los intercambiadores de calor tierra-aire (Mihalakakou et al., 1994)



Figura 4. Pozo canadiense

Por último, el **agua como fluido disipador** presenta numerosas ventajas. Gracias al alto calor específico que posee, puede transportar grandes cantidades de calor a un caudal razonablemente bajo. Tras y como se verá en el apartado 3 de este capítulo, el agua se puede utilizar en sistemas donde el calor se libera a través de elementos convencionales como fan coil o en sistemas evaporativos.

2 PROYECTO LIFE WATERCOOL

EL proyecto Life Watercool tiene como objetivo desarrollar y probar soluciones innovadoras para hacer frente a las altas temperaturas, tanto en exteriores como en interiores, y con escorrentía temporal de agua y situaciones de sequía en un entorno urbano sujeto al cambio climático. En el proyecto Watercool, la red de agua urbana actuará como la estructura básica para el desarrollo de soluciones verdes urbanas y medidas de enfriamiento para adaptarse a los efectos del cambio climático, maximizando la sostenibilidad de la ciudad y el bienestar de los ciudadanos (Life Watercool, n.d.).

Con objeto de realizar una adaptación óptima al calor, (combinando depósitos de enfriamiento y pavimentos fotocatalíticos y drenantes) y para mejorar la eficiencia en el uso del agua, ésta se utilizará como vehículo en la reurbanización de la Avenida de la Cruz Roja y la confluencia con las calles Doctor Jiménez Díaz y Manuel Villalobos, en el distrito de la Macarena de Sevilla, coordinado por la Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A. (Emasesa), cofinanciado por la Unión Europea.



Figura 5. Av Cruz Roja, antes



Figura 6. Av Cruz Roja, simulación.

Además, el proyecto contribuirá a la implementación de una gama de políticas y legislación, incluida la estrategia de adaptación de la Unión Europea, la hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos, la estrategia de biodiversidad de la Unión Europea 2020 y el Pacto de Alcaldes por el Clima y la Energía.

El entorno de la avenida de la Cruz Roja, en Sevilla, dispondrá de cuatro zonas climatizadas y con sombra, que emplea un proceso de enfriamiento y almacenamiento de agua para rebajar la temperatura y la adaptación al cambio climático., las cuales se tratarán como zonas de corta, media y larga estancia. La plaza y el parque se tomarán como espacios de larga estancia, el patio del colegio de media estancia y la marquesina de la parada de autobús como corta estancia.

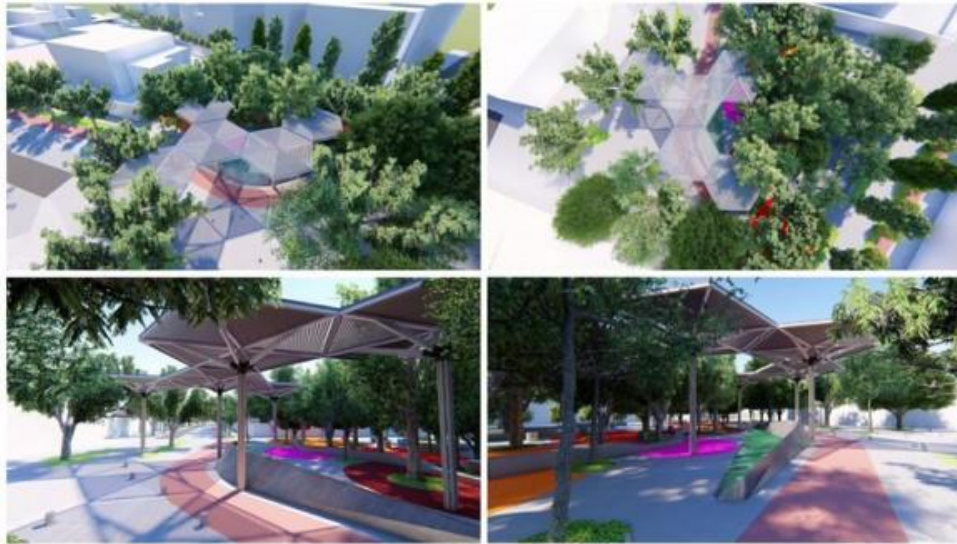


Figura 7. Simulación zonas proyecto Life Watercool

El proyecto Life Watercool junto con el proyecto Cartuja Qanat (Qanat, n.d.), el cual se desarrolla en la avenida Thomas Alva Edison situada en la ciudad de Sevilla cuyo objetivo es la rehabilitación y acondicionamiento del anfiteatro ya existente y la creación del Zoco, son la continuación natural de los trabajos de control climático iniciados por motivos de la EXPO'92 de Sevilla.

3.3. Tecnologías a integrar en el marco del proyecto

2.1.1. Sistema evaporativo

Gracias a este equipo, se puede conseguir un enfriamiento según un proceso natural donde se utiliza la evaporación del agua como medio para enfriar el aire (Idae, n.d.).

Entre los sistemas evaporativos, se pueden encontrar dos posibilidades de uso; directo e indirecto. En el proyecto, se incorporará el enfriamiento evaporativo directo dentro de las unidades de tratamiento de aire (UTA), permitiendo obtener temperaturas de impulsión más bajas y por tanto una eficiencia mayor del sistema.

En el caso del enfriamiento evaporativo directo, tal y como se ve en la figura 8, el aire de impulsión entra en contacto con el agua y se enfría y humidifica.

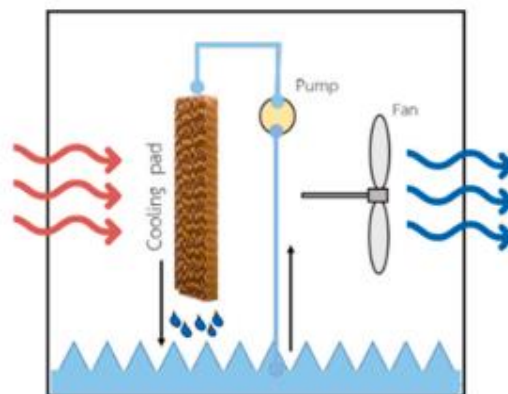


Figura 8. Enfriamiento evaporativo directo

Sin embargo, el enfriamiento indirecto se produce cuando el agua pasa por un sistema secundario de aire,

enfriando el aire de impulsión sin humidificarlo.

Se han realizado numerosos experimentos y estudios (Chu & Huang, 2021; El-Dessouky et al., 2000; Tewari et al., n.d.; Wichakan Ketwong, Thoranis Deethayat, n.d.; Y.M.Xuan & X.F.Niu, X.Huang, n.d.) para estimar el rendimiento térmico a la hora de incorporar los sistemas de refrigeración por evaporación y las aplicaciones que estos tienen en diferentes climas y zonas del mundo. Con ello, también se ha llegado a la conclusión de que este tipo de sistemas son más eficientes en climas secos, ya que si la humedad del aire de admisión es demasiado alta, la reducción de temperatura del aire por humidificación es insignificante (Al-Badri & Al-Waaly, 2017).

Para poder solventar el problema de las zonas húmedas e incluso aumentar el rendimiento de estos sistemas, se ha propuesto la incorporación de deshumidificadores (Idae, n.d.). Por otro lado, también se ha estudiado las numerosas ventajas que conlleva la incorporación de recuperadores en las unidades de tratamiento de aire como tecnología complementaria o independiente a los sistemas evaporativos.

2.1.2. Sistema de película descendente (Falling Film)

El sistema de película descendente, es una de las tecnologías más innovadoras y de gran importancia implantadas en el proyecto. Este sistema fotovoltaico-térmico, se utiliza para producir electricidad y como sistema de refrigeración por radiación nocturna, cuyo objetivo es enfriar el agua utilizada durante el día procedente de los aljibes, haciéndola circular a través de una superficie radiante plana.

Para este tipo de sistemas se pueden utilizar dos configuraciones: sistema radiativo y película descendente. En este proyecto, se empleará la película descendente como se puede ver en la figura 9, donde el agua circula por la superficie plana en contacto directo con el aire. Esto hace que el agua se enfríe por convección con el aire, radiación con el cielo y evaporación por contacto directo entre aire y agua.

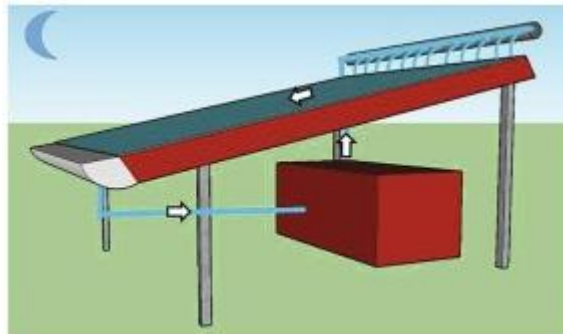


Figura 9. Sistema de película descendente

Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados (Farmahini-Farahani & Heidarinejad, 2012; Guerrero Delgado et al., 2020) con respecto a esta forma de disipación, se basan en los sistemas radiativos, donde el agua no entra en contacto directo con el ambiente exterior.

Al ver que el sistema de película descendente presenta un aumento significativo del potencial de enfriamiento dado los diferentes fenómenos de transmisión (n.d.), se han hecho varios estudios y comparativas entre ambas configuraciones para incentivar su utilización (Guerrero Delgado et al., 2020; Miriel et al., 2002)

2.1.3. Sistema convectivo-radiante (Marquesina)

Por último, el sistema convectivo-radiante irá instalado tanto en la superficie frontal como en la cubierta de una marquesina. Su funcionamiento consiste en hacer circular agua fría por sus circuitos para enfriar la superficie. De esta forma las paredes se refrigeran a una temperatura inferior a la temperatura ambiente del espacio a climatizar y emana frío gracias a dos fenómenos diferentes que se dan al mismo tiempo: la

convección del aire del recinto y el intercambio radiante de onda larga con otras superficies (Andrés-Chicote et al., 2012).



Figura 10. Sistema convectivo-radiante (Thermatop)

Con respecto a este sistema, Miriel et al. (Miriél et al., 2002) determinó experimentalmente que el componente radiante implica alrededor del 66% de la transferencia de calor total para el modo de refrigeración y el 80% para el modo de calefacción. El predominio del mecanismo de transferencia de calor radiante demostró ser aún mayor en el trabajo experimental realizado por Rahimi et al. (Mostafa Rahimi, n.d.) sobre un sistema de calefacción de techo.

A pesar de que el uso de los sistemas convectivo-radiante predomina mayormente en Europa Central y del Norte, se han hecho estudios experimentales para conocer el rendimiento energético de dichos dispositivos en Europa del Sur, demostrando su validez para estas condiciones climáticas

3 METODOLOGÍA

3.1. Objetivos

A continuación, se enumerará los diferentes objetivos de dicho trabajo:

- **Informar y concienciar** de la creación de espacios verdes y la instalación de elementos urbanísticos que permitan el ahorro y reutilización del agua, además de ayudar a moderar la sensación térmica
- **Modelado físico de las distintas tecnologías propuestas y volúmenes de acumulación.** Se definen las ecuaciones que rigen el comportamiento de todos los elementos de la instalación que permiten la climatización de las diferentes zonas a estudio.
- **Funcionamiento enfriamiento nocturno y modo de operación de la instalación.** Búsqueda del horario de funcionamiento óptimo para el Falling Film que asegure un enfriamiento nocturno lo más eficiente posible y estudio de la conexión más óptima entre las tecnologías de enfriamiento y los volúmenes de acumulación.
- **Simulación de la instalación.** Se pretende encontrar la solución más óptima a través de simulaciones gracias a parámetros variables y sujetos a las condiciones de diseño impuestas.

3.2. Condiciones de diseño

Para garantizar unas condiciones de confort térmico es necesario partir de unos parámetros de diseño que se quieren alcanzar que aseguren que esto es así. Para ello, se ha acudido a la “Guía básica para el acondicionamiento climático de espacios abiertos” publicado por el grupo de termotecnia de la universidad de Sevilla en el marco de la Expo 92. En ella, se puntualiza que para obtener unos niveles de confort aceptables en dichos espacios es necesario garantizar una sudoración inferior a los 90 g/h. Cabe señalar, que, en un espacio de estas características en la época estival en la ciudad de Sevilla, se alcanzan niveles cercanos a los 300g/h de sudoración si el recinto no está climatizado. En el confort térmico interfieren numerosos parámetros por lo que es necesario acondicionar el espacio para el caso más desfavorable posible, el cual, siguiendo dicha guía y con el objetivo de obtener un alto grado de confort que evite una elevada sudoración y ausencia de calor, se decide el siguiente parámetro de diseño:

$$T_{recinto} \leq 28^{\circ}C \qquad T_{consigna} \leq 28^{\circ}C$$

Este parámetro se tomará como condición prioritaria a la hora de optimizar los diferentes elementos de la instalación, cuyo valor se intentará alcanzar mediante diferentes tecnologías como se verá en el próximo capítulo.

3.4. Datos climáticos

El archivo climático del que se dispone para llevar a cabo las distintas simulaciones trata de un día completo del mes de septiembre, en el que se recogen los siguientes datos en intervalos de 10 minutos:

T_{ext}	°C
T_{cielo}	°C
$I_{directa}$	$\frac{W}{m^2}$
I_{difusa}	$\frac{W}{m^2}$
T_{bh}	°C
$w_{exterior}$	$\frac{Kg\ agua}{Kg\ aire\ seco}$
HR	%
v_{viento}	$\frac{m}{s}$
Ángulo cenital	°
Altura solar	°

Tabla 1. Datos climáticos

A continuación, se muestran los datos medios, máximos y mínimos de los parámetros climáticos más influyentes:

	T_{ext} (°C)	T_{cielo} (°C)	T_{bh} (°C)	v_{viento} (m/s)
Min	20,72	9,67	18,16	0
Media	28,92	13,4	20,7	1,64
Max	37,16	16,41	23,13	4,29

Tabla 2. Características climáticas día tipo

Cada uno de los parámetros que se muestran en la tabla anterior son determinantes para cada una de las tecnologías de enfriamiento utilizadas. En el caso de la película descendente, la potencia de enfriamiento depende tanto de la temperatura del cielo como la de bulbo húmedo. Además, los sistemas evaporativos que garantizan el confort térmico en los espacios acondicionados como el parque y la plaza, dependen de la temperatura de bulbo húmeda. La velocidad del viento juega un papel determinante en el caudal de aire exterior que entra en los espacios acondicionados, por lo que a mayor velocidad de viento mayor dificultad para acondicionar los espacios ya que las renovaciones por hora aumentan y las necesidades para tener el espacio acondicionado a la temperatura de consigna aumentan. Por último, la temperatura del aire exterior es la más influyente, ya que valores tan altos requieren mayor aporte de energía de la instalación para alcanzar temperatura menores o iguales a 28 °C.

4 ZONAS WATERGRID

El proyecto consta de cuatro zonas a climatizar (la plaza, el parque, el colegio y la marquesina) donde irán las diferentes tecnologías vistas anteriormente. Para poder garantizar la climatización de dichas zonas, se ha hecho uso de dos aljibes que se utilizarán como volúmenes de acumulación. En ellos, irán conectadas las diferentes tecnologías utilizando el agua como fluido de disipación mediante intercambios de calor con el aire exterior.

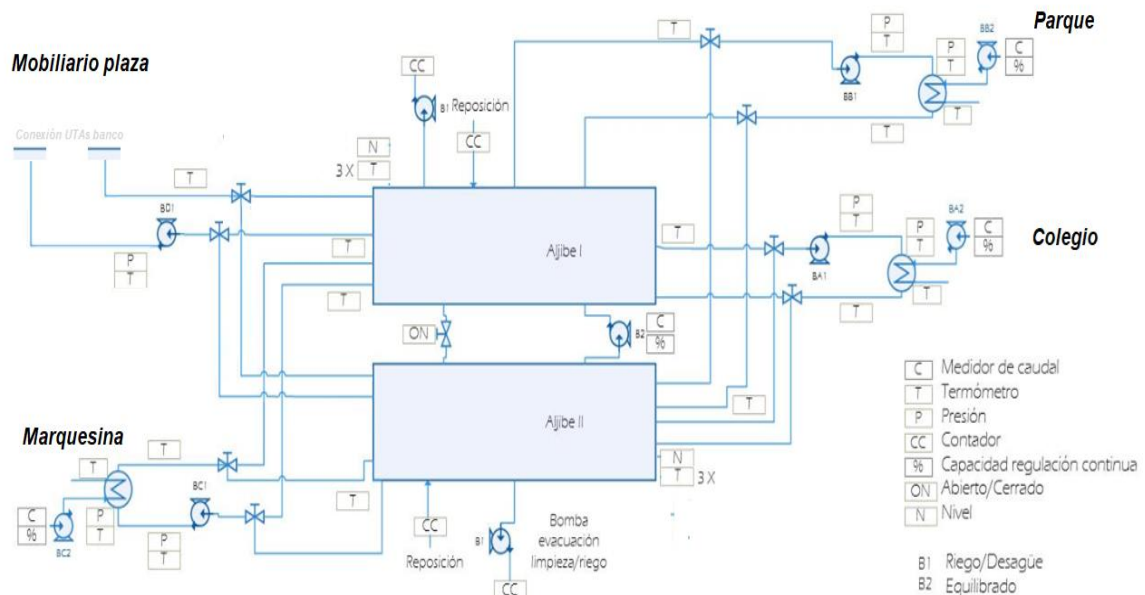


Figura 11. Esquema Water-Grid

A continuación, se analizará cada zona de forma independiente, explicando las diferentes tecnologías que contienen, el cálculo del flujo de calor asociado al agua y los parámetros más relevantes para su posterior uso en la simulación

3.1. Parque

El parque Manuel Garrido situado en la calle Montemayor, estará provisto de **dos unidades de tratamiento de aire** que irán situadas en el banco que se puede ver en la figura 12, el cual mide 25 metros (12,5 por cada lado). Hay que impulsar 5.000 m³/h con rejillas, a una velocidad de salida de 3 ó 4 m/s. Las rejillas serán muy estrechas y dispuestas verticalmente, a una distancia entre ellas de 2 m (figura 14).



Figura 12. Zona acondicionada del parque

Cada una de las UTAs podrá conectarse de forma independiente a cada uno de los aljibes mediante conexión 2T constituida por una tubería de impulsión y otra de retorno al aljibe.

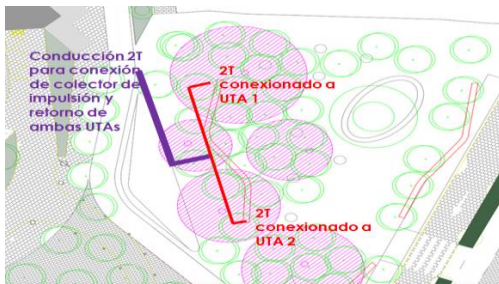


Figura 13. Distribución de las UTAs en el parque

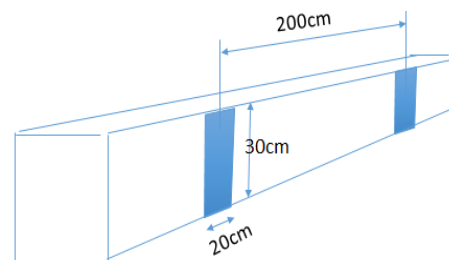


Figura 14. Medidas bancos donde van situadas las UTA

Otro de los factores que influyen en el enfriamiento del recinto además de las técnicas de enfriamiento descritas anteriormente, es la presencia de **vegetación** ya que absorbe la radiación solar y genera superficies frías, permitiendo generar un microclima.



Figura 15. Vegetación en el parque

3.1.1. Acondicionamiento y confinamiento del espacio

El parque presenta un volumen de acondicionamiento de aproximadamente $273,72 \text{ m}^3$ que corresponde al volumen que se puede ver en la figura 12 representado con un cuadrado amarillo. Los cálculos de las renovaciones por hora (ACH) en dicha zona, se han obtenido por simulación CFD. Para cada velocidad de viento estudiada, se obtiene una renovación por hora (ACH) equivalente en función del grado de confinamiento que se aplique:

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	ACH (ren/h)
0	0
1	11,068
4	47,16

Tabla 3. ACH en el parque

Gracias a estos datos podemos calcular el caudal de aire procedente del exterior que entra en el espacio acondicionado en función de la velocidad del viento, obteniendo una ecuación lineal representada en la siguiente figura:

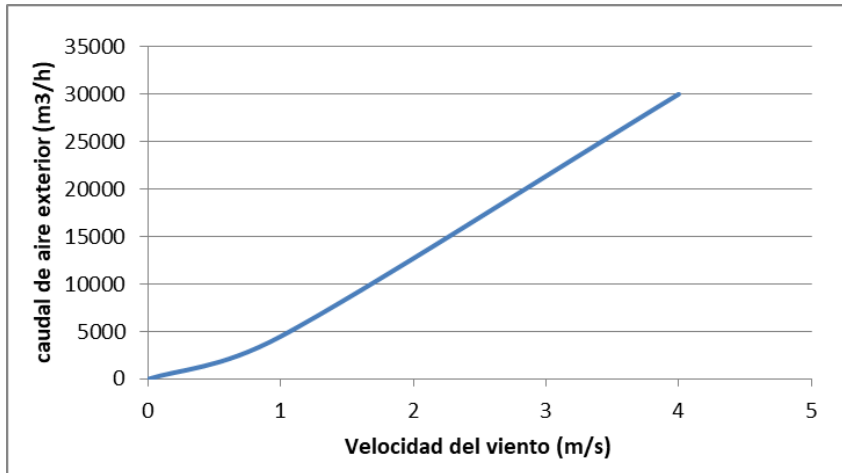


Figura 16. ACH de la parque

Donde:

$$m_{ext} = 2,44 \cdot 10^{-5} + 3500 \cdot v_{viento} + 1000 \cdot v_{viento}^2 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

3.1.2. Sistema de control parque

Para asegurar los objetivos y las condiciones de diseño establecidas se ponen una serie de controles que determinaran el funcionamiento de las diferentes tecnologías.

Tanto para la UTA1 como para la UTA2 se pondrá:

- **Control por temperatura máxima en la parque** ($T_{parque} > T_{max_{parque}}$), para asegurar confort térmico en la zona a acondicionar. En el caso en el que se cumpla esta condición se encenderán las UTAs .
- **Control funcionamiento** si la temperatura de agua a la entrada es superior que la temperatura exterior ($T_{ext} < T_{agua_{ent}}$). Si se cumple esta condición se apagarían ya que no sería coherente que el agua con la que vamos a enfriar el aire exterior esté más caliente que este.
- **Control por horario de funcionamiento**. Se establecerá un horario de funcionamiento dependiendo del uso que se va a hacer de la zona.
- **Control de conexión** para saber si está conectado al aljibe 1 o al aljibe 2. Importante a la hora de tener en cuenta la potencia cedida de cada una de ellas al aljibe al que esté conectada.

Para asegurar el funcionamiento de las UTAs se tienen que cumplir las tres primeras condiciones de control, siendo la tercera de ellas la más predominante

Por otro lado, al calcular la temperatura del parque, se ha calculado la temperatura de esta con y sin evaporativo para ver la influencia que tiene este sobre la temperatura final. Gracias a los controles impuestos, podemos asegurar la condición $T_{parque} < T_{max_{parque}}$, reforzando así la función de las UTAs. Por tanto, se pondrán para el **sistema evaporativo**:

- **Control por temperatura máxima en el parque** ($T_{parque} > T_{max_{parque}}$).
- **Control funcionamiento UTAs**. Funcionará siempre que estén conectadas las unidades de tratamiento de aire.

Al igual que en el caso de las UTAs, para asegurar su funcionamiento, se tienen que cumplir las dos condiciones de control.

3.1. Plaza

La plaza situada en la calle Dr. Jiménez Díaz, estará provista únicamente de una UTA, las cuales impulsarán un caudal de 15.000 m³/h con rejillas, a una velocidad de salida de 3 ó 4 m/s



Figura 17. Situación actual de la plaza

Al igual que en el parque, la UTA podrá conectarse mediante conexión 2T constituida por una tubería de impulsión y otra de retorno al aljibe.

3.1.1. Acondicionamiento y confinamiento del espacio

El parque presenta un volumen de acondicionamiento de aproximadamente 300 m³. Los cálculos de las renovaciones por hora (ACH) en dicha zona, se han obtenido por simulación CFD. Para cada velocidad de viento estudiada, se obtiene una renovación por hora (ACH) equivalente en función del grado de confinamiento que se aplica:

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	ACH (ren/h)
0	0
1	15
4	100

Tabla 4. ACH en la plaza

Gracias a estos datos podemos calcular el caudal de aire procedente del exterior que entra en el espacio acondicionado en función de la velocidad del viento, obteniendo una ecuación lineal representada en la siguiente figura:

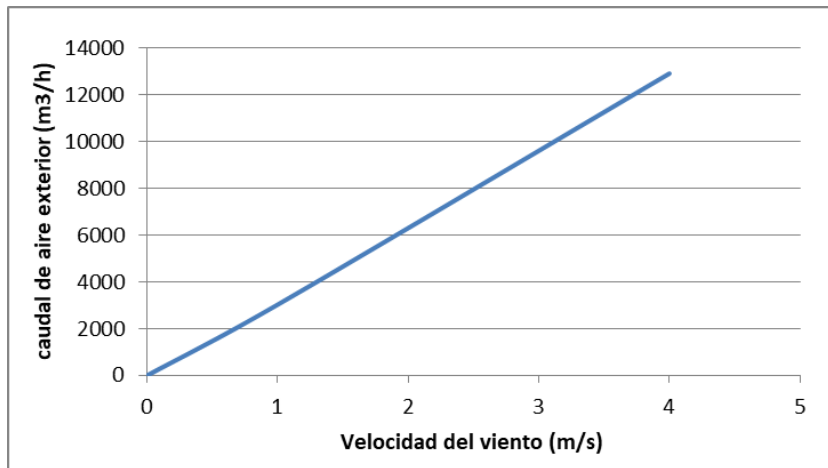


Figura 18. ACH de la plaza

$$m_{ext} = -3,55 \cdot 10^{-15} + 2963,7 \cdot v_{viento} + 65,9 \cdot v_{viento}^2 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

3.1.2. Sistema de control plaza

Para asegurar los objetivos y las condiciones de diseño establecidas se ponen una serie de controles que determinaran el funcionamiento de las diferentes tecnologías.

Para el funcionamiento de la UTA se colocará:

- **Control por temperatura máxima en la plaza** ($T_{plaza} > T_{max_{plaza}}$), para asegurar confort térmico en la zona a acondicionar. En el caso en el que se cumpla esta condición se encenderá la UTA.
- **Control funcionamiento** si la temperatura de agua a la entrada es superior que la temperatura exterior ($T_{ext} < T_{agua_{ent}}$). Si se cumple esta condición se apagaría ya que no sería coherente que el agua con la que vamos a enfriar el aire exterior esté más caliente que este.
- **Control por horario de funcionamiento**. Se establecerá un horario de funcionamiento dependiendo del uso que se va a hacer de la zona.
- **Control de conexión** para saber si está conectado al aljibe 1 o al aljibe 2. Importante a la hora de tener en cuenta la potencia cedida al aljibe al que esté conectada.

Para asegurar el funcionamiento de la UTA se tienen que cumplir las tres primeras condiciones de control, siendo la tercera de ellas la más predominante

Por otro lado, al calcular la temperatura de la plaza, se ha calculado la temperatura de esta con y sin el posefriamiento evaporativo para ver la influencia que tiene este sobre la temperatura final. Gracias a los controles puestos, podemos asegurar la condición $T_{plaza} < T_{max_{plaza}}$, reforzando así la función de la UTA. Por tanto, para el **sistema evaporativo** se pondrán:

- **Control por temperatura máxima en el plaza** ($T_{plaza} > T_{max_{plaza}}$).
- **Control funcionamiento UTA**. Funcionará siempre que esté conectada la unidad de tratamiento de aire.

Al igual que en el caso de la UTA, para asegurar su funcionamiento, se tienen que cumplir las dos condiciones de control

3.2. Marquesina

La marquesina se encuentra en la calle Manuel Villalobos (figura) y tendrá incorporada un sistema convectivo-radiante tanto en la pared frontal como en el techo.



Figura 19. Marquesina desde calle Manuel Villalobos dirección Fray Isidoro de Sevilla



Figura 20. Marquesina

3.2.1. Sistema de control de la marquesina

Para asegurar los objetivos y las condiciones de diseño establecidas se ponen una serie de controles que

determinaran el funcionamiento de las diferentes tecnologías.

Para el funcionamiento de la marquesina se colocará:

- **Control por temperatura radiante media máxima** ($T_{rm} > T_{max_{rm}}$), para asegurar confort térmico en la zona a acondicionar. En el caso en el que se cumpla esta condición se encenderá la marquesina.
- **Control funcionamiento** si la temperatura de agua a la entrada es superior que la temperatura exterior ($T_{ext} < T_{agua_{ent}}$). Si se cumple esta condición se apagaría ya que no tiene sentido que el agua con la que vamos a enfriar el aire exterior esté más caliente que este.
- **Control por horario de funcionamiento**. Se establecerá un horario de funcionamiento dependiendo del uso que se va a hacer de la zona.
- **Control de conexión** para saber si está conectado al aljibe 1 o al aljibe 2. Importante a la hora de tener en cuenta la potencia cedida al aljibe al que esté conectada.

Para asegurar el funcionamiento de la marquesina se tienen que cumplir las tres primeras condiciones de control, siendo la tercera de ellas la más predominante

3.3. Colegio

En la cubierta del colegio de Educación Infantil y Primaria Arias Montano, se instalará el sistema de película descendente cuya distribución será una de las variables de diseño del proyecto.



Figura 21. Mapa de la cubierta del colegio



Figura 22. Patio del colegio. Recreación Revit

El falling-film es una tecnología que juega un papel muy importante en el proyecto, ya que se encarga de enfriar durante la noche, el agua de los aljibes que se han calentado durante el funcionamiento de los sistemas de las diferentes zonas.

3.3.1. Sistema de control del colegio

Para asegurar los objetivos y las condiciones de diseño establecidas se ponen una serie de controles que determinaran el funcionamiento de las diferentes tecnologías.

Para asegurar un funcionamiento eficaz en el **falling film** se dispondrá de:

- **Control de funcionamiento.** Inicialmente los dos aljibes tendrán distintas temperaturas debido a las diferentes tecnologías que van conectadas a cada una de ellas. Por ello, para que el enfriamiento de ambos aljibe durante la noche sea lo más equilibrado posible, se enfriará el aljibe con mayor temperatura hasta que alcance una diferencia de temperatura con respecto al otro de 0,04. Una vez se alcance esa diferencia, comenzarán a enfriarse a la misma vez.
- **Control de conexión** para saber si está conectado al aljibe 1 o al aljibe 2. Importante a la hora de tener en cuenta la potencia absorbida del aljibe al que esté conectada.

Cabe destacar la ausencia de controles de temperaturas del agua ya que queremos que el agua final quede lo más fría posible y así mejorar el rendimiento global del proyecto.

3.4. Modelo de simulación

3.4.1. Aljibes

Como se ha comentado anteriormente, habrá dos aljibes independiente cuyos volúmenes de acumulación serán objeto de estudio a la hora de optimizar el proceso.

Se estudiará de forma independiente la influencia que tienen las diferentes tecnologías que irán conectadas a

cada una de ellas para calcular la temperatura final del agua en el aljibe para intervalos de tiempos de 10 min. Este parámetro será muy importante a la hora de hacer las simulaciones, ya que es un indicador de las magnitudes globales del sistema con el que podremos ver si el proyecto funciona adecuadamente o cumple las condiciones de diseño.

Calculo de la temperatura final en cada uno de los aljibes:

$$T_{final_{aljibe\ i}} = T_{final_{aljibe\ i-1}} + \frac{Q_{TOT} \cdot 600}{V_{aljibe} \cdot \rho_{agua} \cdot cp_{agua}} \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Donde:

- Q_{TOT} [W] : sumatorio de las potencias aportadas por todas las tecnologías que están conectadas a cada aljibe.
- $T_{final_{aljibe\ i-1}}$: temperatura final del aljibe en el periodo anterior.
- V_{aljibe} : volumen total de cada uno de los aljibes.
- $\rho_{agua} = 998 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$: densidad del agua.

3.4.2. Unidad de tratamiento de aire

Tal y como hemos visto anteriormente en la zona de la plaza y el parque, se incorporarán dos unidades de tratamiento de aire colocadas a una distancia determinada con caudales de aire y agua fijados.

Se ha elegido una UTA de la marca TROX (TROX, n.d.) para suministrar un caudal de aire de impulsión determinado, cuya especificación dentro del catálogo del fabricante se corresponde con el modelo TKM 50 HE 124x074. Además, la hoja de características técnicas facilita tanto la eficiencia de la UTA como el caudal de agua necesario entre ellas.

A continuación, se comentará de forma detallada el cálculo del flujo asociado al agua de aporte a la batería y las temperaturas del agua y el aire a la salida de esta.

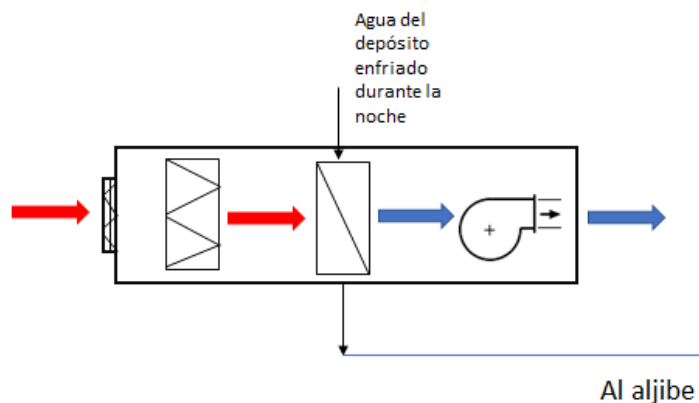


Figura 23. Esquema UTAs

Flujo de calor asociado al agua de aporte de cada una de las baterías:

$$Q_{UTA} = \varepsilon \cdot C_{min} \cdot (T_{aire_{ent}} - T_{agua_{ent}}) \text{ [W]}$$

Donde:

- C_{min} es el valor mínimo entre $C_{aire} = \dot{m}_{aire} \cdot cp_{aire}$ y $C_{agua} = \dot{m}_{agua} \cdot cp_{agua} \left[\frac{W}{K} \right]$
- ε : eficiencia de las baterías.
- $T_{aire_{ent}} = T_{ext} [^{\circ}C]$
- $T_{agua_{ent}} [^{\circ}C]$: temperatura del agua proveniente del aljibe al que estén conectadas.

Por otro lado, para el cálculo de las temperaturas a la salida de la batería, tanto del agua como de aire se hace uso de las siguientes expresiones:

$$T_{aire_{salida}} = T_{aire_{ent}} + \frac{Q_{UTA}}{cp_{aire} \cdot \dot{m}_{aire}} [^{\circ}C]$$

Donde:

- $cp_{aire} = 1007 \left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right]$ se considera constante independientemente de la temperatura.
- $\dot{m}_{aire} \left[\frac{m^3}{h} \right]$: caudal de aire introducido.

$$T_{agua_{salida}} = T_{agua_{ent}} + \frac{Q_{UTA}}{cp_{agua} \cdot \dot{m}_{agua}} [^{\circ}C]$$

Donde:

- $\dot{m}_{agua} = \left[\frac{L}{h} \right]$: el caudal de agua introducido.
- $cp_{agua} = 4180 \left[\frac{J}{Kg \cdot K} \right]$ se considera constante independientemente de la temperatura

Una vez se han hecho los cálculos de las temperaturas que resultarían tras pasar por las unidades de tratamiento de aire, se calculan las temperaturas finales en el volumen de ocupación, los cuales serán parámetros de interés para el buen acondicionamiento y cumplimiento de los objetivos principales del proyecto, asegurando así el confort térmico en los recintos:

$$T_{recinto} = \frac{\dot{m}_{ext} \cdot T_{ext} + \dot{m}_{aire} \cdot T_{aire_{sal}}}{\dot{m}_{ext} + \dot{m}_{aire}} [^{\circ}C]$$

3.4.3. Sistema evaporativo

Para el caso del sistema evaporativo se calculará la temperatura de aire de salida, para posteriormente calcular la temperatura de mezcla en el volumen de ocupación y poder ver el efecto que tiene. También se calculará la cantidad de agua que se va a evaporar por el efecto evaporativo para observar la cantidad de agua que se pierde.

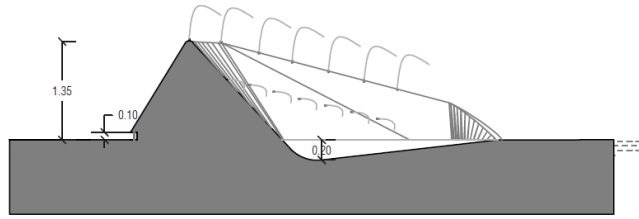


Figura 24. Esquema fuente de la parque

A continuación, se muestra el cálculo de la temperatura de aire de salida del sistema evaporativo:

$$T_{aire\,salida} = T_{aire\,ent} - \varepsilon_{evap}(T_{aire\,ent} - T_{bh}) \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Donde:

- ε_{evap} : eficiencia del sistema evaporativo.

Aunque el sistema evaporativo sea independiente de los aljibes, es necesario calcular la potencia transferida para así poder calcular posteriormente la cantidad de agua que se evapora:

$$Q_{evap} = \dot{m}'_{ext} \cdot c_{p\,aire} \cdot (T_{aire\,ent} - T_{aire\,salida}) \text{ [W]}$$

Donde:

- $\dot{m}'_{ext} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right]$: caudal aire exterior que ingresa dentro del espacio a acondicionar, calculado por CFD.

La masa de agua evaporada se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$m_{agua\,evap} = \frac{Q_{evap} \cdot Periodo}{h_{fase}} \text{ [kg]}$$

Donde:

- $Periodo = 600 \text{ s}$: intervalo de tiempo que se ha considerado para conocer la evolución del sistema.
- $h_{fase} = 2257 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$: entalpía de cambio de fase.

Por otro lado, se ha tenido en cuenta la humedad del recinto, calculando previamente la humedad de impulsión una vez que el aire exterior haya pasado por el sistema evaporativo:

$$w_{imp} = w_{ext} + \frac{m_{agua\,evap}}{m_{aire\,seco}} \left[\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire seco}} \right]$$

Donde:

- $w_{ext} = 0,012 \left[\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aire seco}} \right]$: toma un valor constante debido a errores en la toma de datos con respecto a este parámetro, siempre teniendo en cuenta que se trata de un valor desfavorable.
- $m_{aire\,seco} \text{ [Kg]}$ calculado a través de la siguiente fórmula:

$$m_{aire\,seco} = w_{ext} + \frac{m_{aire}}{(1 + w_{ext})} \text{ [Kg]}$$

Donde:

$$m_{aire} = \dot{m}_{aire} \cdot Periodo \text{ [Kg]}$$

Una vez se han hecho los cálculos de las temperaturas y humedades que resultarían tras pasar tanto por las unidades de tratamiento de aire como por el sistema evaporativo, se calculan las temperaturas y humedades finales en el volumen de ocupación, los cuales serán parámetros de interés para el buen acondicionamiento y cumplimiento de los objetivos principales del proyecto, asegurando así el confort térmico en la zona de la plaza:

$$T_{recinto} = \frac{\dot{m}_{ext} \cdot T_{ext} + \dot{m}'_{ext} \cdot T_{ext} + \dot{m}_{aire} \cdot T_{aire_{sal1}}}{\dot{m}_{ext} + \dot{m}'_{ext} + \dot{m}_{aire}} \text{ [}^{\circ}\text{C]}]$$

$$w_{recinto} = \frac{\dot{m}_{ext} \cdot w_{ext} + \dot{m}'_{ext} \cdot w_{imp}}{\dot{m}_{ext} + \dot{m}'_{ext}} \left[\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg aireseco}} \right]$$

3.4.4. Falling film

Para instalar el falling film se hará uso de paneles solares de alta eficiencia sin marco de 1 m de ancho y 2 m de largo cada uno. Los paneles se dispondrán con una inclinación de 10-15° en la dirección de circulación del agua, cuyo ángulo ha sido estudiado para que el sistema sea lo más eficiente posible.

Por otro lado, la película descendente de agua sobre los paneles se creará gracias a la impulsión mediante boquillas de aspersión abanico de una apertura de 160°, colocando 1 por metro, cuyo objetivo es garantizar un caudal mínimo por boquilla con una presión de 1,5 bar en el punto de conexión, sabiendo, según el fabricante, que posee un caudal nominal de 1000 L/h con una presión de 3 bar.



Figura 25. Falling film

El cálculo de la potencia disipada y la cantidad de agua evaporada por el sistema está sujeto a la condición, $T_{agua_{ent}} > T_{bh} + 1$, ya que si esto se cumple, el efecto evaporativo es mayor y por tanto:

$$Q_{radiante} = (33,11 \cdot (T_{depósito} - T_{bh}) + 5 \cdot (T_{depósito} - T_{cielo})) \cdot A_{disipación} \cdot CF \text{ [W]}$$

$$m_{agua_{evap rad}} = Q_{radiante} \cdot \frac{33,11 \cdot Periodo}{(33,11 + 5) \cdot h_{fase} \cdot 1000} \text{ [Kg]}$$

Donde:

- $h_{fase} = 2257 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$
- $T_{depósito} = T_{aguaent} [^{\circ}C]$
- $A_{disipación}$: área efectiva por donde desciende la película de agua.
- $CF = 1 - 1.273 \cdot e^{-0.1647 \cdot Q^{0.5212}}$: factor corrector
- $Q \left[\frac{L}{h \cdot m^2} \right]$: caudal de agua que desciende por metro cuadrado por el sistema. Conocida el área de disipación, el caudal por metro y el número de boquillas:

$$Q = \frac{Q_{min} \cdot N^{\circ}boquillas}{A_{disipación}} \left[\frac{L}{h \cdot m^2} \right]$$

- Q_{min} : caudal mínimo por boquilla.

El número de boquillas será uno de los parámetros importantes a la hora de la simulación, ya que nos permite saber la cantidad de paneles viables para el área disponible en el techo del colegio y para conseguir el mayor rendimiento posible.

En caso contrario si $T_{aguaent} < T_{bh} + 1$, la potencia radiante y la cantidad de agua evaporada resultan:

$$Q_{radiante} = (3,44 \cdot (T_{depósito} - T_{bh}) + 5 \cdot (T_{depósito} - T_{cielo})) \cdot A_{disipación} \cdot CF [W]$$

$$m_{aguaevaprad} = Q_{radiante} \cdot \frac{3.44 \cdot Periodo}{(3.44 + 5) \cdot h_{fase} \cdot 1000} [Kg]$$

Por otro lado, también se ha calculado la temperatura de agua a la salida del falling pudiendo observar la bajada de temperatura experimentada por el agua proveniente del aljibe gracias a su innovadora función explicada anteriormente:

$$T_{agua_salida} = T_{aguaent} - \frac{Q_{radiante}}{cp_{agua} \cdot \dot{m}_{agua}} [^{\circ}C]$$

3.4.5. Sistema convectivo-radiante (Thermatop)

El modelo desarrollado se basa en fundamentos teóricos y los parámetros de este han sido obtenidos de la experimentación de un prototipo experimental. Con el objetivo de predecir la potencia absorbida (modo refrigeración), tanto convectiva como radiante, para el sistema de cubierta radiante ensayada, es necesario formular un modelo que permita determinar la potencia absorbida en función de la temperatura de impulsión, el área proyectada de la cubierta radiante en base al número de módulos y del caudal de impulsión.

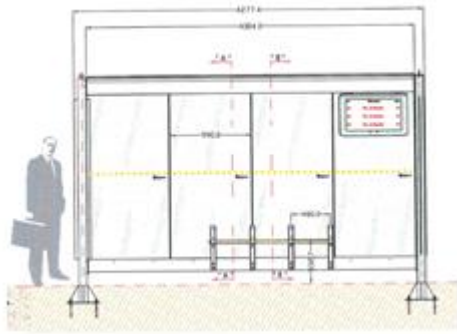


Figura 27. Vista frontal marquesina

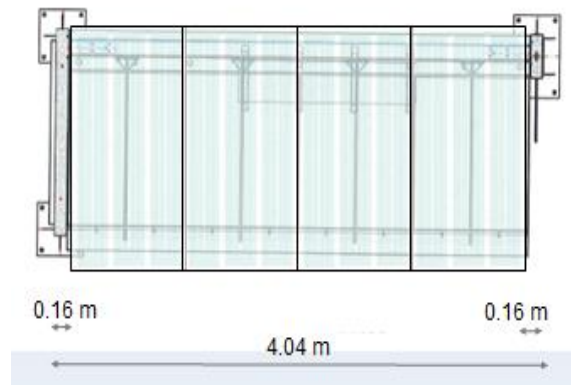


Figura 26. Vista en planta marquesina

Teniendo en cuenta las dimensiones de la marquesina tal y como se ven en las figuras 26 y 27, se ha decidido instalar 4 módulos de 3 madejas cuyas especificaciones son:

Tipo 1: panel Thermatop 175_3x	
Dimensiones	930x1750 mm
Superficie	1.6 m ²
Longitud de tubería	53.60 m
Diámetro de la tubería	16.0 mm
factor 'k' refrigeración	6.38
exponente 'n' refrigeración	1.10
factor 'k' calefacción	5.35
exponente 'n' calefacción	1.09
Nº de paneles	187

Figura 28. Especificaciones panel Thermatop

Por tanto, la configuración final del Thermatop quedaría tal y como se puede ver en la siguiente figura.

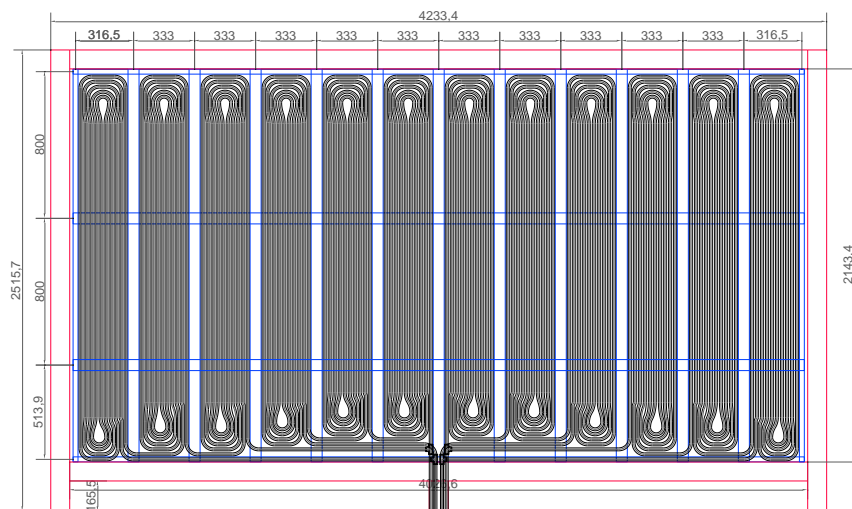


Figura 29. Configuración Thermatop

A continuación, se explicará la metodología que se ha seguido para el cálculo de la potencia total según los fundamentos teóricos comentados al principio del apartado.

La potencia total del sistema convectivo-radiante se calcula como:

$$Q_{maquesina} = P_{cv} + P_{rad} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

En este caso cabe destacar que al haber dos superficies que contienen el thermostat (superficie frontal y horizontal) en cada una de ellas hay que calcular su correspondiente potencia radiante y convectiva, ya que al tener diferentes factores de forma como veremos más adelante, darán diferentes temperaturas del agua a la salida.

La potencia referida a las ganancias térmicas convectivas con el aire circulante del habitáculo se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_{cv} = h_{cv} \cdot (DTLM_{cv}) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Donde la $DTLM_{cv}$ corresponde a la temperatura media logarítmica a partir de la cual se modela la transferencia convectiva:

$$DTLM_{cv} = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{out}}\right)} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Donde:

- $\Delta T_{in} = T_{ext} - T_{agua_{ent}}$: diferencia de temperatura a la entrada
- $\Delta T_{out} = T_{ext} - T_{agua_{sal}}$: diferencia de temperatura a la salida
- $T_{agua_{sal}}$: temperatura del agua a la salida de la superficie correspondiente que se está calculando.

La utilización de la DTLM implica la suposición de que la variación de temperaturas entre ambos fluidos es proporcional a la diferencia de temperaturas. Esta suposición ha sido corroborada mediante los datos obtenidos de la experimentación.

El coeficiente de película convectivo se modela en base a la correlación de Morgan para un cilindro largo horizontal según la ecuación:

$$h_{cvi} = K_i \cdot DTLM_{cv}^{n_i} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Donde los coeficientes K y n son determinados en base a los datos obtenidos de la experimentación del prototipo experimental. Estos coeficientes varían en función del régimen (calefacción o refrigeración). Sin embargo, en nuestro caso se ha tenido solo en cuenta el régimen de refrigeración, donde estos coeficientes toman los valores:

- $K = 1.8127$
- $n = 0.4596$

Por otro lado, para el cálculo de la potencia referida a las ganancias térmicas radiantes entre el fluido y las

superficies del habitáculo, se toma como hipótesis que la diferencia de temperaturas representativa es inferior a 100 K y por tanto es asumible el error cometido al linealizar el flujo por radiación [40].

La potencia referida a las ganancias térmicas radiantes se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_{rad} = h_{rad} \cdot DTLM_{rad} \quad [W]$$

Donde la $DTLM_{rad}$ corresponde a la temperatura media logarítmica a partir de la cual se modela la transferencia radiante:

$$DTLM_{rad} = \frac{\Delta T_{in} - \Delta T_{out}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{out}}\right)} \quad [^{\circ}C]$$

Donde:

- $\Delta T_{in} = T_{rm1} - T_{agua_{ent}}$: diferencia de temperatura a la entrada
- $\Delta T_{out} = T_{rm1} - T_{agua_{sal}}$: diferencia de temperatura a la salida
- $T_{agua_{sal}}$: temperatura del agua a la salida de la superficie correspondiente que se está calculando.

Para poder realizar los cálculos de la potencia radiante de cada una de las superficies, se ha tenido que suponer inicialmente una temperatura del agua a la salida ($T_{agua_{sal}}$) para poder comenzar con el proceso iterativo impuesto, eligiendo su valor de tal manera que sea compatible con el cálculo de la DTLM.

La temperatura radiante media (T_{rm}) es deducida en base a la temperatura de cada una de las superficies de la celda (ST_i) por su correspondiente factor de forma (f_i) obtenido mediante el software EES, nombrando cada una de las superficies, siendo de nuestro interés en este caso las superficies 1 y 2.

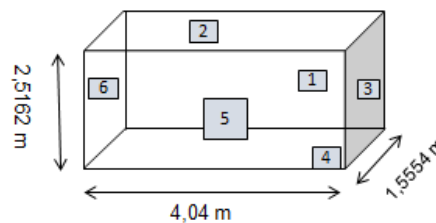


Figura 30. Diferentes superficies de la marquesina

El coeficiente de película radiante es deducido de la ecuación de la potencia emisiva de Stefan-Boltzmann para una superficie real. La siguiente ecuación es utilizada porque la diferencia de temperatura entre el agua y las superficies colindantes es menor de 100 K por lo que se puede aplicar la linealización del coeficiente de película radiante.

$$h_{rad} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(\frac{T_{rm} + \overline{T_w}}{2}\right)^3 \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$$

Donde:

- $\varepsilon = 0.8$: emisividad, la cual es determinada en base a la experimentación.

- $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$: constante de Stefan-Boltzmann
- $\overline{T_w}$ [$^{\circ}C$] : se asume como la temperatura representativa correspondiente a la temperatura media del agua entre la entrada y la salida del sistema radiante.

$$\overline{T_w} = \frac{T_{water\ in} + T_{water\ out}}{2}$$

Por otro lado, la temperatura de retorno del agua que circula a través del Thermatop se calcula mediante la fórmula:

$$T_{agua_{sal}} = T_{eq} - (T_{eq} - T_{agua_{ent}}) \cdot e^{-\frac{U \cdot A}{\dot{m} \cdot c_{p_{agua}}}} \quad [^{\circ}C]$$

Donde:

- $U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$: coeficiente global de transferencia correspondiente a la suma de los coeficientes de películas convectivo y el coeficiente de transferencia radiante.
- $A = 1.6 [m^2]$: área proyectada en función del número de módulos de las que disponga la cubierta activa
- $\dot{m} = 0.133 \left[\frac{Kg}{s} \right]$: flujo másico que es impulsado teniendo en cuenta que pasa 2L/min como máximo por cada módulo de 3 circuitos según el fabricante y tanto en la superficie vertical como en la horizontal hay un total de 4 módulos.
- $T_{eq} [^{\circ}C]$: temperatura equivalente de transferencia de calor, la cual se determina según la ecuación:

$$T_{eq} = \frac{h_{rad} \cdot T_{rad} + h_{cv} \cdot T_{ext}}{h_{rad} + h_{cv}} \quad [^{\circ}C]$$

5 RESULTADOS

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones una vez se han integrado las diferentes tecnologías. Bajo el cumplimiento de las condiciones de diseño impuestas, se optimizará los parámetros variables de la instalación.

4.1. Justificación enfriamiento Falling Film

Tal y como se ha visto en apartados anteriores, una de las tecnologías más importantes e influyentes es el sistema Falling Film que irá instalado en la cubierta del colegio. Esta técnica nos permite enfriar, mediante refrigeración por radiación nocturna el agua que se ha calentado durante el día tras el intercambio de calor con las zonas a climatizar.

Por ello, antes de comenzar con el estudio y búsqueda de la solución más óptima, se han estudiado dos posibles casos de enfriamiento, dependiendo de las diferentes conexiones que habrá en los dos volúmenes de acumulación existentes, ya que dependiendo de la potencia absorbida por cada aljibe, tendrán una temperatura diferente al final del día. Así pues, el objetivo principal de este apartado es encontrar un modo de enfriamiento equitativo para alcanzar, al final del horario de funcionamiento del Falling film, temperaturas similares en los dos volúmenes de acumulación.

Para ambos casos, el horario de funcionamiento de la película descendente será desde las 23:00h hasta las 8:00h de forma ininterrumpida.

En el **primer modo planteado**, se enfriará el aljibe con mayor temperatura hasta que alcance una diferencia con respecto al otro de 0,04. Una vez se alcance esa diferencia, los dos aljibes comenzarán a enfriarse a la misma vez tal y como se puede ver en la imagen 31.

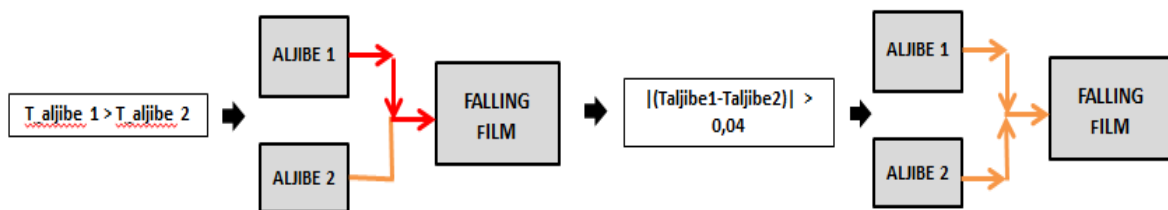


Figura 31. Enfriamiento del agua procedente de los aljibes mediante diferencia de temperatura.

En el **segundo modo planteado**, se mezclará directamente el agua proveniente de ambos aljibes adoptando una temperatura media al principio del horario de funcionamiento. A partir de este momento, comenzarán a enfriarse a la vez tal y como se puede ver en la imagen 32.

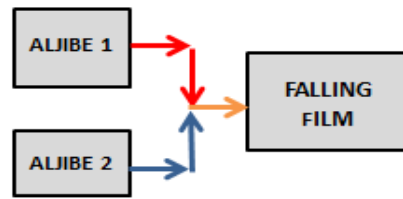


Figura 32. Enfriamiento del agua procedente de los aljibes mediante la mezcla de ambos.

A continuación, se estudiarán tres casos de conexiones en los diferentes depósitos con el objetivo de comparar la temperatura al final del horario de funcionamiento de la película descendente en el caso en el que haya poca y mucha diferencia de temperatura entre ambos aljibes durante seis días de simulación. Para ello, se enumeran los distintos parámetros de diseño y variables, los cuales serán de interés en los apartados siguientes a la hora de buscar la solución más óptima en función de las condiciones impuestas.

Parámetros fijos:

- Parque:

- Eficiencia de las baterías (0,72)
- Caudal de agua de las dos baterías (5000 L/h)
- Caudal de aire de las dos baterías (5000 m³/h)
- Volumen de ocupación (300 m³)
- Horario de funcionamiento (16:00h-20:00h ininterrumpidamente)

- Plaza:

- Eficiencia de la batería (0,72)
- Caudal de agua de la batería (5000 L/h)
- Caudal de aire de la batería (15000 m³/h)
- Volumen de ocupación (273,72 m³)
- Horario de funcionamiento (16:00h-20:00h ininterrumpidamente)

- Marquesina:

- Eficiencia (0,8)
- Caudal de agua (8 L/min)
- Área total (13,02 m²)
- Horario de funcionamiento (13:00h-15:00h ininterrumpidamente y de 17:00-19:00 en intervalos de 20 minutos)

Parámetros variables:

- Grado de confinamiento tanto en la plaza como en el parque. Representa el porcentaje total de aire que pasa por el sistema evaporativo.
- Volumen de los aljibes
- Dimensionamiento de los paneles del sistema Falling Film
- Eficiencia sistema evaporativo

→ Primer caso

En el **primer caso** estudiado, se conectarán al aljibe 1 una de las unidades de tratamiento de aire de la parque y la correspondiente a la plaza. Por otro lado, en el aljibe 2 se conectará la segunda UTA instalada en la parque y la marquesina.

Seguidamente, se representa la evolución de la temperatura en ambos aljibe para los dos modos de enfriamiento propuestos de forma independiente.

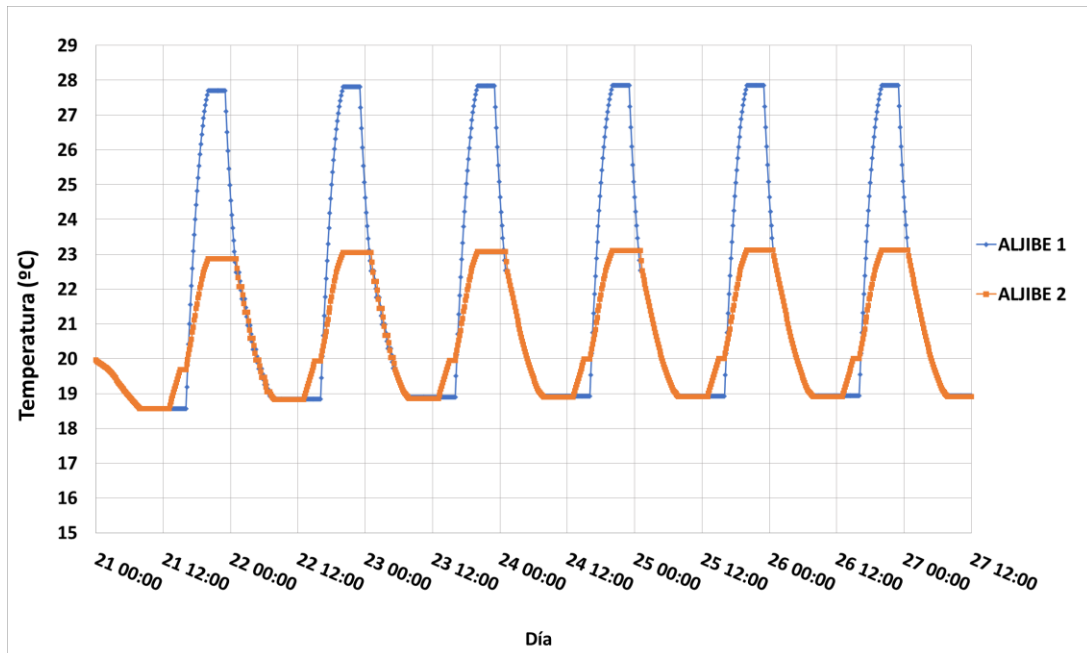


Figura 33. CASO 1 (ALJ1: 1UTAS parque + UTA plaza; ALJ2: 1UTAS parque + marquesina). Diferencia de T

Tal y como se puede ver en la gráfica, la temperatura en los aljibes inicialmente es de 20 °C, cuyo valor se ha tenido que suponer para poder comenzar la simulación. Este valor está sujeto a uno de los objetivos del proyecto, ya que las condiciones de diseño establecidas previamente señalan la necesidad de una temperatura del agua de los aljibes de entre 20 °C y 25 °C. Transcurridos seis días de simulación y teniendo en cuenta que los datos climáticos y condiciones diarias se mantienen constantes, se puede observar la estacionalidad adquirida finalmente.

Centrándonos en el último día de simulación, se puede ver como al comienzo de la mañana ambos aljibes están a la misma temperatura. A partir de las 13.00 h, la temperatura correspondiente al aljibe 2 aumenta levemente debido al inicio del funcionamiento de la marquesina, que como se ha visto anteriormente tiene un horario de funcionamiento de 13.00 h a 15.00 h. A partir de las 15.00 h, se mantiene constante la temperatura hasta que comienza a aumentar nuevamente a partir de las 16.00 h debido a la arranque de la UTA del parque. A su vez, la temperatura del aljibe 1 aumenta en el mismo instante que el aljibe 2 pero de forma más acelerada, ya que en ese momento funciona tanto una de las UTAs del parque como la UTA de la plaza, teniendo que aportar mayor potencia.

Una vez cesa el funcionamiento de todas las tecnologías encargadas de climatizar los distintos recintos, a partir de las 23.00h comienza a funcionar el Falling film, dejando un intervalo suficiente para que la temperatura exterior y del cielo bajen y aumente el rendimiento del enfriamiento radiante.

Como se puede observar y correspondiendo al primer modo de enfriamiento comentado, inicialmente se enfría el agua perteneciente al aljibe 1 al estar más caliente que la del aljibe 2. A partir de las 00.00h, en el momento en el que la diferencia de temperatura entre ambos aljibe es de 0,04, se mezclan y comienzan a enfriarse a la misma vez.

Seguidamente, se ha representado nuevamente la evolución de la temperatura en los dos aljibes para las mismas conexiones pero con el segundo modo de enfriamiento.

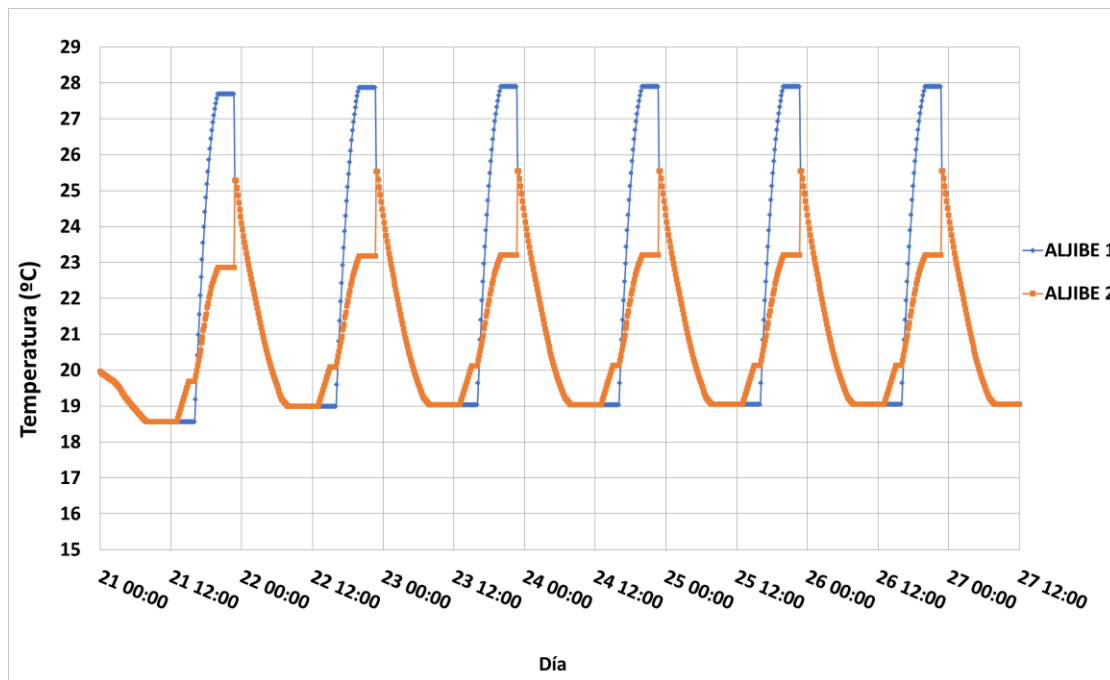


Figura 34. CASO 1 (ALJ1: 1UTAS parque + UTA plaza; ALJ2: 1UTAS parque + marquesina). Mezcla

En este caso, la evolución de la temperatura del agua durante el horario de funcionamiento de las tecnologías encargadas de refrigerar las diferentes zonas, es muy similar a la gráfica comentada anteriormente. Sin embargo, una vez comienza a funcionar la película descendente, los volúmenes de agua de ambos aljibes se mezclan hasta adoptar una temperatura media en la que el aljibe 1, que en este caso es el más caliente, se enfría y el aljibe 2 se calienta. A partir del ese instante, se enfría simultáneamente hasta las 8.00h, momento en que cesa el funcionamiento del Falling film.

→ Segundo caso.

En el **segundo caso** estudiado, se conectarán al aljibe 1 la unidad de tratamiento de aire correspondiente la plaza y en el aljibe 2 se conectarán las dos UTAs instaladas en el parque y la marquesina.

Seguidamente, se representa la evolución de la temperatura en ambos aljibe para los dos modos de enfriamiento propuestos de forma independiente.

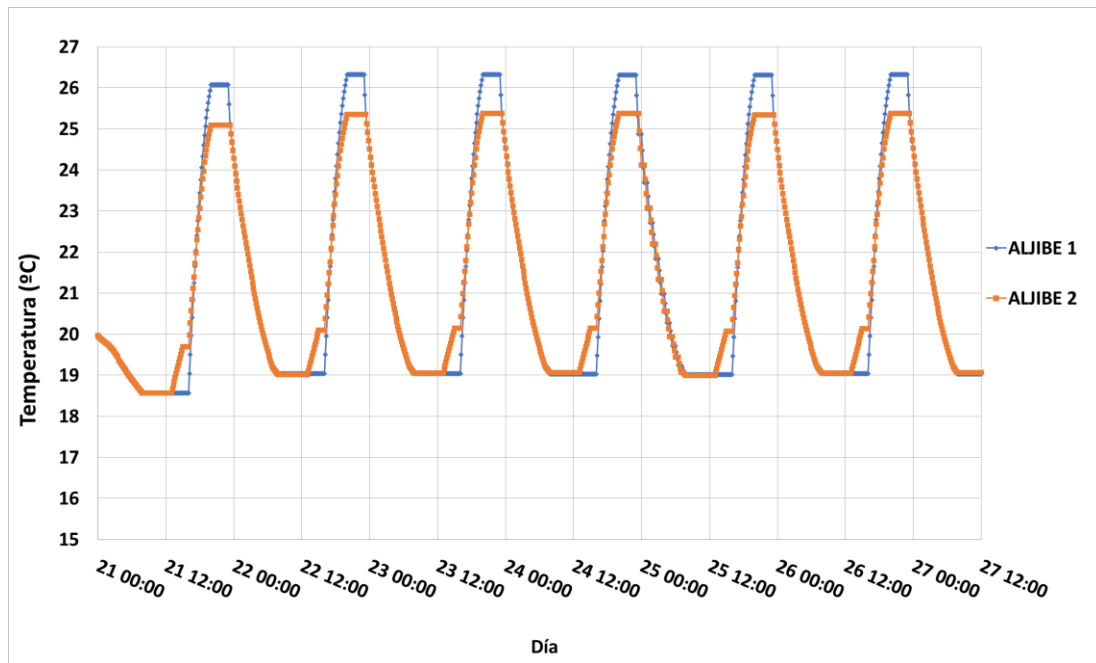


Figura 35. CASO 2 (ALJ1: UTA plaza; ALJ2: 2UTAS parque + marquesina). Diferencia de T

Centrándonos en el último día de simulación, se puede ver como al comienzo de la mañana ambos aljibes están a la misma temperatura. A partir de las 13.00 h, la temperatura correspondiente al aljibe 2 aumenta levemente debido al inicio del funcionamiento de la marquesina hasta las 15.00h. A partir de las 16.00 h, la temperatura del agua en ambos aljibes va aumentando de forma muy similar debido al funcionamiento de todas las UTAs, tanto del parque como de la plaza, hasta un punto en el que la temperatura en el aljibe 1 aumenta más rápido con respecto a la del aljibe 2 ya que como se ha comentado, la UTA de la plaza necesita mayor potencia.

En comparación con el otro caso expuesto anteriormente y uno de los puntos importante a la hora de elegir el modo de enfriamiento, se puede observar al final del día una diferencia de temperatura menor. Por consiguiente, el aljibe con mayor temperatura necesitará un intervalo menor de tiempo hasta alcanzar una temperatura cercana al otro aljibe.

Seguidamente, se ha representado nuevamente la evolución de la temperatura en los dos aljibes para las mismas conexiones pero con el segundo modo de enfriamiento.

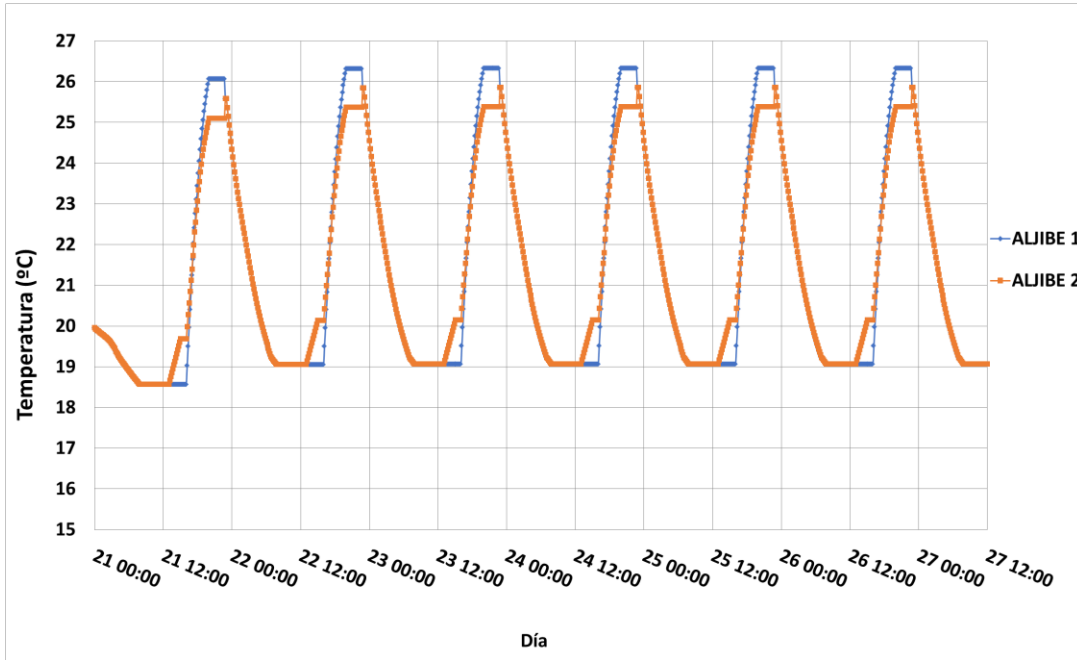


Figura 36. CASO 2 (ALJ1: UTA plaza; ALJ2: 2UTAS parque + marquesina). Mezcla

➔ Tercer caso.

En el tercer caso estudiado, se conectarán al aljibe 1 todas las unidades de tratamiento de aire y en el aljibe 2 se conectarán la marquesina.

Seguidamente, se representa la evolución de la temperatura en ambos aljibe para los dos modos de enfriamiento propuestos de forma independiente.

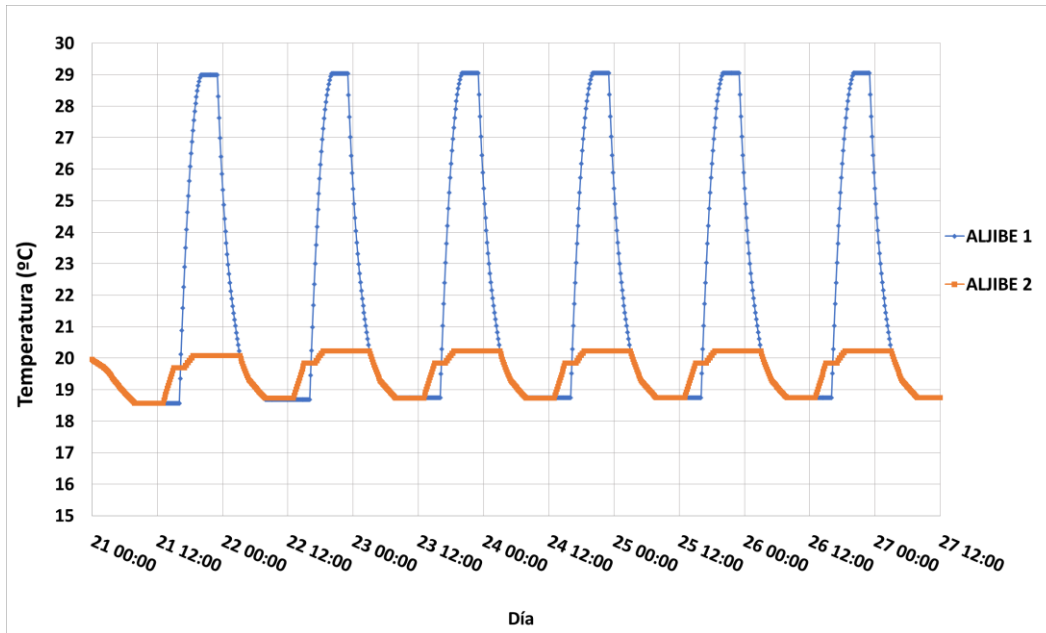


Figura 37. CASO 3 (ALJ1: Todas las UTAS; ALJ2: marquesina). Diferencia de T

Como se puede observar en la gráfica37, hay un aumento de temperatura en el aljibe 2 debido al horario de funcionamiento de la marquesina. En este caso, podemos visualizar los intervalos de 20 minutos de

funcionamiento impuestos, viendo los aumentos cuando está en funcionamiento y las zonas llanas cuando está parada.

En el momento en el que comienzan a funcionar todas las UTAS, la temperatura del aljibe 1 se dispara con respecto a la del aljibe 2 debido a que requiere de mayor potencia. Por ello, en el momento en el que se enciende el Falling film para comenzar a enfriar el agua de los aljibes calentada durante el día, comenzará a enfriar primero el aljibe 1 hasta que adopta una cierta diferencia de temperatura con respecto al otro aljibe gracias al control de funcionamiento.

Seguidamente, se ha representado nuevamente la evolución de la temperatura en los dos aljibes para las mismas conexiones pero con el segundo modo de enfriamiento.

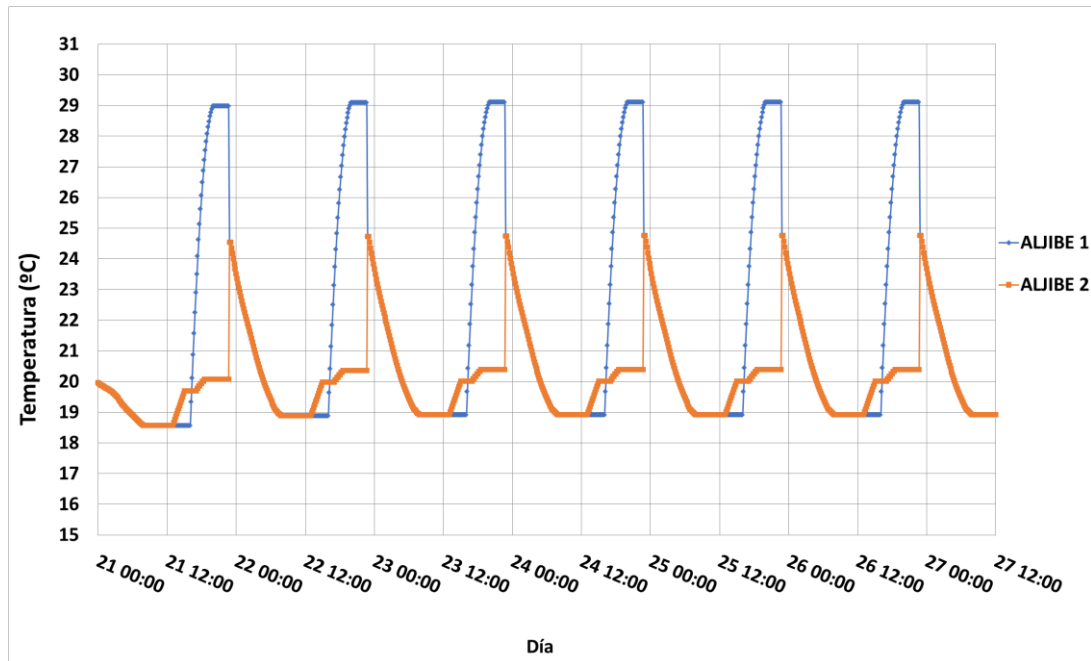


Figura 38. CASO 3 (ALJ1: Todas las UTAS; ALJ2: marquesina). Mezcla

En este caso, se puede ver notoriamente como actúa el modo de enfriamiento sobre el agua acumulada en los aljibes tras el calentamiento de este durante el día, ya que la diferencia de temperatura entre ambos depósitos es muy grande. El aljibe con menor temperatura, es decir, el aljibe 2 al mezclarse con el aljibe 1 sufre un incremento de temperatura hasta poder alcanzar la temperatura media entre ambos.

Por último, una vez se han representado los tres casos de conexiones posibles para los dos modos de enfriamiento propuesto, se recogen en la siguiente tabla las temperaturas en los aljibes una vez termina el horario de funcionamiento del Falling Film, siendo esta la temperatura mínima dada durante el día estudiado. Se comparan los dos casos más críticos en el que la diferencia de temperatura entre ambos es mínima o máxima.

	CASO 2 (- diferencia)				CASO 3 (+ diferencia)			
	ALJIBE 1		ALJIBE 2		ALJIBE 1		ALJIBE 2	
	Tmin (°C)	Aumento por cada tramo (%)	Tmin (°C)	Aumento por cada tramo (%)	Tmin (°C)	Aumento por cada tramo (%)	Tmin (°C)	Aumento por cada tramo (%)
Diferencia de temperatura	19,02		18,99		18,74		18,74	
Mezcla	19,07	0,26	19,07	0,42	18,92	0,96	18,92	0,96

Tabla 5. Comparación de los diferentes modos de enfriamiento según las conexiones en los aljibes

Para el caso 2, donde la temperatura entre ambos aljibe es mínima, se presencia una diferencia del 0,26 % entre un modo y otro de enfriamiento, siendo el modo de mezcla levemente superior. Sin embargo, para el caso 3, donde la diferencia de temperatura entre ambos aljibes es significativa, hay una diferencia de casi 1% entre ambos modos.

Aunque no hay una diferencia excesivamente grande entre un modo y otro, se empleará el primero de ellos. El aljibe con mayor temperatura se enfriará primero hasta alcanzar una diferencia de temperatura de 0,04.

4.1.1. Conexiones WaterGrid

Una vez elegido el modo de enfriamiento, antes de comenzar con el estudio y búsqueda de la solución más óptima, se elegirá uno de los casos de conexión expuesto anteriormente. Para ello, se ha calculado las temperaturas máximas, tanto de la plaza como del parque, para elegir aquel caso en que esta sea menor, ya que el principal objetivo del proyecto es garantizar una temperatura de consigna que asegure confort térmico en los recintos.

	PLAZA	PARQUE
	TMAX (°C)	TMAX (°C)
CASO 1	28,44	27,23
CASO 2	27,78	27,13
CASO 3	29,29	29,08

Tabla 6. Temperaturas máximas de los recintos según los diferentes casos

Tras ver la tabla, se puede concluir que el caso más equilibrado, eficiente y que por tanto se adoptará a la hora de hacer las simulaciones, es el caso dos (Figura 39).

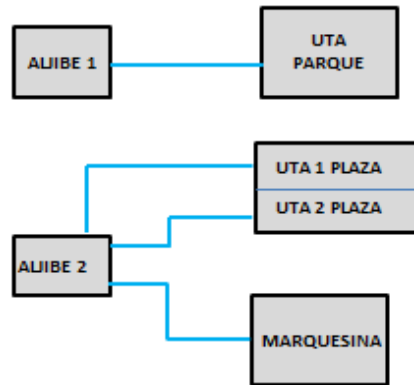


Figura 39. Conexiones en los aljibes.

4.2. Justificación del volume de los aljibes

Para determinar el volumen se toma la temperatura del depósito, una vez ha finalizado el horario de funcionamiento de todas las tecnologías, para una variedad de volúmenes que oscila desde los $10 m^3$ a los $60 m^3$. La determinación de los datos se da bajo las siguientes condiciones:

- Modo de funcionamiento 2 (Alj1: UTA plaza; Alj2: 2UTA parque + marquesina).
- Temperatura inicial del depósito de 20°C .
- Se simulan 6 días.
- Las condiciones climatológicas de simulación son las mismas todos los días.
- La temperatura del depósito adquirida corresponde a las 20.00h del octavo día de simulación, siendo esta la temperatura máxima de los aljibes.
- Los caudales de aire y agua para las UTAs del parque son $5000 m^3/h$ y $5000 L/h$ respectivamente.
- Los caudales de aire y agua para la UTA del plaza son $15000 m^3/h$ y $5000 L/h$ respectivamente.
- El caudal de agua que circula por la marquesina es de $480 L/h$.

En la tabla 7, se recoge la temperatura de los dos aljibes al final del horario de funcionamiento de todas las tecnologías, es decir, a las 20.00h para cada uno de los volúmenes a estudiar. Ambos aljibes se analizarán por separado ya que, como se ha visto en el apartado anterior, aportarán intercambios de calor diferente debido a las conexiones. Asimismo, se calcula de forma porcentual la variación de temperatura con respecto al caso que le precede para ver la influencia que tiene un aumento de volumen de acumulación en el sistema.

Volumen (m3)	T_aljibe 1 (°C)	Decremento por cada tramo (%)	T_aljibe 2 (°C)	Decremento por cada tramo (%)
10	29,83		28,7	
15	27,71	7,12	26,6	7,24
20	26,33	4,98	25,4	4,69
25	25,41	3,49	24,5	3,29
30	24,82	2,33	24,1	1,87
35	24,37	1,79	23,7	1,60
40	24,07	1,25	23,5	0,87
45	23,84	0,96	23,3	0,77
50	23,64	0,84	23,1	0,83
55	23,49	0,62	23,0	0,36
60	23,367	0,52	22,9	0,42

Tabla 7. Variación de las temperaturas de los aljibes en función de los volúmenes

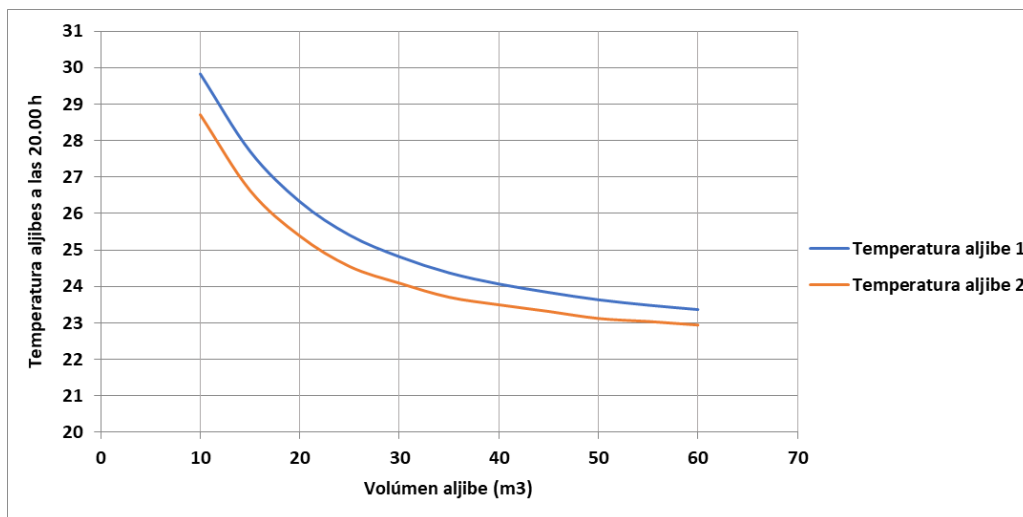


Figura 40. Temperatura del agua de los aljibes a las 20:00 h en función del volumen de acumulación

Los datos de temperatura del agua se obtienen bajo una situación muy desfavorable ya que se simulan 8 días de funcionamiento a pleno rendimiento con condiciones climatológicas correspondientes al día más caluroso del verano. Aunque esto sea así, gracias a los valores obtenidos es posible determinar que rango de volúmenes es el más adecuado. De la tabla obtenida, se deduce que al aumentar el volumen del aljibe, el decremento de la temperatura disminuye hasta niveles en los que incrementar el volumen no proporciona un descenso de la temperatura mayor al 1%. A partir de los 40 m³, aumentar el volumen del aljibe sólo propicia decrementos de temperatura inferior al 1%, por lo que se decide seleccionar el rango comprendido entre los 15 m³ y los 40 m³ para ser evaluados como posibles soluciones. Para ello, se realiza una evolución temporal de la temperatura del agua para cada uno de los volúmenes, es decir, para 15 m³, 20 m³, 25 m³, 30 m³, 35 m³ y 40 m³ como se detalla a continuación.

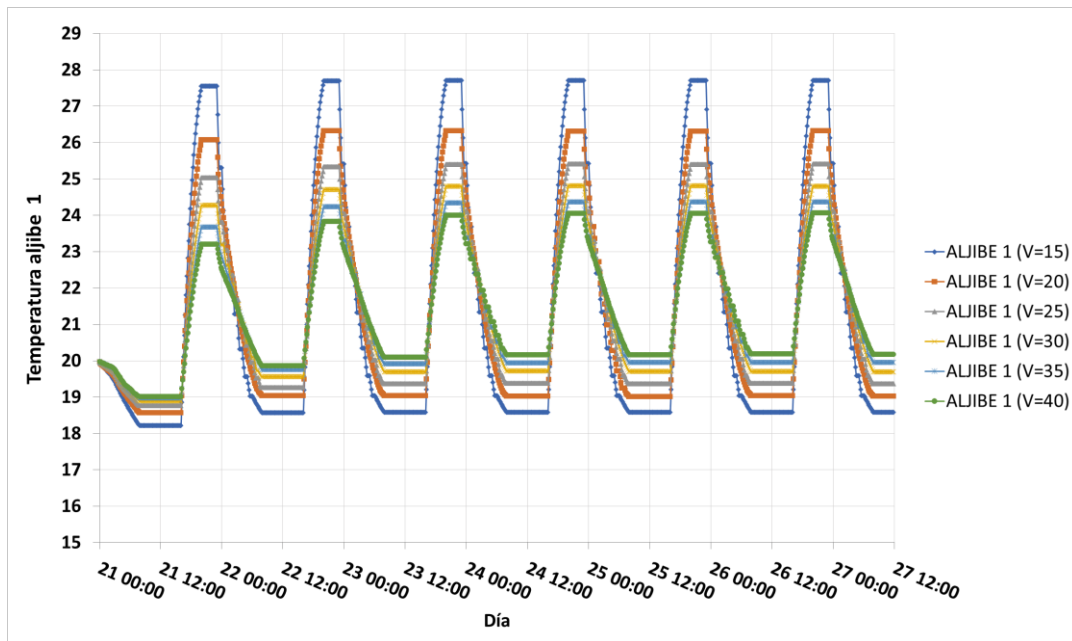


Figura 41. Evolución de la temperatura del agua del aljibe 1 para 6 volúmenes dados.

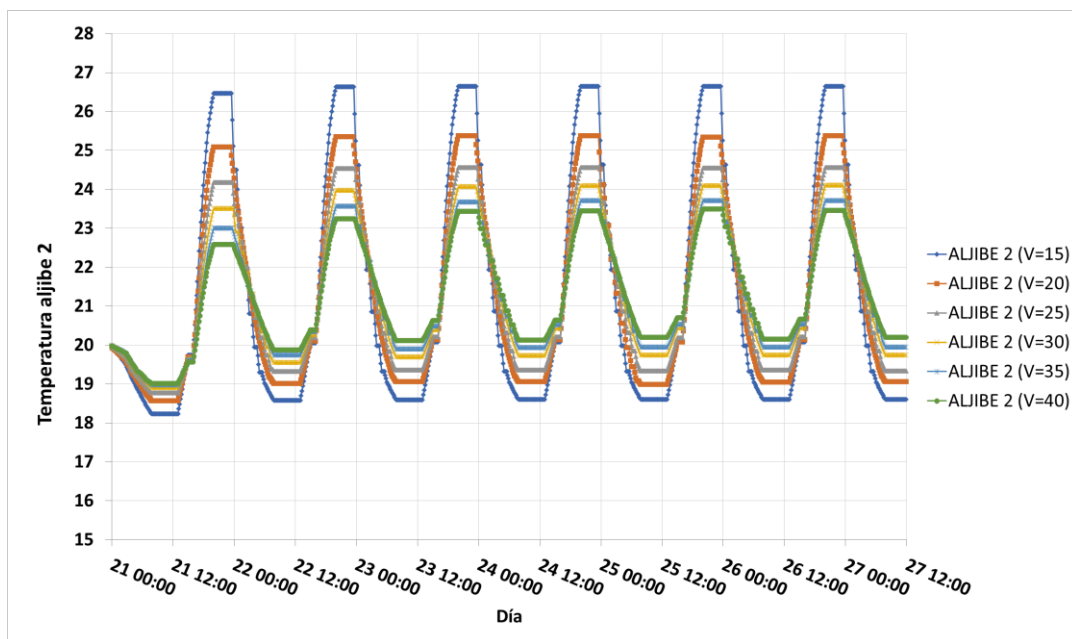


Figura 42. Evolución de la temperatura del agua del aljibe 2 para 6 volúmenes dados

En las gráficas 42 y 43, se representa la evolución temporal de la temperatura del agua, tanto del aljibe 1 como del 2, para los distintos volúmenes de acumulación. Se puede observar en el octavo día de simulación como a menor volumen, mayor capacidad de enfriamiento por parte del Falling Film, por lo que los aljibes con 15 m³ consiguen un temperatura menor al principio de la mañana en comparación al resto de volúmenes. De igual manera, al tener menos capacidad de acumulación, el incremento de temperatura al final del día con respecto al principio será mayor, ya que durante el día el agua se calentará para poder garantizar el enfriamiento del aire de los recintos y asegurar el confort térmico (tabla 8). Por tanto, se puede deducir que

cuanto mayor volumen de acumulación, mayor efectividad a la hora de enfriar el aire y mantener la temperatura óptima en los diferentes recintos.

Volumen (m ³)	Aljibe 1		ΔT	Aljibe 2		ΔT
	T_max (°C)	T_min (°C)		T_max (°C)	T_min (°C)	
15	27,71	18,59	9,12	26,6	18,6	8,04
20	26,33	19,02	7,31	25,4	19,0	6,39
25	25,41	19,38	6,03	24,5	19,3	5,20
30	24,82	19,69	5,12	24,1	19,7	4,36
35	24,37	19,95	4,42	23,7	19,9	3,77
40	24,07	20,18	3,88	23,5	20,2	3,34

Tabla 8. Incrementos de temperatura de los aljibes en función del volumen de acumulación.

Como se ha comentado anteriormente y observando la tabla, se puede ver como el ΔT entre la máxima temperatura y mínima que alcanza cada uno de los aljibes, desciende a medida que el tamaño del depósito aumenta su volumen. Como es lógico, para un incremento de masa, mayor disipación para alcanzar una misma temperatura deseada.

Por último, cabe mencionar la fluctuación inicial, la cual, a partir del día 3 se vuelve periódica alcanzando la misma temperatura para cada instante de tiempo representado. Esto es así, ya que se han tenido que suponer algunos parámetros inicialmente para poder comenzar la simulación.

Las condiciones de diseño establecidas previamente señalan la necesidad de un depósito en el que la temperatura oscile entre los 20°C y 25°C. Por tanto, como podemos ver en la tabla, a partir de 30 m³ se garantiza durante los ocho días a pleno rendimiento que no se supere la temperatura de 25°C deseada en el depósito. Sin embargo, las restricciones de espacio en el lugar donde se va a llevar a cabo la instalación, obliga a disminuir este volumen óptimo.

En la búsqueda del volumen mínimo de depósito, es necesario recordar que la obtención de dicho volumen se realiza en condiciones críticas climáticas y de funcionamiento pleno de la instalación durante el periodo de ocho días. Por ello, se deduce que este volumen obtenido es el óptimo desde el lado de la seguridad más rigurosa.

Como ya se ha comentado, la restricción de espacio para la colocación de dicho depósito obliga a disminuir el volumen óptimo obtenido aún más. Debido a ello, se continuará con la búsqueda del volumen bajo la condición de diseño predominante, garantizando una temperatura tanto en el parque como en la plaza no mayor de 28°C.

A continuación, se representa la evolución de la temperatura en ambos recintos para 15 m³, 20 m³, 25 m³ y 30 m³.

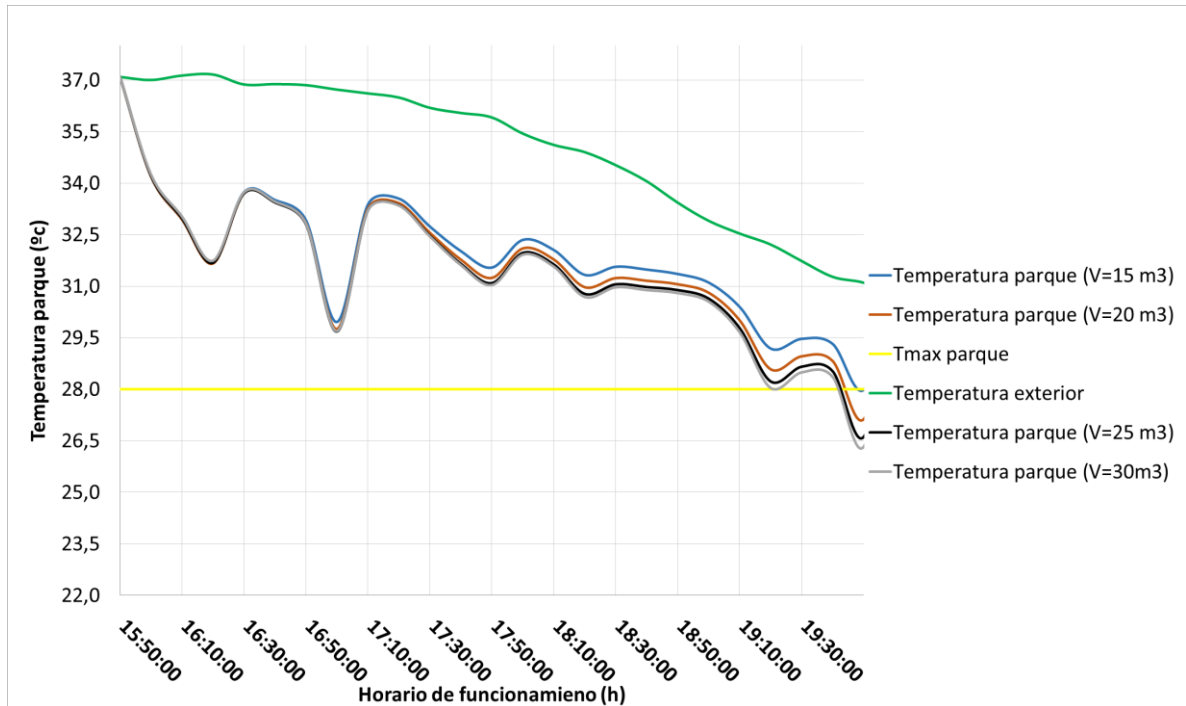


Figura 43. Evolución temperatura en el parque para diferentes volúmenes de acumulación.

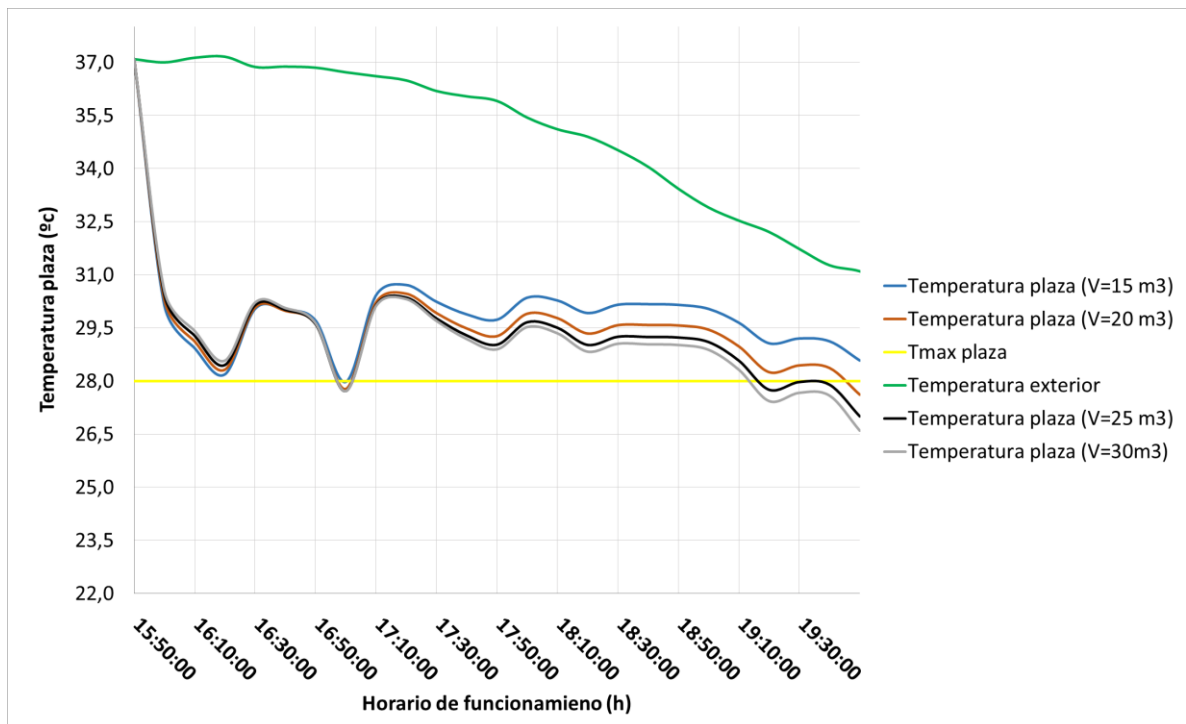


Figura 44. Evolución temperatura en el plaza para diferentes volúmenes de acumulación.

Ambas gráficas se centran, dentro del horario de funcionamiento correspondiente a las baterías instaladas en cada uno de los recintos, comprendidas entre las 16.00h y las 20.00h. Para ver la influencia que tienen sobre

la temperatura exterior de forma más gráfica, la representación se ha iniciado 10 minutos antes de la puesta en marcha pudiendo observarse un descenso brusco en la temperatura interior del recinto. Esto es así, ya que es el momento en el que el agua del aljibe se encuentra a menor temperatura.

A medida que el tiempo transcurre, la temperatura del recinto disminuye con menor intensidad que en el primer instante por la pérdida de capacidad de enfriamiento del agua de las baterías, las cuales aumentan de temperatura con el paso de las horas de funcionamiento. A pesar de ello, se puede observar una diferencia de temperatura considerable entre la temperatura final en los recintos y la temperatura exterior que habría en el caso de que no hubiera ninguna tecnología de disipación. Asimismo, la fluctuación en la evolución de la temperatura de mezcla en los recintos se debe a la influencia que tiene la velocidad del viento sobre el caudal de aire exterior que ingresa como se estimó en el capítulo 4.

La evolución de la temperatura en la plaza da valores inferiores que en el parque, acercándose notablemente a la condición de diseño impuesta de 28°C. Sin embargo, hasta las 19.00 h el volumen de mayor capacidad (30 m³) no garantiza una temperatura inferior a la máxima. Para analizar el tiempo por encima de la temperatura de acondicionamiento impuesta en ambos recinto, se ha compilado en la tabla 9, las tasas de tiempo de funcionamiento (%) para cada uno de los volúmenes de acumulación sometidos a estudio junto con la contribución en °C/h del agua proveniente de los aljibes.

Volumen	Tiempo en el que $T_{plaza} > T_{max}$	Contribución agua aljibe al recinto	Tiempo en el que $T_{parque} > T_{max}$	Contribución agua aljibe al recinto
m ³	%	°C/h	%	°C/h
15	95,83	19,83	95,83	31,6
20	95,83	21,42	95,83	33,91
25	83,33	22,27	95,83	35,15
30	79,17	22,61	95,83	35,84

Tabla 9. % $T_{recinto} > T_{max}$ y °C/h aportado por el agua en función del volumen.

De dicha tabla se deduce que a medida que aumenta el volumen de los depósitos, se reduce el tiempo en el que la temperatura del parque no supera la temperatura de diseño considerada. Este hecho se puede ver reflejado en la contribución del agua de los aljibes, ya que conforme aumenta el volumen también aumenta la eficiencia de enfriamiento.

Los porcentajes alcanzados son inaceptables, ya que se alcanzan valores cercanos al 100% del tiempo de funcionamiento fuera de la temperatura de consigna impuesta. Para mejorar esta situación, se decide iniciar un estudio de los posibles confinamientos dentro de cada recinto, gracias a la incorporación de un enfriamiento evaporativo de eficiencia 0,9, conectado al agua de red. Con este sistema, bajo un control de funcionamiento, se pretende que el espacio confinado en ninguno de los casos supere la temperatura de consigna de 28°C deseada. Este sistema sólo funcionará cuando las baterías de las UTAs no sean capaces de garantizar la temperatura deseada en el recinto, para así optimizar el consumo de agua de dicho evaporativo.

En la tabla 10, se han recopilado las tasas de tiempo de funcionamiento (%) en función del volumen de acumulación sometidos a estudio y el confinamiento. El primer porcentaje corresponde a la cantidad de aire exterior que pasa por la barrera evaporativa y el segundo porcentaje a la cantidad de aire restante que entra de exterior para cada uno de los recintos.

Volumen	Parque			Plaza		
	(20%EVAP/ 80% EXT)	(50%EVAP/ 50% EXT)	(80%EVAP/ 20% EXT)	(30%EVAP/ 70% EXT)	(50%EVAP/ 50% EXT)	(70%EVAP/ 30% EXT)
m3	%	%	%	%	%	%
15	87,50	66,67	4,17	95,83	70,83	0,00
20	70,83	0,00	0,00	91,67	62,50	0,00
25	62,50	0,00	0,00	83,33	54,17	0,00
30	41,67	0,00	0,00	83,33	54,17	0,00

Tabla 10. % Trecinto > Tmax en función del volumen y confinamiento.

Tras haber simulado todos los volúmenes de interés para cada uno de los confinamientos, teniendo en cuenta las restricciones de espacio comentadas anteriormente y adoptando los porcentajes más altos con respecto al aire que pasa por las barreras evaporativas, el volumen de 20 m³ es el óptimo, ya que para estos caso, no se supera en ningún momento la temperatura de acondicionamiento impuesta.

De dicha tabla también se deduce que, al aumentar el porcentaje de cantidad de aire que pasa por el sistema evaporativo, disminuye el tiempo en el que se supera la temperatura máxima impuesta para un mismo volumen. Asimismo, como se vio en la tabla anterior, al aumentar el volumen de acumulación, disminuye el tiempo en el que no se consigue una temperatura inferior a la de consigna para el mismo confinamiento.

Por último, una vez elegido el volumen de 20 m³ como solución óptima, se hace un estudio de la influencia que tiene la eficiencia de los sistemas evaporativos, tanto en el parque como en la plaza, con el objetivo de reducir este valor al máximo y evitar perder agua por evaporación.

Eficiencia (ε)	Plaza		Parque	
	Tiempo en el que Tplaza > Tmax (%)	Agua evaporada (Kg)	Tiempo en el que Tparque > Tmax (%)	Agua evaporada (Kg)
0,9	0	178,89	0	366,81
0,8	0	159,02	0	326,05
0,75	0	149,08	0	305,68
0,7	0	139,14	20,83	285,3
0,65	0	129,2	33,33	264,92
0,6	4,17	119,26	50	244,54

Tabla 11. % $T_{plaza} > T_{max}$ en función de la eficiencia de los sistemas evaporativos.

Tras haber simulado diferentes valores de eficiencia y calculado el % del tiempo en el que la temperatura de los recintos supera a la temperatura máxima impuesta, se puede ver como gracias a la disminución de la eficiencia, disminuye considerablemente la cantidad de agua evaporada. Para el sistema evaporativo de la plaza se reducirá la eficiencia hasta un 75 % y para el del parque hasta un 65 %.

Para confirmar el volumen de acumulación y la eficiencia de cada uno de los sistemas evaporativos como la solución más factible, es decir, respeta las limitaciones de espacio y nos garantiza un funcionamiento adecuado de la instalación en las condiciones más adversas, se representa tanto la evolución de la temperatura en los recintos como de la temperatura de los aljibes.

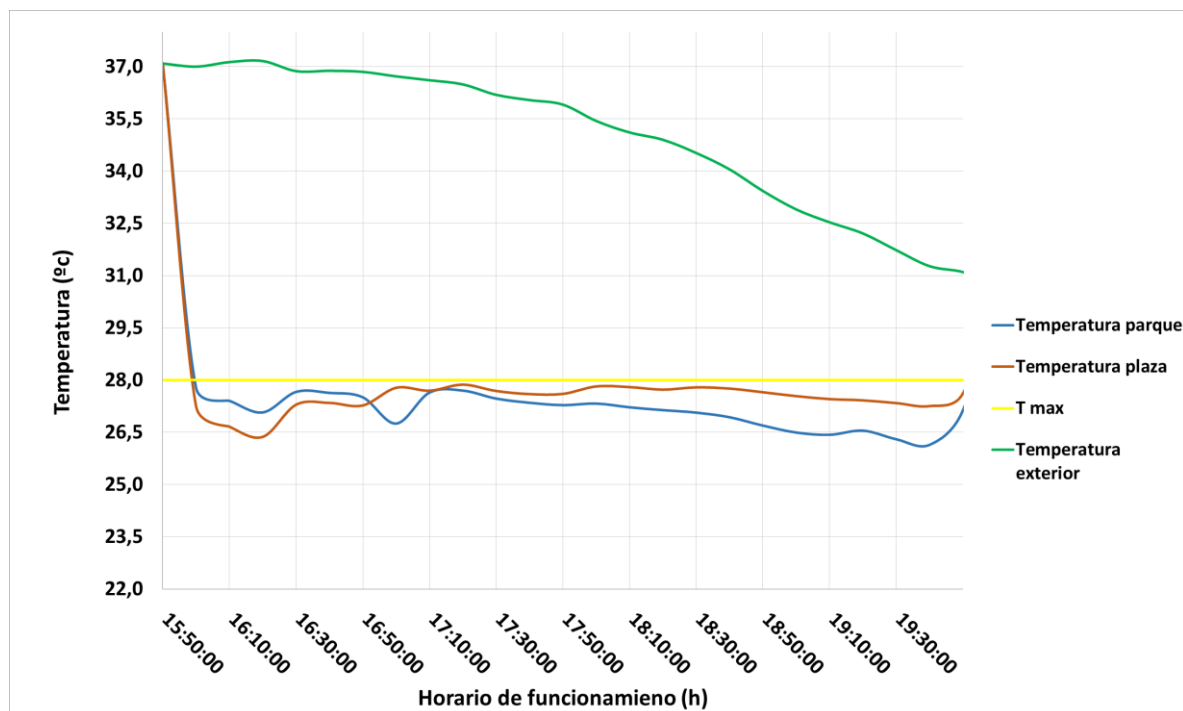


Figura 45. Evolución de la temperatura en los recintos.

Al comienzo del horario de funcionamiento, se consigue un descenso notable de la temperatura en ambas zonas con respecto a la temperatura exterior, 10 minutos antes de la puesta en marcha.

En todo momento satisface una temperatura óptima por debajo de la temperatura máxima impuesta. Además a las 17:00h la temperatura de mezcla en la plaza puede asegurar confort sin necesidad de sistema evaporativo. Sin embargo, el enfriamiento evaporativo en el parque tiene que estar en continuo funcionamiento para asegurarlo.

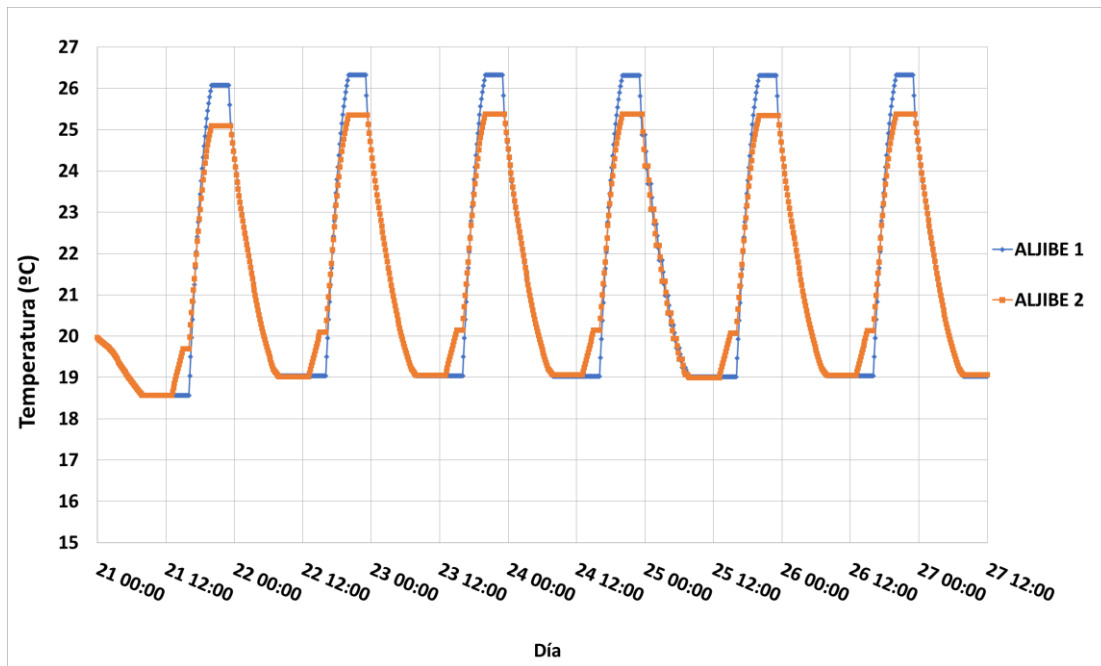


Figura 46. Evolución de la temperatura del agua de los aljibes para un volumen de 20 m³.

En el último día de simulación, se puede ver cómo tanto el aljibe 1 como 2 superan los 24 °C. Aunque no se satisface este parámetro de diseño, dicha instalación en conjunto funcionaría durante seis días consecutivos bajo las condiciones climáticas y de uso más críticas, respetando siempre que el espacio acondicionado no supere la temperatura de 28°C.

A modo de resumen, en la instalación a estudio se llevará a cabo la instalación de un depósito de 20 m³ ya que todo el estudio realizado es bajo condiciones límites, siempre desde el lado de la seguridad garantizando durante seis días consecutivos el funcionamiento de la instalación en condiciones deseadas. Además, se adoptará el confinamiento más favorable visto anteriormente, donde el 80 % del aire exterior pasa por el enfriamiento evaporativo en el parque, cuya eficiencia será de un 75% y el 70% en la plaza, cuya eficiencia será de un 65%.

4.3. Justificación dimensionado de los paneles Falling Film

Para dimensionar los paneles pertenecientes al Falling Film, se buscará aquella solución que haga mínima la temperatura al final del horario de funcionamiento con el objetivo de garantizar la mayor eficiencia del sistema. A su vez, se elegirá aquellos valores que minimicen la pérdida de agua por evaporación a causa del enfriamiento evaporativo-radiante. La determinación de los datos se da bajo las siguientes condiciones:

- Modo de funcionamiento 2 (Alj1: UTA plaza; Alj2: 2UTA parque + marquesina).
- Temperatura inicial del depósito de 20°C.
- Se simulan 6 días.
- Las condiciones climatológicas de simulación son las mismas todos los días.
- Dimensiones de los paneles (1x2 m) (imagen 47)
- Dimensión de la cubierta del colegio (23,51x22,17 m) (imagen 48)

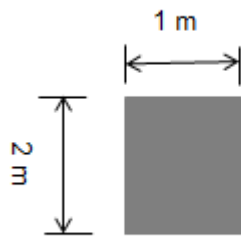


Figura 47. Dimensiones paneles.

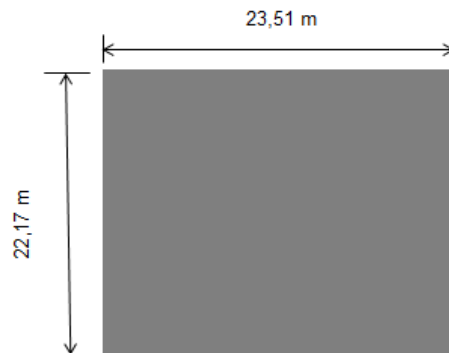


Figura 48. Dimensiones cubierta colegio.

En la tabla 12, se recoge la temperatura de los aljibes a las 7.50 h y la cantidad de agua evaporada durante el funcionamiento del Falling film dependiendo del **número de paneles en serie**. Esto nos permitirá aumentar la longitud de lanzamiento del agua que es impulsada por cada boquilla, aumentando así el área de disipación.

Para poder realizar los cálculos, se han tomado 50 boquillas con el objetivo de no superar el área de disipación disponible impuesta por la restricción de espacio de la cubierta.

Nº de paneles en serie	T_aljibe 1 (°C)	Decremento por cada tramo (%)	T_aljibe 2 (°C)	Decremento por cada tramo (%)	Agua_evap (Kg)	Decremento por cada tramo (%)
1 (100 m ²)	22,99		22,96		333,20	
2 (200 m ²)	20,22	12,05	20,19	12,05	414,40	24,37
3 (300 m ²)	19,25	4,82	19,23	4,75	439,79	6,13
4 (400 m ²)	18,73	2,70	18,7	2,76	450,30	2,39

Tabla 12. Estudio del número de paneles en serie.

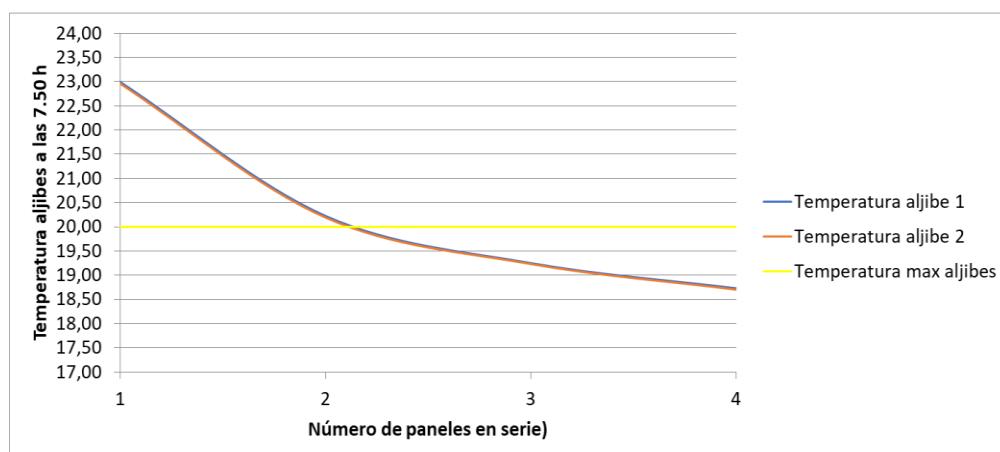


Figura 49. Evolución de la temperatura de los aljibes en función del número de paneles en serie.

Los datos de la temperatura del agua se obtienen bajo una situación muy desfavorable ya que se simulan 6 días de funcionamiento a pleno rendimiento con condiciones climatológicas correspondientes al día más caluroso del verano. Aunque esto sea así, gracias a los valores obtenidos es posible determinar el número de paneles en serie más adecuado para el sistema. De la tabla obtenida, se deduce que al aumentar el número de paneles en serie, el decremento de la temperatura disminuye hasta un punto en el que el descenso es muy pequeño. Es decir, a medida que aumenta la longitud de lanzamiento, disminuye la eficiencia a la hora de enfriar el agua perteneciente a los aljibes. Tal y como se ve en la figura 49, a partir de los 2 paneles en serie, aumentar esta longitud, sólo proporciona decrementos de temperatura inferior al 5%.

Por otro parte, y como es evidente, al aumentar el número de paneles en serie y por tanto el tiempo en el que está en contacto el agua con el cielo, aumenta la cantidad de agua evaporada. Para 2 paneles en serie, sufre un aumento de 24,37% con respecto al caso anterior y a partir de los 3 paneles en serie, se reduce este porcentaje de agua evaporada debido a la disminución de la eficiencia del sistema comentada anteriormente.

Sujeto a las conclusiones anteriores, se procede a estudiar las temperaturas máximas de los recintos para 1,2 y 3 paneles en serie con el objetivo de garantizar confort térmico y no superar la temperatura de consigna establecida.

Nº DE PANEL ES EN SERIE	Parque		Plaza	
	Tmax plaza (°C)	Tiempo en el que T plaza >Tmax (%)	Tmax parque (°C)	Tiempo en el que T parque >Tmax (%)
1	28,55	75	28,09	20,83
2	27,87	0	27,77	0
3	27,67	0	27,69	0

Tabla 13. Estudio del número de paneles en serie.

Tras haber simulado las tres configuraciones, se puede ver como al aumentar el número de paneles en serie y por tanto la longitud de lanzamiento, disminuye la temperatura máxima de los recintos. A partir de los 2 paneles en serie, se puede garantizar una temperatura en los dos recintos inferior a la temperatura de consigna. Por tanto, se elegirá esta opción como la más óptima para nuestro sistema.

Una vez hallada la configuración más óptima, se continúa el estudio con la búsqueda del **número total de boquillas** instaladas fijando el caudal de cada una de ellas en 600 L/hm.

Nº BOQUILLAS	T_aljibe 1 (°C)	Disminución por cada tramo (%)	T_aljibe 2 (°C)	Disminución por cada tramo (%)	Agua_evap (Kg)	Decremento por cada tramo (%)
50 (200 m2) (30000 L/h)	20,22		20,19		414,40	
75 (300 m2) (45000 L/h)	19,02	5,95	18,99	5,95	445,50	7,50
90 (360 m2) (54000 L/h)	18,50	2,71	18,52	2,46	448,07	0,58

Tabla 14. Estudio del número de boquillas

En la tabla 14, se recoge la temperatura de los aljibes a las 7.50 h y la cantidad de agua evaporada durante el funcionamiento del Falling film dependiendo del número total de boquillas. Esto nos permitirá aumentar la cantidad de agua total impulsada y por tanto el área de disipación.

De la tabla obtenida, se deduce que al aumentar el número total de boquillas y por tanto la cantidad de agua total impulsada, se obtienen temperaturas en los aljibes cada vez menores, pudiendo obtener para 90 boquillas temperaturas de hasta 18,5 °C. Sin embargo, debido a las limitaciones de espacio en la cubierta y observando que esta opción tiene una disminución menor con respecto al tramo anterior, tanto para la temperatura como el agua total impulsada, se opta por instalar 75 boquillas para cada uno de los paneles.

Una vez fijada la configuración de paneles y el número total de boquillas, se finalizará el estudio con la búsqueda del **caudal por boquilla** más óptimo.

Caudal (L/hm)	T_aljibe 1 (°C)	Decremento por cada tramo (%)	T_aljibe 2 (°C)	Decremento por cada tramo (%)	Agua_evap (Kg)	Decremento por cada tramo (%)
400 (30000 L/h)	19,25		19,232		439,8	
600 (45000 L/h)	19,02	1,19	18,99	1,26	445,50	1,30
800 (60000 L/h)	18,86	0,82	18,90	0,46	448,60	0,70
1000 (75000)	18,81	0,30	18,79	0,62	451,40	0,62

Tabla 15. Estudio de la cantidad de caudal por boquilla

En la tabla 15, se recoge la temperatura de los aljibes a las 7.50 h y la cantidad de agua evaporada durante el funcionamiento del Falling film dependiendo del caudal de impulsión por boquilla. Esto nos permitirá aumentar la cantidad de agua total impulsada.

De la tabla obtenida, se deduce que al aumentar el caudal de impulsión por boquilla y por tanto la cantidad de agua total impulsada, se obtienen temperaturas en los aljibes cada vez menores, hasta niveles en los que incrementar el caudal no proporciona un descenso de la temperatura mayor al 1%. Al igual que da con el aumento de la cantidad de agua evaporada. Por tanto, teniendo en cuenta estas consideraciones, se tomará los 600 L/hm como caudal óptimo de impulsión por boquilla.

En resumen, se llevará a cabo la instalación de un sistema de enfriamiento nocturno con 2 paneles en serie, 75 boquillas en total y un caudal de 600 L/hm por cada boquilla (imagen 50), impulsando un caudal total de 45000 L/h para un área de disipación de 300 m². El estudio realizado bajo condiciones límites durante seis días consecutivos, satisface las condiciones de funcionamiento básicas y respeta las limitaciones de espacio.

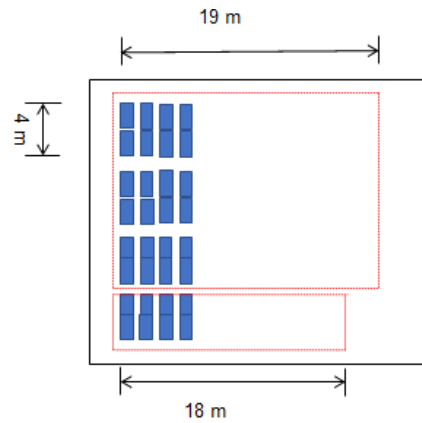


Figura 50. Distribución general para dos paneles en serie

Finalmente, se representa la evolución de la temperatura de ambos aljibes durante todos los días de simulación tras la optimización del proceso.

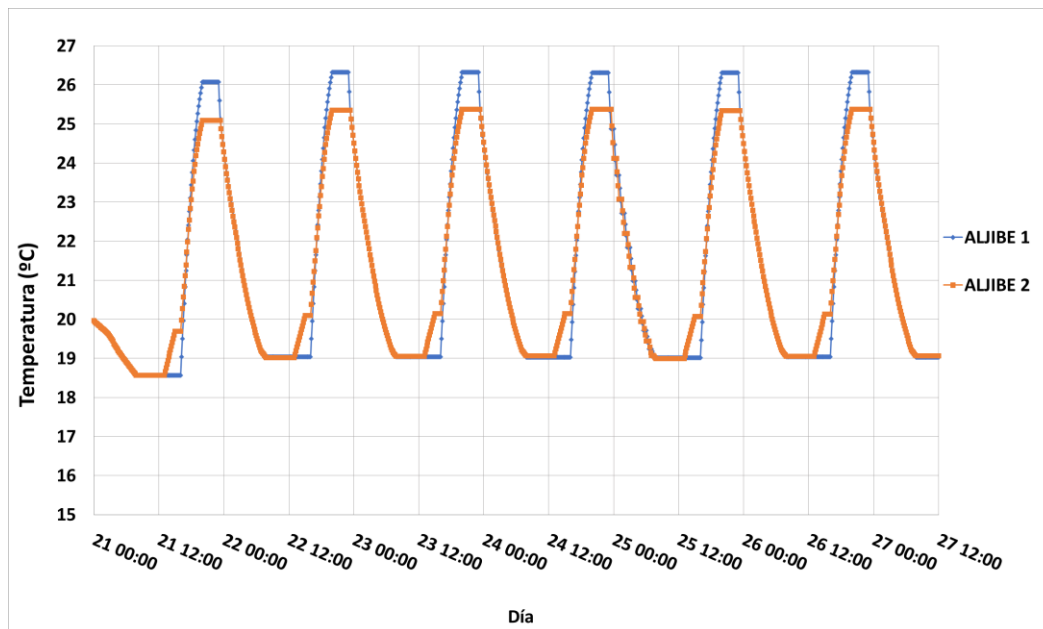


Figura 51. Evolución de la temperatura del agua de los aljibes. Resultado final.

El último día de simulación se puede ver como la temperatura oscila entre 19 °C y 26,3 °C, superando 1 °C la condición de diseño establecida previamente. Sin embargo, al garantizar la condición de diseño asociada a la temperatura en los recintos, esta pasa a un segundo plano y se pueden dar por válidos todos los parámetros obtenidos de la optimización.

6 CONCLUSIÓN

A lo largo de este proyecto, hemos identificado la necesidad de analizar y conocer las diferentes técnicas de acondicionamiento pasivo, así como la implantación de una arquitectura bioclimática que aproveche los recursos disponibles para disminuir los impactos ambientales y reducir los consumos de energía. Gracias a esto, se evita el uso de sistemas convencionales de acondicionamiento, los cuales requieren de energías no renovables, consumiendo más y expulsando al ambiente mayor cantidad de CO₂.

Una vez modelado las diferentes zonas que conforman el proyecto Life Watercool y las diferentes tecnologías que irán conectadas a la red de agua, se han hecho diferentes simulaciones durante seis días pertenecientes a la época estival en Sevilla bajo las mismas condiciones climatológicas todos los días. Esto nos ha permitido llegar a la solución más óptima limitado por las condiciones de diseño y espacio, cuyo principal objetivo es conseguir una temperatura en los recintos de 28 °C y una temperatura del agua de los aljibes que oscile entre 20°C y 25°C.

Tras obtener los resultados de dichas simulaciones, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- El enfriamiento del agua proveniente de los aljibes a través del Falling Film es más efectivo si inicialmente se enfría aquel volumen de acumulación que esté más caliente hasta una diferencia de temperatura mínima, ya que como se ha visto, para casos extremos en los que difiere considerablemente la temperatura de ambos depósitos, la temperatura media resultante necesita más tiempo para alcanzar al final del horario de funcionamiento la temperatura óptima.
- A la hora de hallar la conexión más equilibrada para el sistema, es decir, requiera de una potencia total de absorción semejante para ambos aljibes, se han simulados 3 casos. Tras haberlos comparado mediante la evolución de la temperatura en los aljibes, se ha elegido aquel caso en el que la UTA de la plaza irá conectada al aljibe 1 y las UTAs del parque y marquesina en el aljibe 2, consiguiendo así una diferencia de temperatura mínima al final del horario de funcionamiento de todas las tecnologías.
- Por otro lado, a través de la justificación del volumen de acumulación, se ha observado que a partir de los 40 m³, aumentar el volumen del aljibe sólo ocasiona decrementos de temperatura inferior al 1%, por lo que se decide seleccionar el rango comprendido entre los 15 m³ y los 40 m³ para ser evaluados como posibles soluciones.
- Con el fin de alcanzar temperaturas en los recintos inferiores o iguales a la temperatura máxima establecida, se decide incorporar sistemas evaporativos tanto en el parque como en la plaza de eficiencia 0,9. Tras ver diferentes confinamientos, se puede ver como al pasar el 80% y 70 % del aire exterior a través del sistema evaporativo en el parque y plaza respectivamente, se consiguen para 20 m³ temperaturas inferiores a la de consigna.
- Una vez elegido el volumen óptimo, con el objetivo de reducir la eficiencia de los sistemas evaporativos al máximo y evitar perder agua por evaporación, se ha llegado a la conclusión que para una eficiencia del 75% en la plaza y 65% en el parque, se siguen respetando las condiciones de diseño impuestas.
- Por otro lado, a la hora de analizar el dimensionado de los paneles del Falling Film, se puede ver como al aumentar el número de paneles en serie, el decremento de la temperatura disminuye hasta 2

paneles en serie, a partir del cual el descenso es muy pequeño. Es decir, a medida que aumenta la longitud de lanzamiento, disminuye la eficiencia a la hora de enfriar el agua perteneciente a los aljibes. A su vez, al aumentar tanto el tiempo en el que está en contacto el agua con el cielo, aumenta la cantidad de agua evaporada.

- Se deduce que al aumentar el número total de boquillas y por tanto la cantidad de agua total impulsada, se obtienen temperaturas en los aljibes cada vez menores. Sin embargo debido a limitaciones de espacio en la cubierta se opta por instalar 75 boquillas.
- A su vez, al aumentar el caudal de impulsión por boquilla y por tanto la cantidad de agua total impulsada, se obtienen temperaturas en los aljibes cada vez menores, hasta 600 L/hm, a partir del cual el incremento del caudal no proporciona un descenso de la temperatura mayor al 1%.
- Finalmente, tras hallar todos aquellos parámetros que optimizan el proceso, reduciendo gastos de energía y pérdida de agua evaporada, se pueden alcanzar los objetivos impuestos por las condiciones de diseño a pesar de que la temperatura en los aljibe es levemente más elevada a la esperada.

REFERENCIAS

- Abdeen, A., Serageldin, A. A., Ibrahim, M. G. E., El-Zafarany, A., Ookawara, S., & Murata, R. (2019). Solar chimney optimization for enhancing thermal comfort in Egypt: An experimental and numerical study. *Solar Energy*, *180*, 524–536. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2019.01.063>
- Aislamiento y Sostenibilidad*. (n.d.).
- Al-Badri, A. R., & Al-Waaly, A. A. Y. (2017). The influence of chilled water on the performance of direct evaporative cooling. *Energy and Buildings*, *155*, 143–150. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.09.021>
- Andrés-Chicote, M., Tejero-González, A., Velasco-Gómez, E., & Rey-Martínez, F. J. (2012). Experimental study on the cooling capacity of a radiant cooled ceiling system. *Energy and Buildings*, *54*, 207–214. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.07.043>
- Blondeau, P., Spérandio, M., & Allard, F. (1997). Night ventilation for building cooling in summer. *Solar Energy*, *61*(5), 327–335. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00076-5)
- Borbora, J., & Das, A. K. (2014). Summertime Urban Heat Island study for Guwahati City, India. *Sustainable Cities and Society*, *11*, 61–66. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2013.12.001>
- Busato, F., Lazzarin, R. M., & Noro, M. (2014). Three years of study of the Urban Heat Island in Padua: Experimental results. *Sustainable Cities and Society*, *10*, 251–258. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2013.05.001>
- Chimeneasonline*. (n.d.). Retrieved August 29, 2021, from <https://chimeneasonline.org/chimenea-solar/>
- Chu, J., & Huang, X. (2021). Research status and development trends of evaporative cooling air-conditioning technology in data centers. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2021.08.004>
- Despini, F., Ferrari, C., Santunione, G., Tommasone, S., Muscio, A., & Teggi, S. (2021). Urban surfaces analysis with remote sensing data for the evaluation of UHI mitigation scenarios. *Urban Climate*, *35*, 100761. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2020.100761>
- Dimoudi, A., Zoras, S., Kantzioura, A., Stogiannou, X., Kosmopoulos, P., & Pallas, C. (2014). Use of cool materials and other bioclimatic interventions in outdoor places in order to mitigate the urban heat island in a medium size city in Greece. *Sustainable Cities and Society*, *13*, 89–96. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2014.04.003>
- El-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M., & Bouhamra, W. (2000). A Novel Air Conditioning System: Membrane Air Drying and Evaporative Cooling. *Chemical Engineering Research and Design*, *78*(7), 999–1009. <https://doi.org/10.1205/026387600528111>
- F. Kong, H. Yin, P. James, L.R. Hutyra, H. S. H. (n.d.). *Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China*. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S016920461400108X?token=C40C4CAE183E899BD0107AEF88C98C04396EB8A29E0B6C23F836CC382CE76FD7434FE97EDB15AF60E541F93EE8A137CD&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210910030237>
- Farmahini-Farahani, M., & Heidarinejad, G. (2012). Increasing effectiveness of evaporative cooling by pre-cooling using nocturnally stored water. *Applied Thermal Engineering*, *38*, 117–123. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.01.023>
- Georgakis, C., Zoras, S., & Santamouris, M. (2014). Studying the effect of “cool” coatings in street urban canyons and its potential as a heat island mitigation technique. *Sustainable Cities and Society*, *13*, 20–31.

<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2014.04.002>

- Guerrero Delgado, Mc. C., Sánchez Ramos, J., Pavón Moreno, Mc. C., Tenorio Ríos, J. A., & Álvarez Domínguez, S. (2020). Experimental analysis of atmospheric heat sinks as heat dissipators. *Energy Conversion and Management*, 207, 112550. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112550>
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584–585, 1040–1055. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.01.158>
- Idae. (n.d.). *Ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización*. Retrieved September 6, 2021, from https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_09_Guia_tecnica_ahorro_y_recuperacion_de_energia_en_instalaciones_de_climatizacion_dd65072a.pdf
- Kleerekoper, L., Van Esch, M., & Salcedo, T. B. (2012). How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30–38. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.06.004>
- Life Watercool. (n.d.). *No Title*. Retrieved September 7, 2021, from <http://www.lifewatercool.com/>
- MCarmen Guerrero Delgado, José Sánchez Ramos, José Antonio Tenorio Ríos, S. D. (n.d.). *Falling-film as natural cooling technique: Modelling and energy impact assessment*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420307123>
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994). Use of the ground for heat dissipation. *Energy*, 19(1), 17–25. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90101-5](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90101-5)
- Miriél, J., Serres, L., & Trombe, A. (2002). Radiant ceiling panel heating–cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions. *Applied Thermal Engineering*, 22(16), 1861–1873. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00087-X)
- Mostafa Rahimi, A. S. (n.d.). *Experimental study of radiation and free convection in an enclosure with a radiant ceiling heating system*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778810002100>
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Mavrakakis, A., & Santamouris, M. (2011). Evaluating thermal comfort conditions and health responses during an extremely hot summer in Athens. *Building and Environment*, 46(2), 339–344. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2010.07.026>
- Plan Nacional integrado de energía y clima (PNIEC) 2021-2030*. (n.d.). Retrieved August 29, 2021, from <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/plan-nacional-integrado-de-energia-y-clima-pniec-2021-2030>
- Qanat, C. (n.d.). *No Title*. Retrieved September 7, 2021, from <https://cartujaqanat.com/>
- Santamouris, Mat. (2016). Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.07.034>
- Santamouris, Mattheos, & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74–94. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.11.002>
- Soltani, A., & Sharifi, E. (2017). Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide. *Frontiers of Architectural Research*, 6(4), 529–538. <https://doi.org/10.1016/J.FOAR.2017.08.001>
- Tewari, P., Mathur, S., & Mathur, J. (n.d.). *Thermal performance prediction of office buildings using direct evaporative cooling systems in the composite climate of India*. <https://pdf.sciencedirectassets.com/271434/1-s2.0-S0360132319X00086/1-s2.0-S0360132319302963/main.pdf?X-Amz-Security->

Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEElacXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIGbpIp%2FBMgFAYRZndBqEVR5e
o4GrnD4spaovm4aDIFAiAJvPiO3EaDG31ISZ1%2FnKPniPwN62XQ0WFe%2BT52w

- TROX. (n.d.). *No Title*. Retrieved September 7, 2021, from <https://www.trox.es/productos/unidades-de-tratamiento-de-aire-7cb22dd67f843434>
- V Geros, M Santamouris, Tsangrasoulis, G. G. (n.d.). *Experimental evaluation of night ventilation phenomena*.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0378778898000565?token=20A41A66DCF07E285C43F0CDECE4E9C92C1AF221034162CC06D5D192DBD49780B3707AEC3D13754ED1BEF76AD9536A5F&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210909175716>
- Wichakan Ketwong, Thoranis Deethayat, T. K. (n.d.). *Performance enhancement of air conditioner in hot climate by condenser cooling with cool air generated by direct evaporative cooling*. <https://www--sciencedirect--com.us.debiblio.com/science/article/pii/S2214157X21002902>
- Y.M.Xuan, F. X., & X.F.Niu, X.Huang, S. W. W. (n.d.). “*Research and application of evaporative cooling in China: A review (I) – Research*.” <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.052>
- Abdeen, A., Serageldin, A. A., Ibrahim, M. G. E., El-Zafarany, A., Ookawara, S., & Murata, R. (2019). Solar chimney optimization for enhancing thermal comfort in Egypt: An experimental and numerical study. *Solar Energy*, *180*, 524–536. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2019.01.063>
- Aislamiento y Sostenibilidad*. (n.d.).
- Al-Badri, A. R., & Al-Waaly, A. A. Y. (2017). The influence of chilled water on the performance of direct evaporative cooling. *Energy and Buildings*, *155*, 143–150. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.09.021>
- Andrés-Chicote, M., Tejero-González, A., Velasco-Gómez, E., & Rey-Martínez, F. J. (2012). Experimental study on the cooling capacity of a radiant cooled ceiling system. *Energy and Buildings*, *54*, 207–214. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.07.043>
- Blondeau, P., Spérandio, M., & Allard, F. (1997). Night ventilation for building cooling in summer. *Solar Energy*, *61*(5), 327–335. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00076-5)
- Borbora, J., & Das, A. K. (2014). Summertime Urban Heat Island study for Guwahati City, India. *Sustainable Cities and Society*, *11*, 61–66. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2013.12.001>
- Busato, F., Lazzarin, R. M., & Noro, M. (2014). Three years of study of the Urban Heat Island in Padua: Experimental results. *Sustainable Cities and Society*, *10*, 251–258. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2013.05.001>
- Chimeneasonline*. (n.d.). Retrieved August 29, 2021, from <https://chimeneasonline.org/chimenea-solar/>
- Chu, J., & Huang, X. (2021). Research status and development trends of evaporative cooling air-conditioning technology in data centers. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2021.08.004>
- Despini, F., Ferrari, C., Santunione, G., Tommasone, S., Muscio, A., & Teggi, S. (2021). Urban surfaces analysis with remote sensing data for the evaluation of UHI mitigation scenarios. *Urban Climate*, *35*, 100761. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2020.100761>
- Dimoudi, A., Zoras, S., Kantzioura, A., Stogiannou, X., Kosmopoulos, P., & Pallas, C. (2014). Use of cool materials and other bioclimatic interventions in outdoor places in order to mitigate the urban heat island in a medium size city in Greece. *Sustainable Cities and Society*, *13*, 89–96. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2014.04.003>
- El-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M., & Bouhamra, W. (2000). A Novel Air Conditioning System: Membrane Air Drying and Evaporative Cooling. *Chemical Engineering Research and Design*, *78*(7), 999–1009. <https://doi.org/10.1205/026387600528111>
- F. Kong, H. Yin, P. James, L.R. Hutyra, H. S. H. (n.d.). *Effects of spatial pattern of greenspace on urban*

- cooling in a large metropolitan area of eastern China*. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S016920461400108X?token=C40C4CAE183E899BD0107AEF88C98C04396EB8A29E0B6C23F836CC382CE76FD7434FE97EDB15AF60E541F93EE8A137CD&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210910030237>
- Farmahini-Farahani, M., & Heidarinejad, G. (2012). Increasing effectiveness of evaporative cooling by pre-cooling using nocturnally stored water. *Applied Thermal Engineering*, 38, 117–123. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.01.023>
- Georgakis, C., Zoras, S., & Santamouris, M. (2014). Studying the effect of “cool” coatings in street urban canyons and its potential as a heat island mitigation technique. *Sustainable Cities and Society*, 13, 20–31. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2014.04.002>
- Guerrero Delgado, Mc. C., Sánchez Ramos, J., Pavón Moreno, Mc. C., Tenorio Ríos, J. A., & Álvarez Domínguez, S. (2020). Experimental analysis of atmospheric heat sinks as heat dissipators. *Energy Conversion and Management*, 207, 112550. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112550>
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584–585, 1040–1055. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.01.158>
- Idae. (n.d.). *Ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización*. Retrieved September 6, 2021, from https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_09_Guia_tecnica_ahorro_y_recuperacion_de_energia_en_instalaciones_de_climatizacion_dd65072a.pdf
- Kleerekoper, L., Van Esch, M., & Salcedo, T. B. (2012). How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30–38. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2011.06.004>
- Life Watercool. (n.d.). *No Title*. Retrieved September 7, 2021, from <http://www.lifewatercool.com/>
- MCarmen Guerrero Delgado, José Sánchez Ramos, José Antonio Tenorio Ríos, S. D. (n.d.). *Falling-film as natural cooling technique: Modelling and energy impact assessment*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420307123>
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994). Use of the ground for heat dissipation. *Energy*, 19(1), 17–25. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90101-5](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90101-5)
- Miriél, J., Serres, L., & Trombe, A. (2002). Radiant ceiling panel heating–cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions. *Applied Thermal Engineering*, 22(16), 1861–1873. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00087-X)
- Mostafa Rahimi, A. S. (n.d.). *Experimental study of radiation and free convection in an enclosure with a radiant ceiling heating system*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778810002100>
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Mavrakis, A., & Santamouris, M. (2011). Evaluating thermal comfort conditions and health responses during an extremely hot summer in Athens. *Building and Environment*, 46(2), 339–344. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2010.07.026>
- Plan Nacional integrado de energía y clima (PNIEC) 2021-2030*. (n.d.). Retrieved August 29, 2021, from <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/plan-nacional-integrado-de-energia-y-clima-pniec-2021-2030>
- Qanat, C. (n.d.). *No Title*. Retrieved September 7, 2021, from <https://cartujaqanat.com/>
- Santamouris, Mat. (2016). Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings*, 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.07.034>
- Santamouris, Mattheos, & Kolokotsa, D. (2013). Passive cooling dissipation techniques for buildings and

- other structures: The state of the art. *Energy and Buildings*, 57, 74–94. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.11.002>
- Soltani, A., & Sharifi, E. (2017). Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide. *Frontiers of Architectural Research*, 6(4), 529–538. <https://doi.org/10.1016/J.FOAR.2017.08.001>
- Tewari, P., Mathur, S., & Mathur, J. (n.d.). *Thermal performance prediction of office buildings using direct evaporative cooling systems in the composite climate of India*. <https://pdf.sciencedirectassets.com/271434/1-s2.0-S0360132319X00086/1-s2.0-S0360132319302963/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEEIaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIGgbpIp%2FbMgFAYRZndBqEVR5e04GrnD4spaovm4aDIFAiAJvPiO3EaDG311ISZ1%2FnKPniPwN62XQ0WFe%2BT52w>
- TROX. (n.d.). *No Title*. Retrieved September 7, 2021, from <https://www.trox.es/productos/unidades-de-tratamiento-de-aire-7cb22dd67f843434>
- V Geros, M Santamouris, Tsangrasoulis, G. G. (n.d.). *Experimental evaluation of night ventilation phenomena*. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0378778898000565?token=20A41A66DCF07E285C43F0CDECE4E9C92C1AF221034162CC06D5D192DBD49780B3707AEC3D13754ED1BEF76AD9536A5F&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210909175716>
- Wichakan Ketwong, Thoranis Deethayat, T. K. (n.d.). *Performance enhancement of air conditioner in hot climate by condenser cooling with cool air generated by direct evaporative cooling*. <https://www--sciencedirect--com.us.debiblio.com/science/article/pii/S2214157X21002902>
- Y.M.Xuan, F. X., & X.F.Niu, X.Huang, S. W. W. (n.d.). “*Research and application of evaporative cooling in China: A review (I) – Research*.” <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.052>
- F.P. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*, n.d. doi:10.1109/TKDE.2004.30.
- T.L. Bergman, F.P. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 8th ed., Wiley, 2011 (<https://wiley.com/en-us/>).

