

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de la Energía

Sistema de apoyo basado en técnicas naturales de enfriamiento para pre-acondicionamiento del aire de ventilación de un edificio terciario

Autor: Rafael Sánchez Mejías

Tutora: María del Carmen Guerrero Delgado

Cotutora: Teresa Rocío Palomo Amores

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

Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de la Energía

Sistema de apoyo basado en técnicas naturales de enfriamiento para pre-acondicionamiento del aire de ventilación de un edificio terciario

Autor:

Rafael Sánchez Mejías

Tutora:

María del Carmen Guerrero Delgado

Profesor titular

Cotutora:

Teresa Rocío Palomo Amores

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2024

A mi familia
A mis maestros

Resumen

El cambio climático y el aumento de la demanda de climatización han impulsado la necesidad de desarrollar y aplicar técnicas innovadoras y eficientes en la gestión energética de edificios [1]. Este proyecto se centra en una de estas soluciones: el uso del agua como apoyo para la ventilación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería. El objetivo es recuperar alguna de las fuentes del edificio y aprovechar el agua disponible para enfriar el aire de las unidades de tratamiento de aire proporcionando un método de refrigeración sostenible que reduzca la dependencia de los sistemas de aire acondicionado convencionales.

El enfriamiento de aire para ventilación mediante intercambiadores de calor agua-aire implica el uso de agua a una temperatura inferior a la del aire ambiente para absorber el calor del aire que se quiere enfriar. Este método no depende de la humedad relativa del aire y puede ser utilizado en una variedad de condiciones climáticas. Los intercambiadores de calor agua-aire pueden ser diseñados para maximizar la transferencia de calor, como se verá en los próximos capítulos.

Esta iniciativa se alinea con la creciente demanda de prácticas sostenibles, y puede servir como un modelo para otras instituciones académicas. La implementación de este sistema no solo proporcionará beneficios inmediatos en términos de confort térmico y ahorro energético, sino que también contribuirá a la formación de ingenieros comprometidos con el desarrollo sostenible.

Este proyecto comienza con una introducción al edificio objeto de estudio, la Escuela de Ingeniería, y su transformación con el paso de los años desde su inauguración para la Expo de 1992. Además, se introducen los recursos energéticos naturales como el agua, de la que se justifica su uso para climatización desde hace cientos de años. Después, en el capítulo dos, se realizará un análisis climático en la zona de Sevilla para entender las particularidades del entorno y las ventajas e inconvenientes que se presentan en un ambiente cálido y seco como es el del sur de España. Se presentarán las demandas de consumo energético actuales de la escuela para comprender la necesidad de un aporte alternativo con fuentes de recurso renovable. En el capítulo tres, y ya dispuesto el objetivo de reducir el consumo energético, se diseñará el sistema de recuperación en los vasos de las piscinas, así como el resto de la instalación propuesta. Se estudiarán las distintas alternativas y los retos que deberán superarse para conseguir un sistema eficiente y útil. También se realizarán simulaciones para entender el comportamiento del agua con las interacciones de calor que recibirá. Más adelante, en el capítulo cuatro, se estudiará la viabilidad técnica y económica del sistema, entendiendo si es rentable o no hacer un proyecto con estas características. Finalmente, mediante algunas alternativas y opciones adicionales, se llegará a una conclusión y cierre del trabajo.

Índice

Resumen	vii
Índice.....	ix
Índice de Tablas	x
Índice de Figuras	xii
Notación.....	xiv
1 Introducción	2
1.1 1992	3
1.2 Actualidad	4
1.3 Inspiraciones	7
2 Análisis climático y demandas.....	9
2.1 Temperatura exterior (sombra).....	9
2.2 Humedad relativa exterior.....	10
2.3 Radiación solar directa y difusa.....	11
2.4 Temperatura del cielo.....	11
2.5 Velocidad del viento.....	12
3 Diseño del sistema de recuperación	11
3.1 Particularidades	13
3.2 Vaso de la piscina.....	17
3.3 Bombeo y UTA	19
3.4 Punto de conexión.....	21
3.5 Intercambio Térmico	23
3.6 Modelado y Simulación.....	26
3.7 Variantes/alternativas al proyecto inicial	31
4 Estudio económico y viabilidad	34
5 Conclusión	36
Referencias	37

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Evolución de la temperatura exterior en Sevilla</i>	9
<i>Tabla 2. Picos de temperatura en una semana de julio en Sevilla</i>	10
<i>Tabla 3. Evolución de la humedad relativa en Sevilla</i>	10
<i>Tabla 4. Evolución de la radiación directa en Sevilla (W/m²)</i>	11
<i>Tabla 5. Evolución de la radiación difusa en Sevilla (W/m²)</i>	11
<i>Tabla 6. Evolución de la temperatura del cielo en Sevilla</i>	12
<i>Tabla 7. Evolución de la velocidad media del viento en Sevilla</i>	12
<i>Tabla 8. Modelos de bombas según caudal y altura [6]</i>	26
<i>Tabla 9. Simulación de la temperatura del agua</i>	29
<i>Tabla 10. Consumo de ventilación y refrigeración en mayo-octubre</i>	31
<i>Tabla 11. Consumo de ventilación y refrigeración con toldo en mayo-octubre</i>	33
<i>Tabla 12. Presupuesto instalación</i>	34

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura: 1 Pabellón Plaza de América, 1992 [3]</i>	2
<i>Figura: 2 Fuentes funcionando en el pabellón</i>	3
<i>Figura: 3 Maqueta del pabellón</i>	4
<i>Figura: 4 Cubierta de la Escuela Técnica de Ingeniería</i>	5
<i>Figura: 5. Unidades de tratamiento de aire en la cubierta de la ETSI</i>	5
<i>Figura: 6. Dibujo de termas romanas</i>	6
<i>Figura: 7. Termas de Caracalla, Roma [5]</i>	7
<i>Figura: 8. Vista aérea del proyecto Cartuja Qanat [8]</i>	8
<i>Figura: 9. Vista aérea del anfiteatro del Qanat [9]</i>	8
<i>Figura: 10. Estado actual de los vasos de la ETSI</i>	11
<i>Figura: 11. Plano de la planta baja de la ETSI</i>	12
<i>Figura: 12 Piscinas dedicadas a otros usos</i>	12
<i>Figura: 13. Plano de la piscina noreste</i>	13
<i>Figura: 14. Plano de la piscina noroeste</i>	13
<i>Figura: 15. Estado actual de la piscina noroeste</i>	14
<i>Figura: 16. Máquinas de aire en la piscina</i>	14
<i>Figura: 17. Plano de la piscina sureste</i>	15
<i>Figura: 18. Plano de la piscina sur</i>	15
<i>Figura: 19. Mapa de sombras del 3 de octubre</i>	16
<i>Figura: 20. Mapa de sombras del 16 de mayo</i>	16
<i>Figura: 21. Mapa de sombras el 1 de julio</i>	17
<i>Figura: 22. Temperatura del vaso de la piscina</i>	18
<i>Figura: 23. Mapa de calor de la piscina</i>	18
<i>Figura: 24. Toma de agua en una piscina</i>	19
<i>Figura: 25. Esquema de la instalación con acople a la UTA</i>	20
<i>Figura: 26. Arqueta en la esquina de una piscina</i>	20
<i>Figura: 27. Ubicación de los conductos de impulsión y retorno</i>	21
<i>Figura: 28. Conductos de impulsión y retorno</i>	21
<i>Figura: 29 Esquema de conexión con la UTA</i>	22
<i>Figura: 30. Esquema GRAFCET con el sistema de control</i>	23
<i>Figura: 31. Evolución temperatura exterior y temperatura del estanque</i>	30
<i>Figura: 32. Comparación consumo unidad tratamiento aire</i>	30
<i>Figura: 33. Toldos para el estanque</i>	31

<i>Figura: 34. Temperatura exterior y del estanque en la instalación con toldo (mayo-octubre)</i>	32
<i>Figura: 35. Temperatura del estanque con toldo (rojo) y sin toldo (azul) (mayo-octubre)</i>	32
<i>Figura: 36. Amortización de la inversión de la instalación en sus dosvariantes</i>	35

Notación

C_p	Poder calorífico
T	Temperatura
$\dot{m}$	Gasto másico
DTLM	Diferencia temperatura logarítmica media
NTU	Número de unidades de transferencia
ε	Eficiencia
Q	Caudal
U	Coefficiente global de transferencia de calor
A	Área de superficie
V	Volumen
H	Altura
G	Función arco tangente
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
R	Constante de los gases ideales
eff	Eficiencia
UTA	Unidad de tratamiento de aire
$\exp$	Función exponencial
ε	Emisividad
ρ	Densidad
g	Gravedad
HR	Humedad relativa
h_{fase}	Entalpía de cambio de fase
K_m	Coefficiente de transferencia de masa

1 INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética se ha convertido en un tema crucial en la actualidad, especialmente en regiones con climas extremos como el de Sevilla [2]. Ante el aumento de la demanda de energía para sistemas de calefacción y refrigeración en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, surge una necesidad evidente de buscar soluciones innovadoras y sostenibles. En este contexto, este proyecto propone la recuperación de las fuentes externas de la ETSI, usadas en la expo de 1992, como fuente de aporte energético pasivo utilizando el agua como fluido caloportador.

El Edificio América de la Expo '92 fue una de las estructuras más emblemáticas construidas para la Exposición Universal de Sevilla de 1992. La Expo '92 tuvo como tema principal "Los Descubrimientos", conmemorando el quinto centenario del viaje de Cristóbal Colón a América en 1492.



Figura: 1 Pabellón Plaza de América, 1992 [3]

1.1 1992

Este edificio fue diseñado por el arquitecto argentino César Pelli y su firma, Pelli Clarke Pelli Architects. La estructura se ubicó en la Isla de la Cartuja, a orillas del río Guadalquivir. Este pabellón destacaba por su peculiar forma cúbica, con una serie de torres interconectadas que representaban las cimas de las montañas de América. Estaba rodeado por un lago artificial con fuentes que simbolizaba el océano Atlántico, sobre las que realizaremos este estudio.

Al acabar la expo, el Edificio América fue utilizado como sede del pabellón de la Comunidad Autónoma de Andalucía y, en 1994 fue destinado a un proyecto de adaptación para la Escuela Técnica de Ingenieros, que pasaría a impartir clases en el pabellón para el curso 96-97. Las obras de la remodelación tuvieron un presupuesto de casi tres mil millones de pesetas. [4]



Figura: 2 Fuentes funcionando en el pabellón

En los años posteriores se realiza una apertura de espacios para incorporar luz natural a las aulas. Esto se consiguió mediante los patios abiertos de las fachadas Este y Oeste.

La fachada principal del edificio está orientada al sur, formando un atrio de acceso de grandes dimensiones. Desde este vestíbulo, se obtiene una visión completa del funcionamiento del edificio: los dos grandes atrios quedan unidos en la planta baja a través del bajo de la biblioteca, donde se encuentra la zona de secretaría.

La apariencia exterior del edificio está determinada por el color burdeos del panel de aluminio Robertson (acero corten) empleado en la construcción original de la fachada.

El proyecto de la adaptación del Pabellón Plaza de América a Escuela Superior de Ingenieros fue realizado por el arquitecto, escritor, catedrático e investigador en bioclimatismo, Jaime López de Asiain, consiguiendo en 1993 el primer premio en el Concurso Internacional de Adaptación del Edificio Plaza de América de Expo 92. [4]

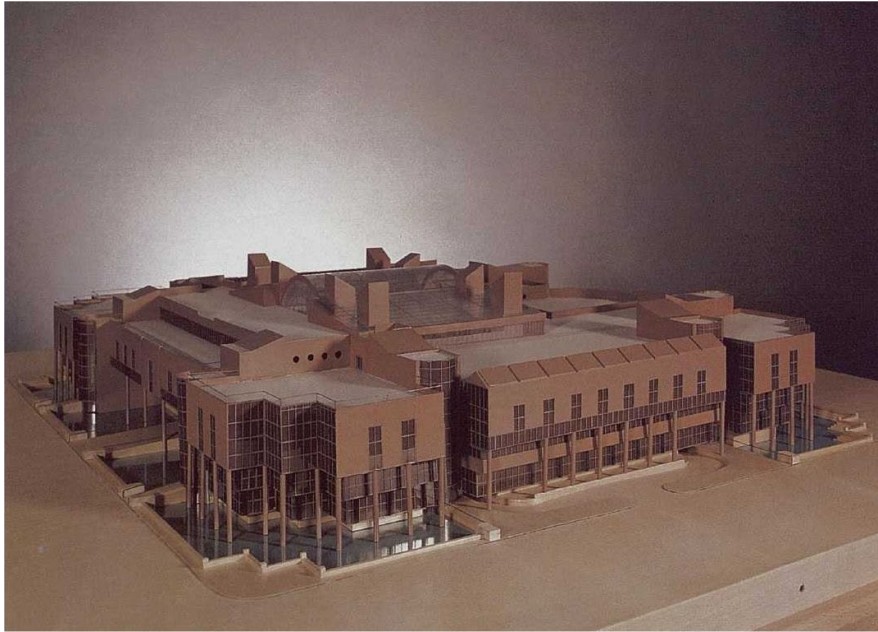


Figura: 3 Maqueta del pabellón

1.2 Actualidad

Hoy, la que fue la Plaza de América acoge a más de 6.000 estudiantes y 480 profesores que acuden a diario a sus aulas para recibir y dar clases. El edificio, con una superficie construida de más de 40.000 metros cuadrados, es una pequeña ciudad en la avenida de las Américas con vida propia.

Sevilla enfrenta desde hace varios años veranos abrasadores batiendo récords de temperaturas que generan una alta demanda de energía para la refrigeración, mientras que los inviernos cada vez son más cortos, requiriendo menos demanda de calefacción. La escuela consume del orden de 50.000 kWh anuales, con un caudal de 90.000 m³/h de aire primario.



Figura: 4 Cubierta de la Escuela Técnica de Ingeniería

Esta demanda de climatización se cubre principalmente con 4 unidades de tratamiento de aire (UTAs en adelante) que se ubican en la cubierta de las cuatro esquinas de la escuela. Cada una de estas unidades mueve un caudal de $22.500 \text{ m}^3/\text{h}$ para ventilación, climatización y refrigeración.

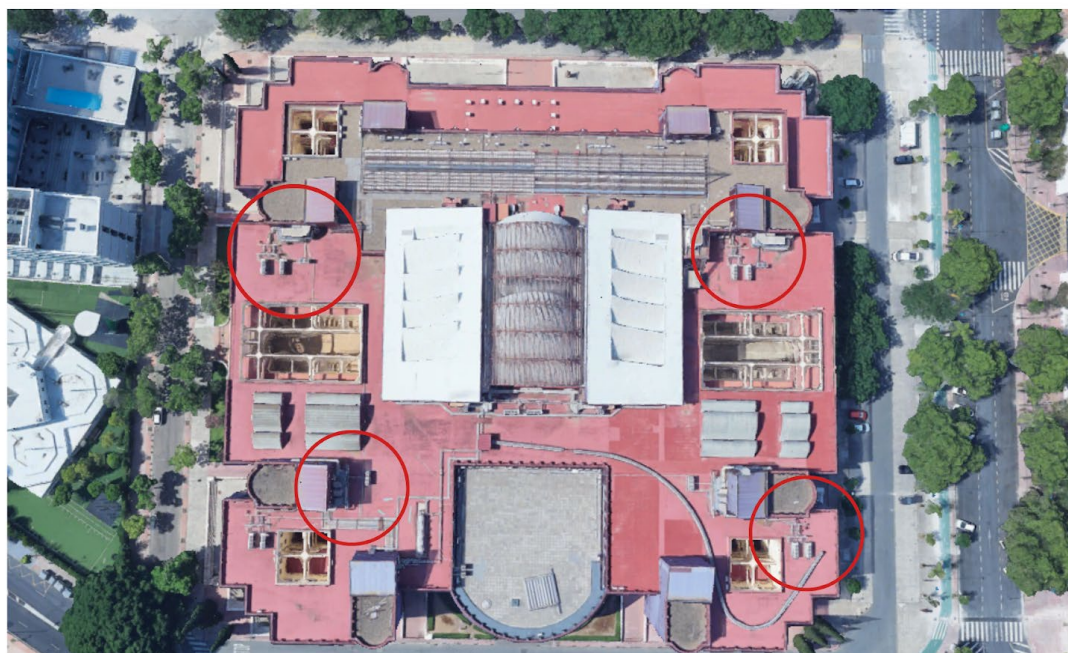


Figura: 5. Unidades de tratamiento de aire en la cubierta de la ETSI

Este proyecto propone abordar estos desafíos aprovechando las condiciones climáticas de la escuela mediante el uso estratégico de las fuentes de agua que originariamente adornaban el perímetro de la ETSI. La integración de estas fuentes busca no solo reducir la demanda energética, sino también contribuir a la sostenibilidad ambiental y económica de la escuela.

El uso del agua como recurso energético en el planeta tiene una historia que se remonta hasta la antigua Roma donde, gracias a los ingenieros y arquitectos de la época, se desarrollaron métodos para usar el agua en sistemas de refrigeración y climatización.

Los romanos construyeron una vasta red de acueductos que transportaban agua desde fuentes naturales hasta las ciudades. Aunque se pueda pensar que la destinación de esta agua era para el suministro de agua potable, esta también permitía la existencia de las famosas termas romanas. Al igual que se usaba agua caliente, los patios y jardines interiores de las villas y las domus contaban con fuentes y estanques que usaban agua fría para crear un efecto de enfriamiento natural.

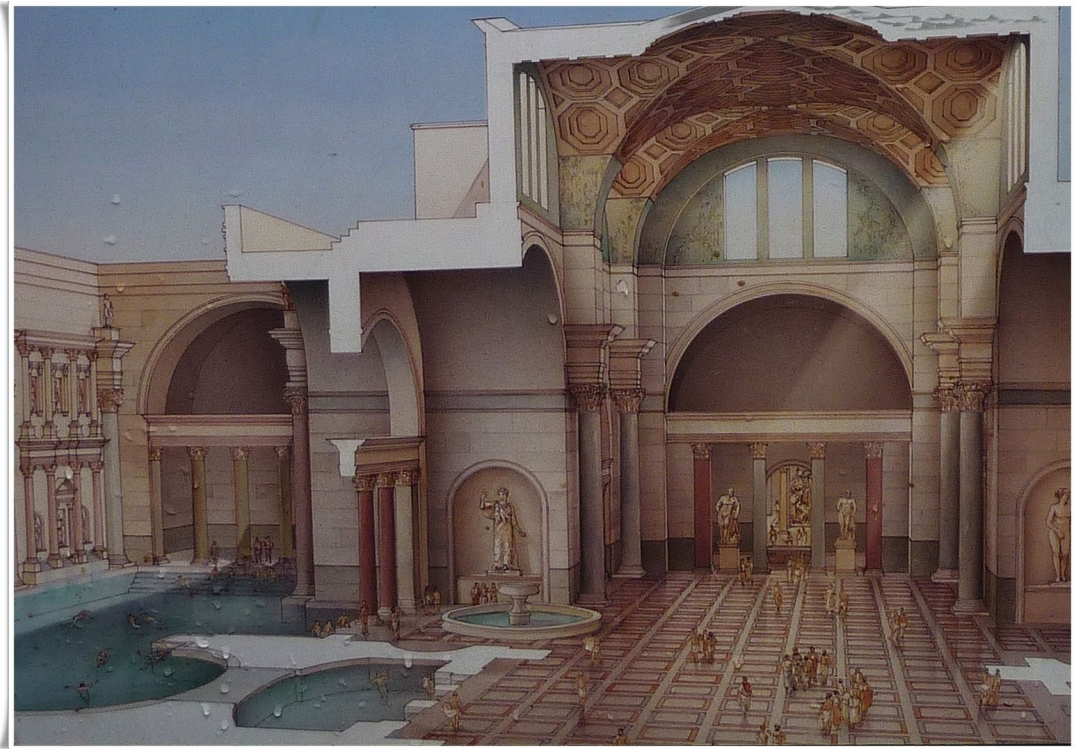


Figura: 6. Dibujo de termas romanas

Un claro ejemplo del uso del agua como sistema de refrigeración lo encontramos en las termas de Caracalla. Este complejo, construido entre los años 212 y 216 d.C, incluía una serie de piscinas, salas de baño, jardines y áreas de refrigeración que usaban el agua a diferentes temperaturas para aclimatar a los romanos.

En la actualidad, el uso del agua para la refrigeración sigue siendo crucial, especialmente en el contexto de la sostenibilidad y la eficiencia energética, que tanto nos ocupa en los tiempos en los que vivimos para alcanzar un futuro descarbonizado [5].



Figura: 7. Termas de Caracalla, Roma [5]

La ventaja del agua reside, entre otras cosas, en su capacidad calorífica: el agua cuenta con un poder calorífico considerablemente alto en comparación con el del aire: 4,18 kJ/kg°C frente a 1,005 kJ/kg°C para el caso del aire. Esta diferencia conlleva que el agua pueda absorber más calor sin aumentar significativamente su temperatura, lo que la hace muy interesante para aplicaciones de refrigeración. [7]

$$c = \Delta Q / \Delta T$$

1.3 Inspiraciones

Este enfoque se inspira en principios de diseño sostenible y eficiencia energética. Tomando ideas de soluciones pasivas tradicionales y adaptándolas a la infraestructura moderna, se busca implementar un sistema que sea eficaz y rentable a largo plazo.

El proyecto Cartuja Qanat, que revitaliza la Isla de la Cartuja mediante la integración de técnicas tradicionales de gestión del agua con conceptos modernos, también ha servido de inspiración para el desarrollo de esta iniciativa. Al igual que el Qanat, este proyecto busca recurrir al uso de sistemas de enfriamiento mediante una fuente natural como es el agua. El objetivo final también es común: reducir la dependencia de sistemas de aire acondicionado convencionales, disminuyendo el consumo energético.



Figura: 8. Vista aérea del proyecto Cartuja Qanat [8]

El anfiteatro del Qanat, utilizado durante la EXPO'92, utiliza el agua del estanque anexo para enfriar el aire, permitiendo una temperatura de 22°C con 8 renovaciones hora.

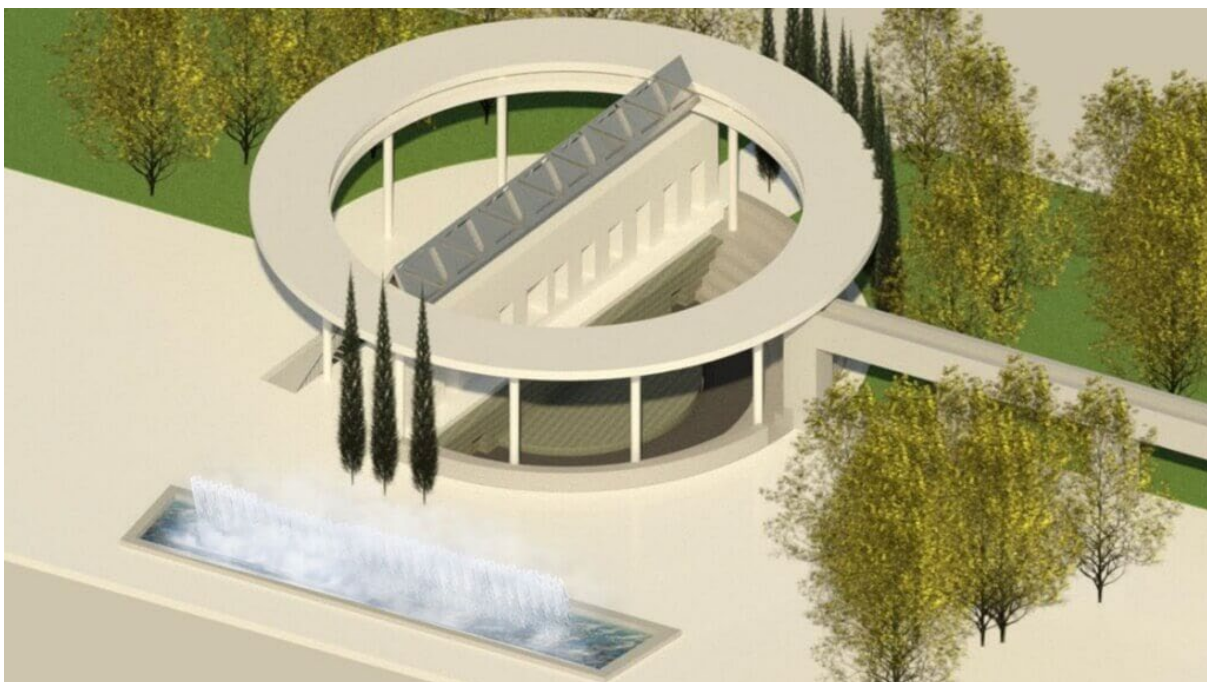


Figura: 9. Vista aérea del anfiteatro del Qanat [9]

Inspirado también en proyectos similares a nivel internacional como el Parque de las Ciencias de Granada, se pretende demostrar que la innovación local puede ser la clave para abordar los desafíos del calentamiento global y el consecuente aumento de la demanda para lograr el confort térmico.

2 ANÁLISIS CLIMÁTICO Y DEMANDAS

En este capítulo se presentará un análisis de los datos climáticos de Sevilla para los meses de mayo a octubre (meses en los que consideraremos que el sistema puede actuar por las condiciones ambientales del entorno). Este periodo abarca meses de primavera, verano completo y parte del otoño, lo que puede otorgarnos una visión muy detallada de las variaciones estacionales para que entendamos los impactos de la temperatura en Sevilla y las necesidades de climatización en la zona de estudio.

El documento *Datos_diseño_sevilla_MET* recoge los siguientes valores clave que se representan gráficamente para entender su evolución con el paso de los meses:

2.1 Temperatura exterior (sombra)

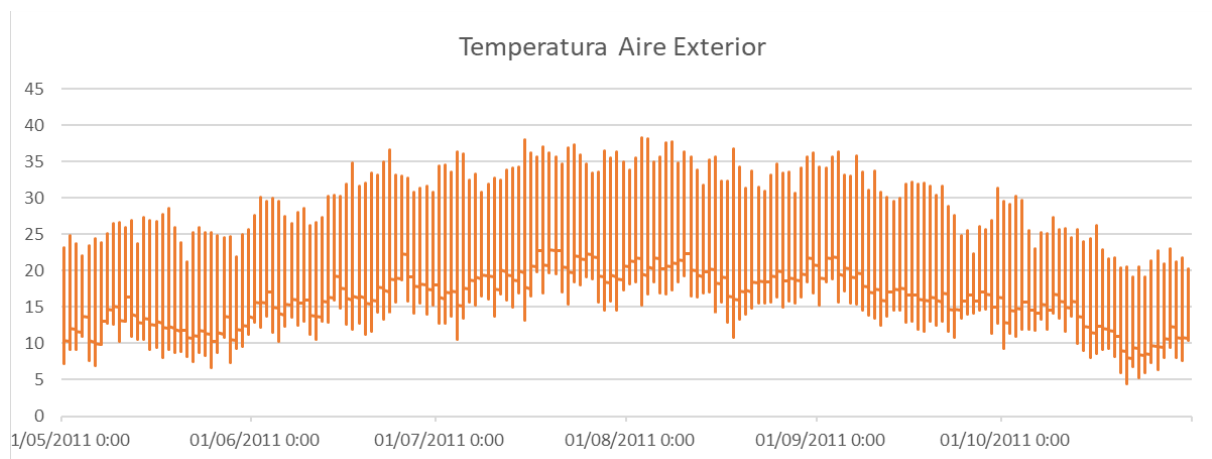


Tabla 1. Evolución de la temperatura exterior en Sevilla

La temperatura ambiente exterior es el indicador más influyente en este estudio, ya que es un factor crítico que influye significativamente en las cargas térmicas del edificio. Estos datos permiten identificar fácilmente los periodos y horas de mayor demanda de refrigeración.

Aquí se detalla una semana de verano, concretamente la del 15 al 22 de julio:

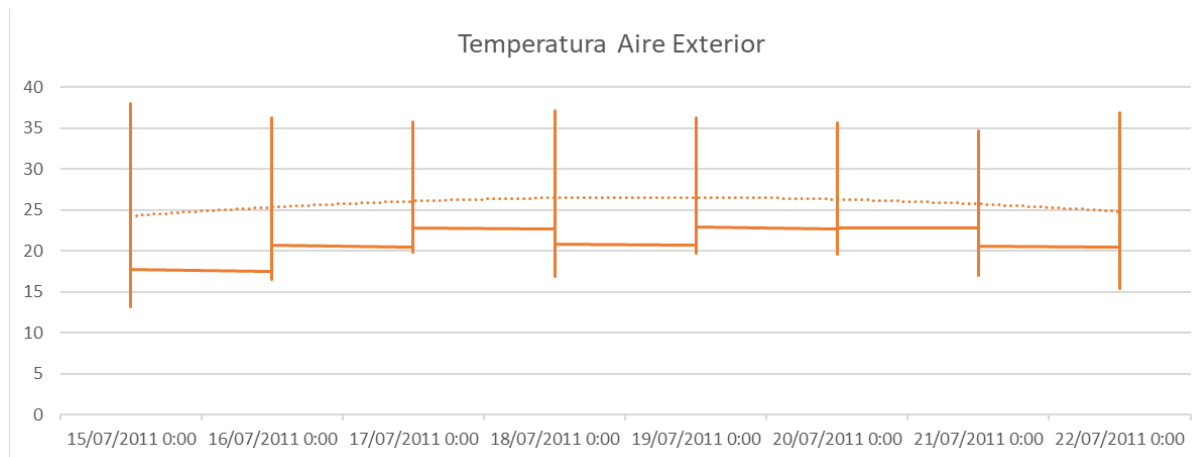


Tabla 2. Picos de temperatura en una semana de julio en Sevilla

Pueden apreciarse las altas temperaturas que alcanza el aire exterior, lo que penaliza el funcionamiento de las unidades de tratamiento de aire, pues el gradiente de temperaturas a vencer es muy alto.

2.2 Humedad relativa exterior

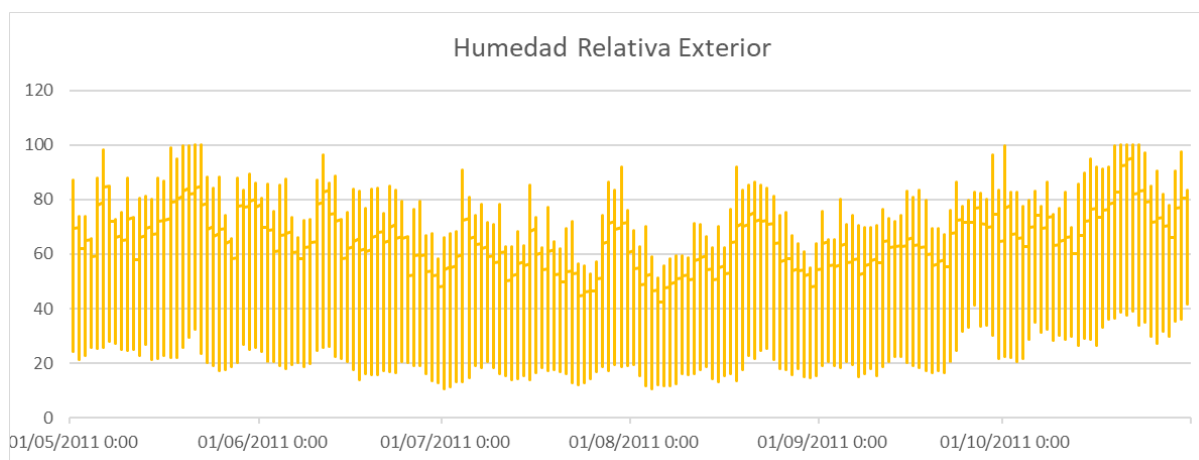


Tabla 3. Evolución de la humedad relativa en Sevilla

Estos valores son importantes para evaluar el confort térmico y la eficiencia de los sistemas de refrigeración, como veremos más adelante. Una humedad relativa alta puede aumentar la sensación térmica y afectar a los sistemas de refrigeración, cosa que afortunadamente no es muy común en la zona de Sevilla y alrededores.

2.3. Radiación solar directa y difusa

La radiación solar directa y difusa son parámetros que impactan directamente en la ganancia térmica del edificio. Estos valores, junto con la temperatura del cielo, nos ayudarán a entender el comportamiento del agua en contacto con este flujo energético de forma que la calentará y enfriará según sus valores.

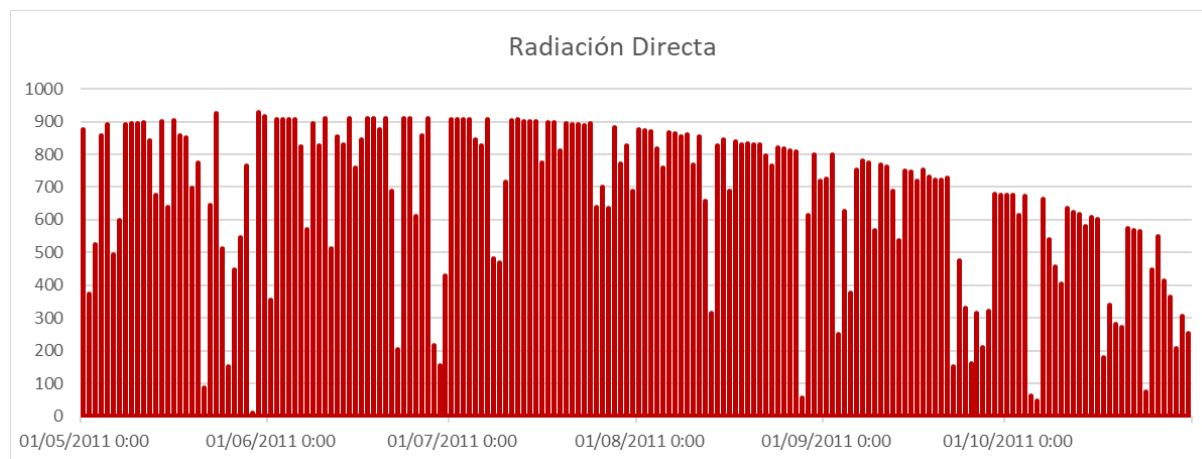


Tabla 4. Evolución de la radiación directa en Sevilla (W/m^2)

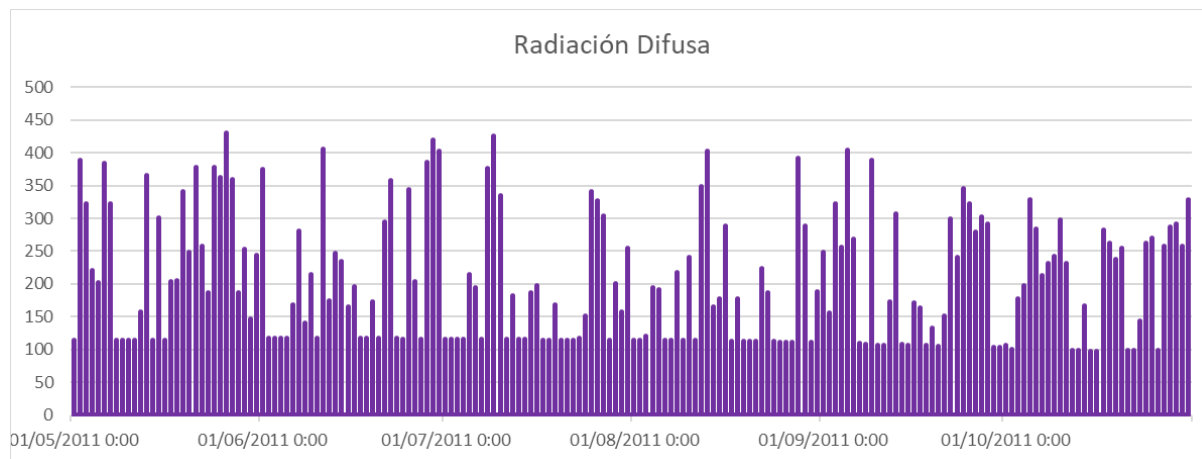


Tabla 5. Evolución de la radiación difusa en Sevilla (W/m^2)

2.4. Temperatura del cielo

Es interesante también entender el comportamiento de la temperatura del cielo, pues el agua intercambiará calor con este de manera constante, siendo clave los intervalos nocturnos cuando se enfriará.

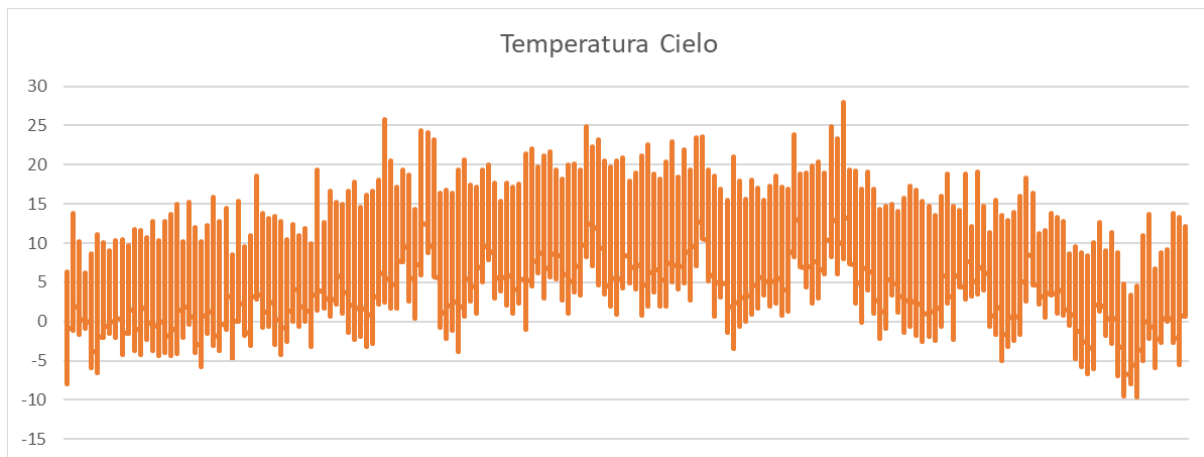


Tabla 6. Evolución de la temperatura del cielo en Sevilla

2.5. Velocidad del viento

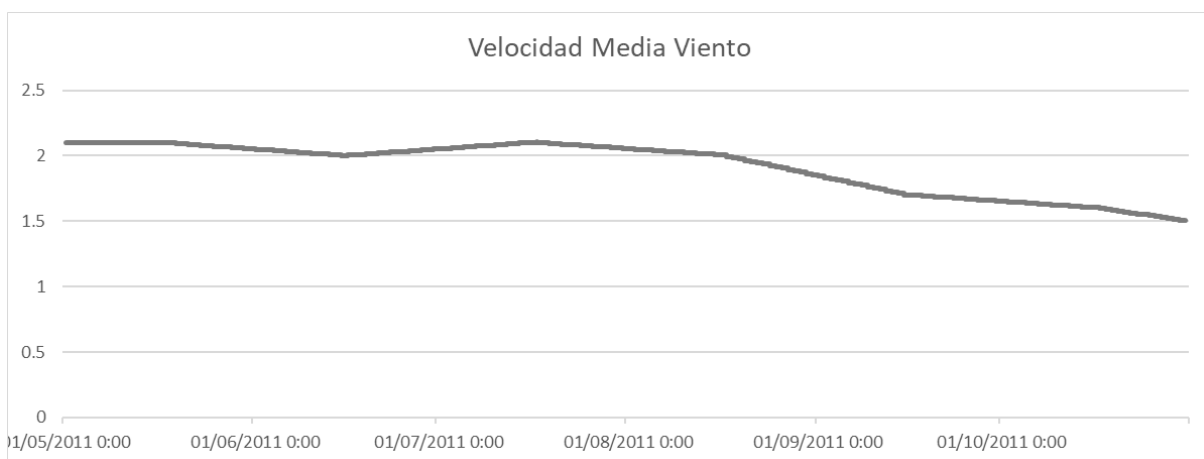


Tabla 7. Evolución de la velocidad media del viento en Sevilla

La velocidad del viento también influye, como veremos más adelante, en la transferencia de calor y en el comportamiento del agua. Los valores obtenidos son relativamente constantes, pero se incluirán en los cálculos que veremos en el capítulo 3.

El conjunto de datos climáticos recolectados será utilizado para evaluar las condiciones ambientales, comprobar la viabilidad técnica del proyecto y el estanque de agua a diseñar. De esta forma, podremos modelar el impacto del agua en el sistema de climatización, objeto de estudio de este proyecto.

Este proyecto gira en torno al agua como medio de enfriamiento, tanto en el intercambiador aire-agua como adicionalmente por enfriamiento evaporativo en el propio estanque. Este último, se basa en el principio de que cuando el agua se evapora, absorbe calor del entorno, reduciendo la temperatura del aire y creando una zona fresca alrededor de la piscina. Para producir este efecto, se incluirán jets en el estanque para ayudar a mantener el agua en movimiento, lo que a su vez garantizará la uniformidad de la temperatura del agua. [8]

3 DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN

El vaso del lago de la escuela se encuentra actualmente dividido en 7 piscinas individuales que se encuentran en las esquinas, en la cara oeste y en la cara sur del edificio. Cada una de estas piscinas es independiente y tiene un tamaño distinto. En este bloque se determinará cuál es el vaso o los vasos que se propondrán para su restauración y puesta en marcha.



Figura: 10. Estado actual de los vasos de la ETSI

En la imagen se aprecia el estado actual de los vasos de las piscinas. Su estructura está intacta y se conserva bien. Estos espacios no tienen ningún uso actualmente más que el de los estudiantes que puedan apoyarse en la zona delimitada por el murete.

Resulta de interés conocer cómo funcionaba el sistema de bombeo originario, ya que se podría considerar como una preinstalación al proyecto propuesto en este documento. Vemos que en las esquinas encontramos arquetas de lo que serían los sistemas de bombeo.

En este caso, al tratarse de un proyecto experimental, realizaremos el diseño para una de las piscinas que aportará el agua a la UTA situada en la cubierta del edificio.

Todos los vasos se encuentran sin agua actualmente, presentando una estructura de paredes de hormigón polimérico con canto rodado en el fondo. La altura disponible de columna de agua es igual para todas las piscinas, estando esta limitada originariamente por 10 columnas que mueren en los estanques de cada esquina, y 1 en cada piscina de la cara Sur. Estas columnas, del mismo material que la fachada (acero corten), tienen un apoyo en el base compuesto también de hormigón que marca la altura máxima de las piscinas (40 CM). Esta medida nos servirá para determinar el volumen de agua disponible en cada caso.

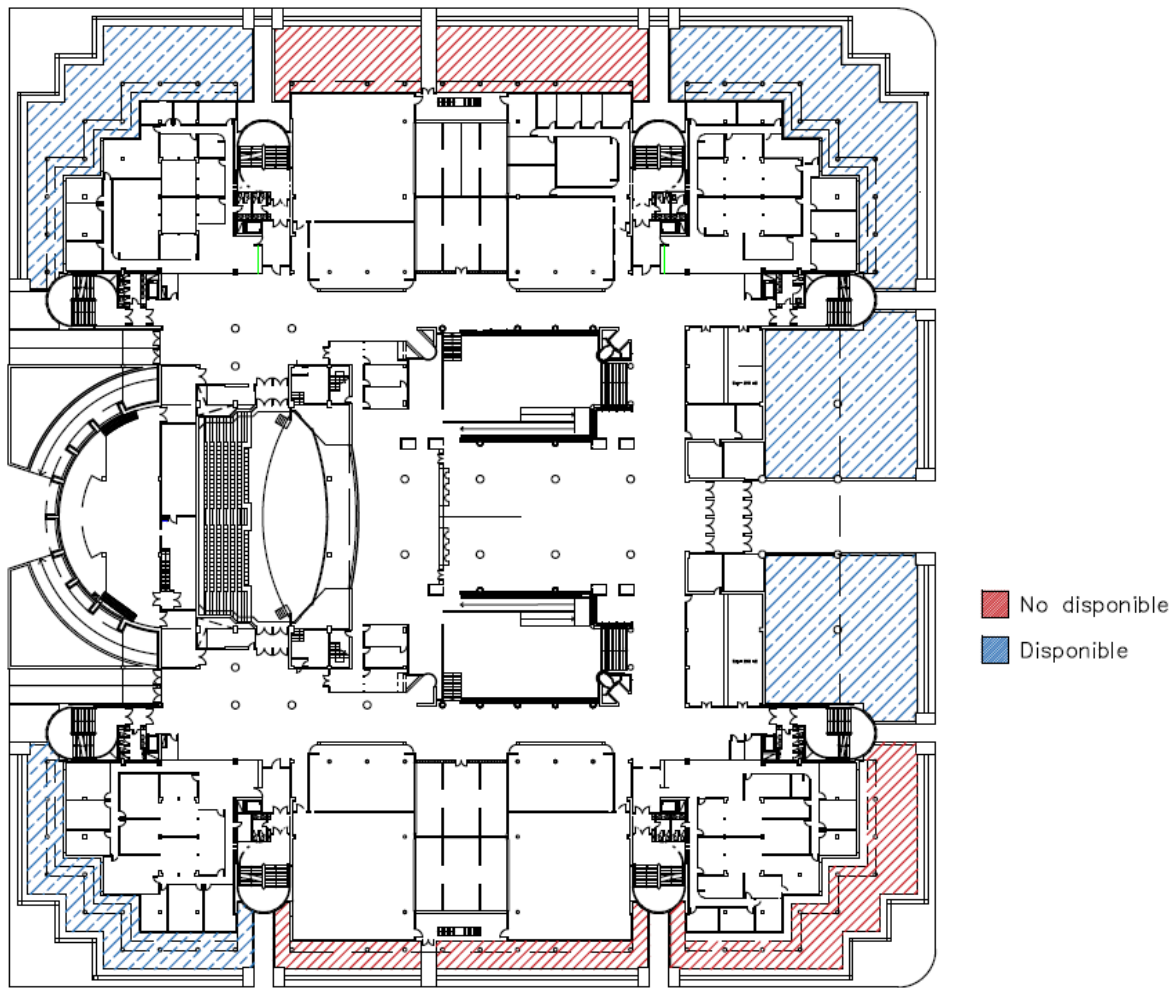


Figura: 11. Plano de la planta baja de la ETSI

Las piscinas de la cara este, de la cara oeste, y de la esquina suroeste no están disponibles al haber sido ocupadas por elementos que son incompatibles con la instalación (césped en la cara este, máquinas de aire acondicionado en la cara oeste y una máquina decorativa en la esquina suroeste).

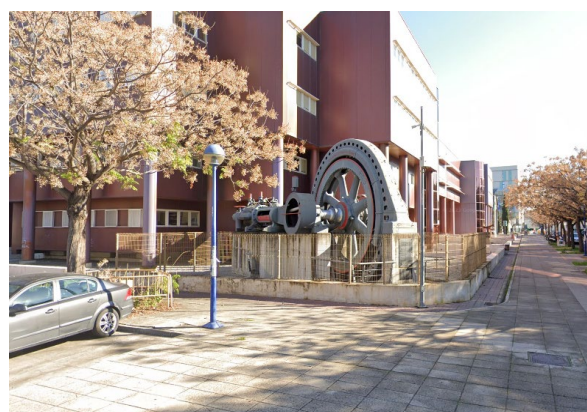


Figura: 12 Piscinas dedicadas a otros usos

3.1 Particularidades

Como se ha comentado previamente, cada uno de los vasos de la escuela tienen una superficie distinta e independiente. Nos encontramos con las siguientes opciones:

- Opción 1 (cara NE)

Área disponible: 350 m² aproximadamente

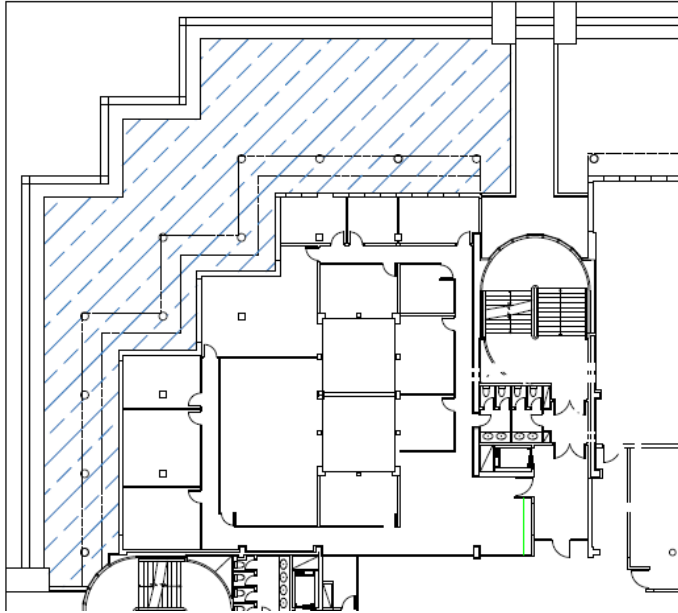


Figura: 13. Plano de la piscina noreste

Nos encontramos en una cara que recibe horas de sol por las mañanas, lo cual puede calentar relativamente el vaso.

- Opción 2 (cara NO)

Área disponible: 215 m² aproximadamente

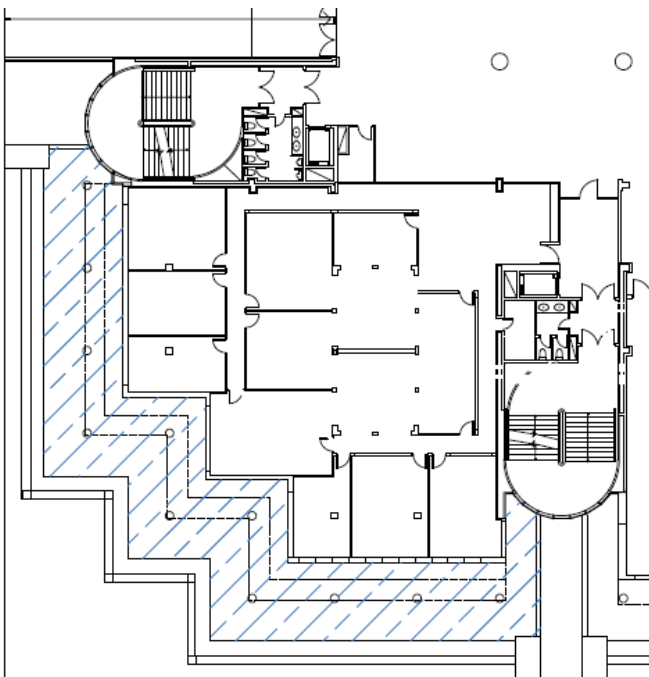


Figura: 14. Plano de la piscina noroeste

Esta segunda opción, situada en la cara noroeste de la escuela, tiene una superficie notablemente inferior a la de la cara noreste. Si bien es cierto que esta cara no recibe sol en las primeras horas del día, sí lo tendrá a partir de mediodía en verano. Encontramos en esta zona varios equipos de Split que dan a la zona en cuestión.



Figura: 15. Estado actual de la piscina noroeste



Figura: 16. Máquinas de aire en la piscina

Esto puede resultar un impedimento por dos razones: que el aire caliente el agua más de lo deseado y que los equipos se vean dañados por el contacto con el agua o el aumento de la humedad relativa.

- Opción 3 (cara SE)

Área disponible: 450 m² aproximadamente

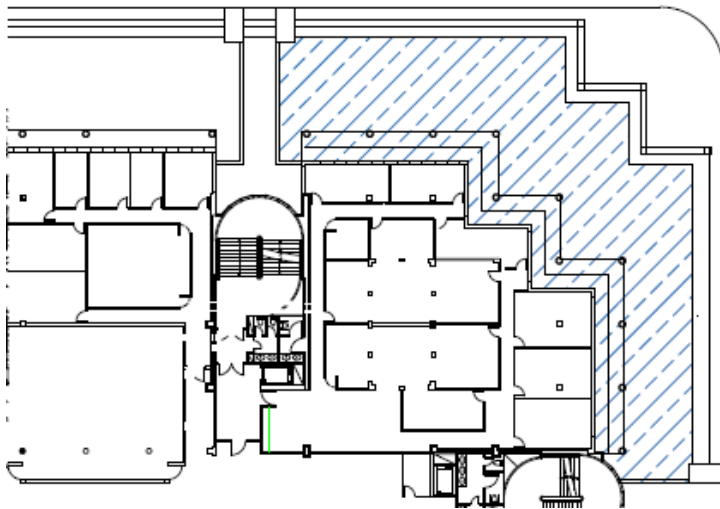


Figura: 17. Plano de la piscina sureste

La cara sur, con la mayor área de vasos disponible, presenta un gran impedimento por su orientación, que recibe el mayor número de horas de radiación solar directa, lo que calentará considerablemente el vaso.

- Opción 4 (cara S)

Área disponible 750 m² aproximadamente

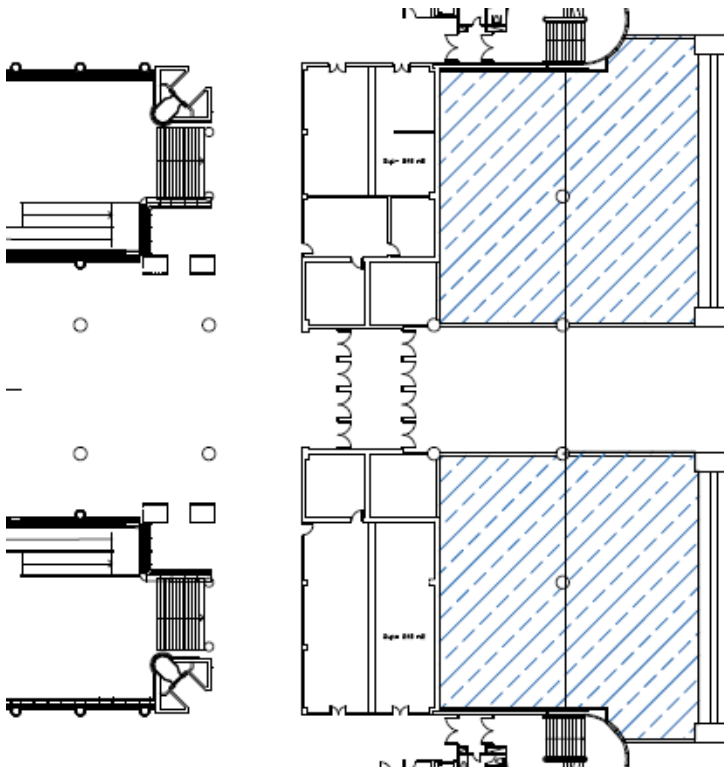


Figura: 18. Plano de la piscina sur

Mediante el uso de la herramienta podemos determinar las sombras y horas de sol que recibirá cada vaso según la orientación y la época del año. Se recogen datos de los siguientes días a las 15:00 horas mediante la herramienta Shadowmap [5]:

- Día 3 de octubre (14:59 horas)

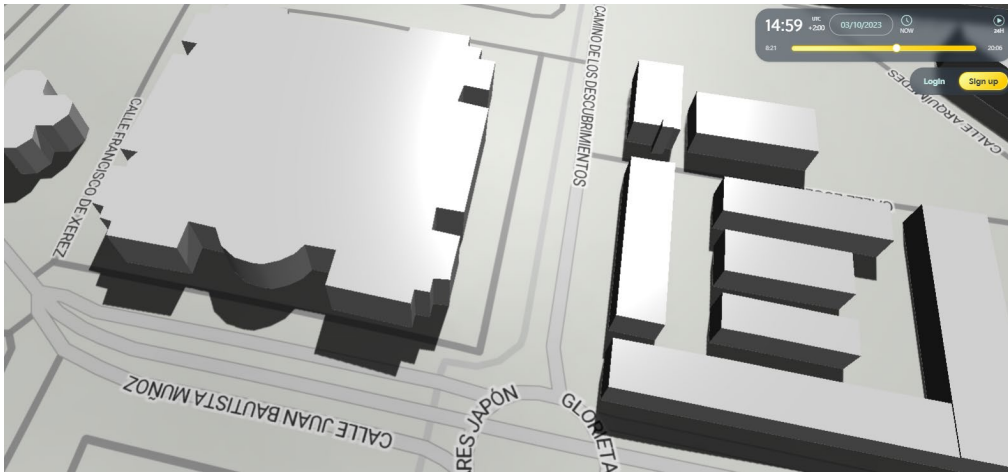


Figura: 19. Mapa de sombras del 3 de octubre

- Día 16 de mayo (14:59)

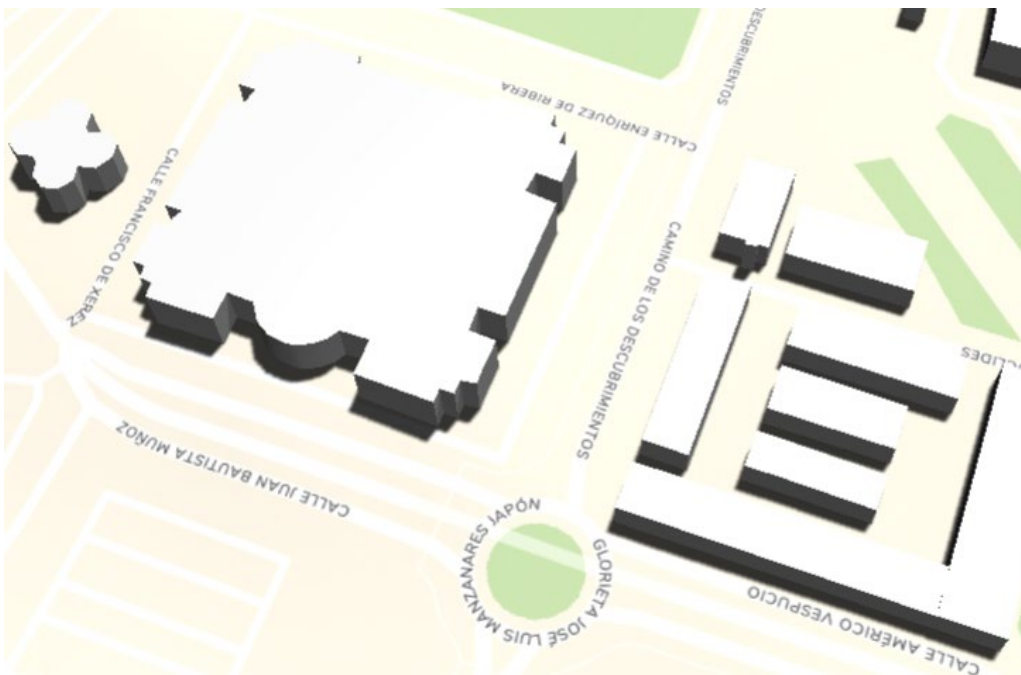


Figura: 20. Mapa de sombras del 16 de mayo

- Día 1 de julio (16:00)

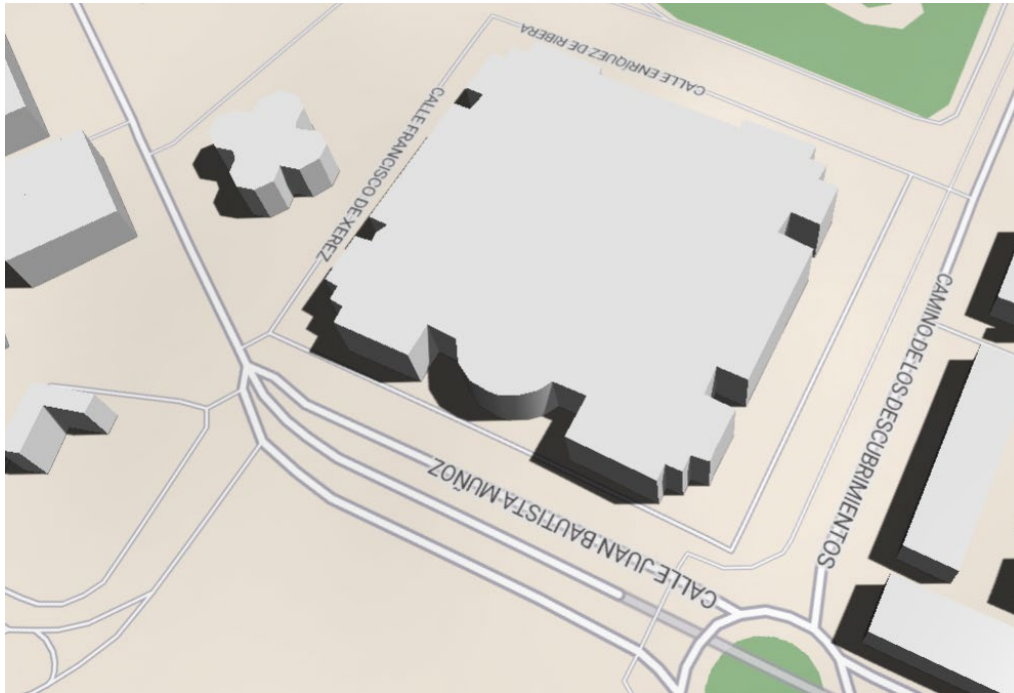


Figura: 21. Mapa de sombras el 1 de julio

Dado que nuestro objetivo es que el agua se caliente lo menos posible, trataremos de evitar al máximo las horas de sol directamente en el vaso. Con esta condición, nuestras mejores opciones son las de las caras NE y NO. Determinar una u otra dependerá de si necesitamos más aporte de agua para enfriar la bomba de refrigeración en las horas previas al medio día o después. En este caso, como además encontramos las máquinas de aire en la cara NO, escogeremos el estanque de la cara NE como objeto de estudio, que además presenta mayor superficie disponible.

3.2 Vaso de la piscina

Para calcular la temperatura del vaso, dado que trabajamos sobre un caso experimental, se ha recurrido a una cámara termográfica que puede arrojar información sobre el calentamiento de la piscina. En concreto, se ha hecho uso del modelo TOPDON ITC 629 [5], que puede medir temperaturas de entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un margen de error de 2°C y una sensibilidad térmica de $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El día 16 de mayo se tomaron las siguientes imágenes a las 11:00 de la mañana.

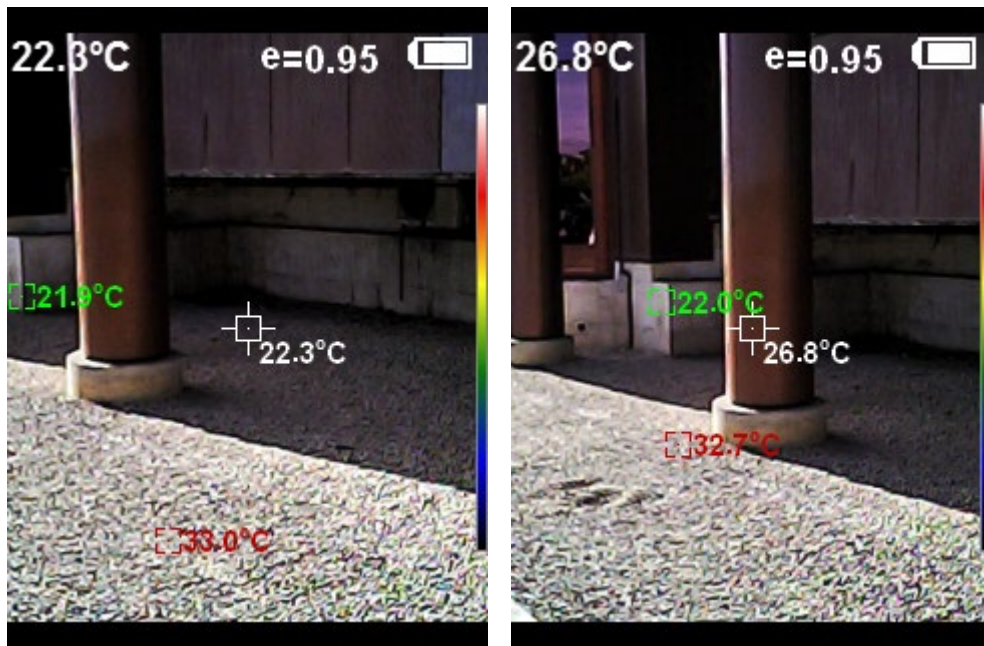


Figura: 22. Temperatura del vaso de la piscina

Vemos la evidente diferencia de temperaturas entre la superficie al sol y la superficie a la sombra. El pilar de apoyo, de acero corten, se encuentra a una temperatura media de 26°C.

En el modo *heatmap* se aprecia de manera evidente que el material del fondo del vaso de la piscina tiene una conductividad térmica alta y está más caliente que su entorno. Esto nos hace plantearnos si fuese conveniente cambiar dicho material por otro menos conductor para evitar calentar demasiado el agua de la piscina. Aun así, llenar el vaso de agua cambiaría estas condiciones, y se presentan únicamente para su análisis.

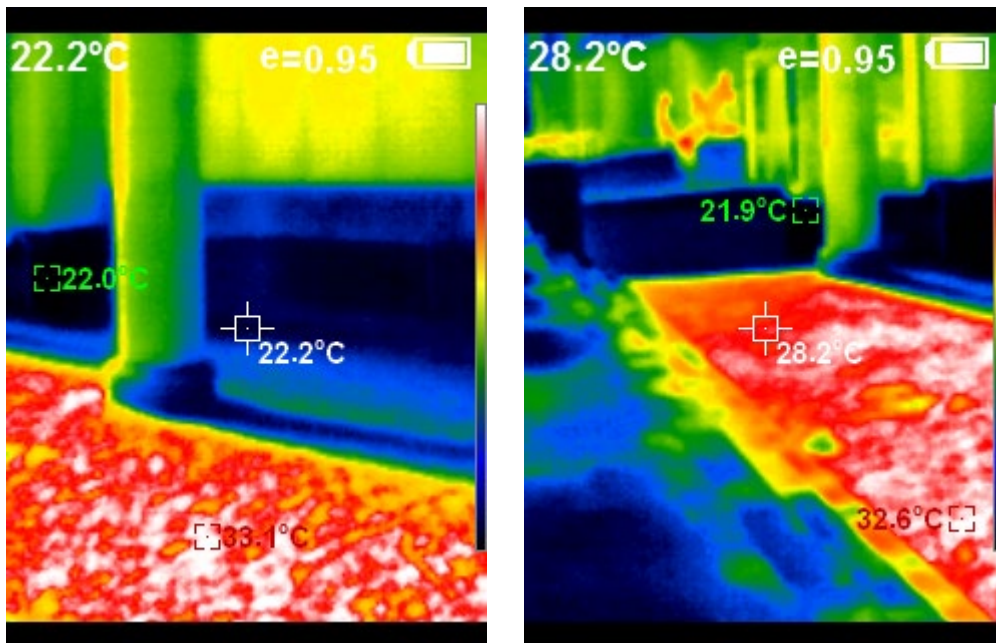


Figura: 23. Mapa de calor de la piscina

3.3 Bombeo y UTA

Para estudiar el sistema de captación será necesario recuperar los principios de la instalación original de conductos de las fuentes. Esta red necesitaría tuberías más grandes por los caudales que necesitaremos.

En las paredes del vaso de las piscinas encontramos lo que parece ser una toma de impulsión de agua. Estos conductos no aparecen en los planos de la ETSI al ser estos posteriores al momento en el que todavía funcionaban.



Figura: 24. Toma de agua en una piscina

El sistema de captación requiere de una toma de impulsión de agua del vaso de la piscina. La toma de expulsión llevará, mediante una bomba que será dimensionada posteriormente, el agua hasta las máquinas de aire. Allí, el agua atravesará un intercambiador de calor agua-aire en el que obtendrá energía en forma de calor del aire, enfriando así este último. El agua circulará por tuberías de diámetro 110 mm por la fachada del edificio o bien por el interior para evitar sobrecalentamientos en la subida por altas temperaturas.

Luego, este conducto devolverá el agua a la piscina para enfriar naturalmente el agua de nuevo. La sombra y el poder calorífico del agua juegan un papel clave aquí.

De forma complementaria, se instalarán 4 jets pulverizadores de agua para mejorar la homogeneidad de la temperatura del estanque y enfriar a su vez el ambiente mediante enfriamiento evaporativo. Más adelante se calculará también el flujo de calor intercambiado por la evaporación del agua y se tendrá en cuenta en los cálculos para la simulación.

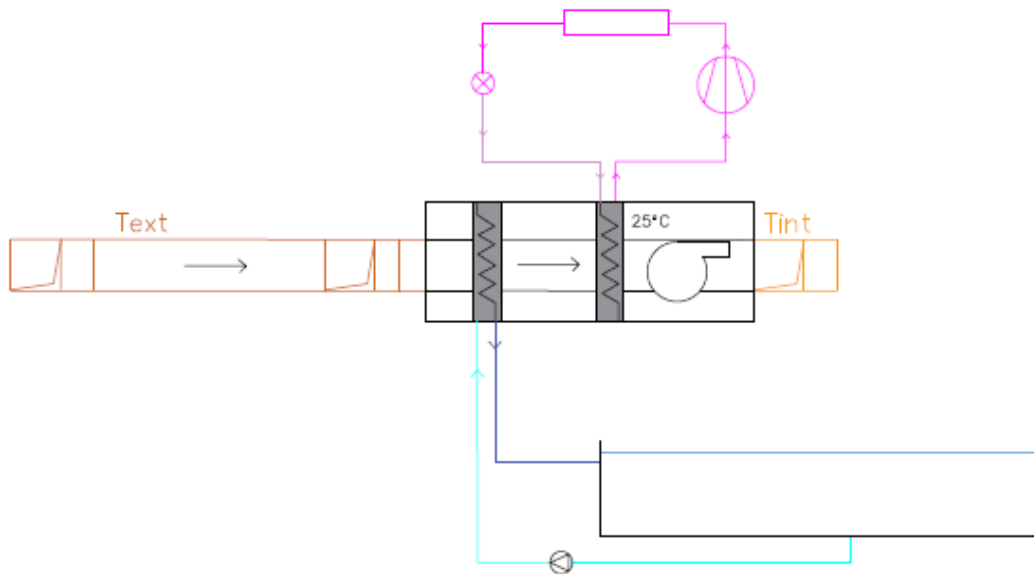


Figura: 25. Esquema de la instalación con acople a la UTA

Existe una preinstalación con arquetas en las esquinas de las piscinas que podría considerarse para la instalación de la bomba.



Figura: 26. Arqueta en la esquina de una piscina

En este caso, como las tuberías irán hacia arriba, se propone una pequeña instalación en la pared pegada a la fachada del edificio, que contenga la bomba de impulsión, las válvulas y las tomas de impulsión y expulsión. Estas tuberías tendrán una longitud horizontal de 4 metros. Luego, con un codo, subirán 15 metros hasta la fachada, donde con otro codo volverán a recorrer horizontalmente otros 14 metros hasta conectarse a la UTA. Esto, con dos tuberías en paralelo (una para el agua fría y otra para el agua de retorno de la UTA), suman un total de 62 metros de tubería. La diferencia de alturas a vencer es de 15 metros.

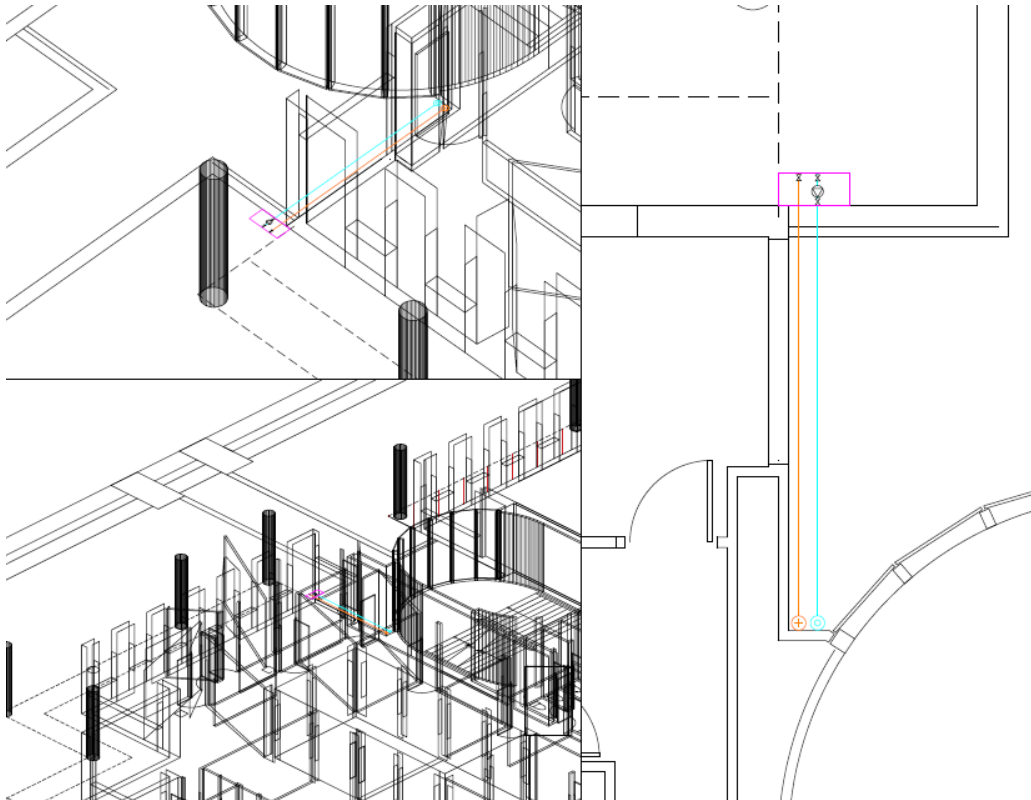


Figura: 27. Ubicación de los conductos de impulsión y retorno



Figura: 28. Conductos de impulsión y retorno

3.4 Punto de conexión

El aporte del agua se puede integrar de dos maneras: adaptando la UTA con un nuevo intercambiador agua-aire

o a través de la etapa de calefacción. Dado que este sistema nunca estará activo simultáneamente con el nuestro, no será necesario ampliar la UTA para incluir el agua del estanque, y el coste del intercambiador es opcional. De igual forma, para integrar de esta manera el sistema, sería necesario configurar válvulas para los distintos modos en invierno y verano.

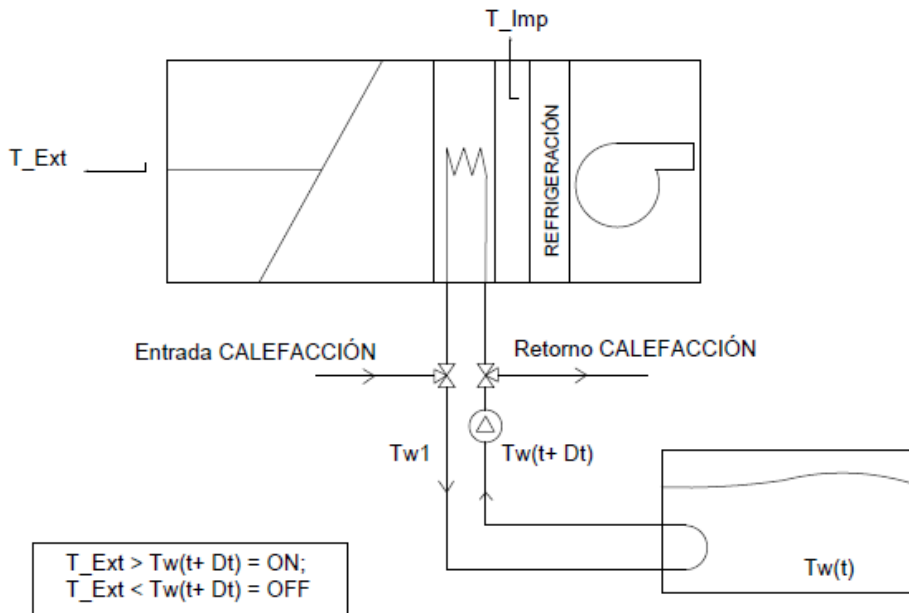


Figura: 29 Esquema de conexión con la UTA

Para configurar el sistema de control de bombeo se empleará un controlador lógico programable junto con sensorización de temperaturas y válvulas motorizadas.

En este caso, se propondrá usar el Siemens S7-1200, un dispositivo capaz de controlar las operaciones del sistema que necesitamos. Los sensores propuestos serán los PT100, para medir la temperatura del agua y del aire exterior. La bomba motorizada estará controlada por el PLC, así como las válvulas que se abrirán o cerrarán para regular el agua. Con la ayuda de un programa como puede ser TIA Portal, de Siemens, se puede configurar el sistema de control de forma que active el bombeo cuando la temperatura del agua sea inferior a la temperatura del aire exterior.

En el siguiente diagrama GRAFCET se representa el sistema de control de forma simplificada.

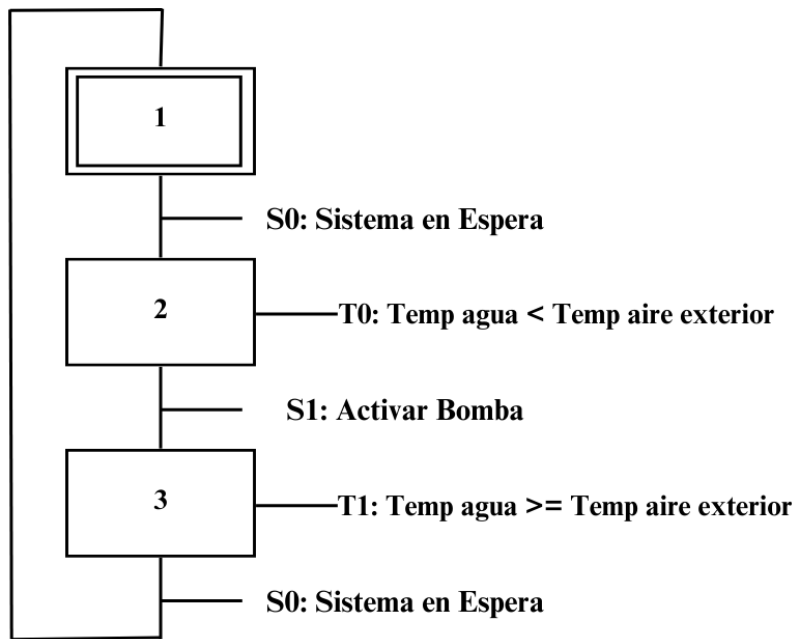


Figura: 30. Esquema GRAFCET con el sistema de control

El estado inicial, S0, mantiene el sistema en espera hasta la transición T0, que ocurre cuando la temperatura del agua es menor que la del aire exterior. Si esta condición se cumple, el sistema pasa al siguiente estado. El estado S1 activa la bomba de agua para hacer circular el sistema. Cuando la temperatura del agua supere la temperatura del aire exterior ocurrirá la transición T1, que vuelve a poner el sistema en espera hasta que vuelva a ocurrir T0.

Este sistema optimiza el consumo energético de la bomba y no malgasta energía en situaciones en las que la temperatura del aire sea inferior a la del agua. Además, la automatización del circuito reduce la necesidad de intervención manual, mejorando la fiabilidad del sistema.

3.5 Intercambio Térmico

Conocidas las temperaturas del agua a lo largo del día, se puede estimar el intercambio térmico que experimentan el agua y el aire en el intercambiador. Necesitamos determinar el caudal del agua por los conductos (estará limitado bien por la sección del conducto o bien por el tamaño de la bomba de impulsión).

Conocida la temperatura del agua y el caudal, como el poder calorífico del agua es dato, podemos calcular el calor intercambiado.

Debemos igualar el calor del aire con el del agua. Conocemos la temperatura de entrada del aire (datos Excel menos el aporte del ciclo de refrigeración) y el caudal y el Cp del aire. Como también conocemos la Tint del aire (la que deseamos) podemos despejar la temperatura de salida del intercambiador del agua.

Calcularemos ahora el intercambio térmico de ambos fluidos

$$Q_{\text{Aire}} = m_{\text{Aire}} * C_{p\text{Aire}} * (T_{\text{Ext}} - T_{\text{Int}})$$

$$Q_{\text{agua}} = m_{\text{Aire}} * C_{p\text{Agua}} * (T_{\text{Agua Caliente}} - T_{\text{Agua Fría}})$$

$$Q_{\text{Aire}} = Q_{\text{agua}}$$

En este estudio se trabajará sobre una de las UTA de la escuela. El caudal de la UTA objeto de estudio, situada en la cara noreste de la escuela, es de 22.500 m³/h.

$$Q_{Aire} = m_{Aire} * C_{pAire} * (T_{Ext} - T_{Int})$$

Para poder trabajar sobre una hipótesis, se escoge un modelo de intercambiador de placas que cumpla con las necesidades del proyecto. En concreto, se ha estudiado la ficha técnica del modelo SEDICAL UFP-61 / 44 MH 98 - H - PN10, con una DTLM (diferencia de temperatura logarítmica media) de 2,49°C, y el modelo SEDICAL UFP-34 / 40 H - C - PN10, con una DTLM de 1°C.

Interesa acercarnos lo máximo entre la temperatura $T_{AguaFria}$ y $T_{FriaPiscina}$, de forma que la cesión de energía sea lo mayor posible.

Se realizarán los cálculos con el método NTU, para el cual se hace uso de los siguientes datos de entrada:

$$T_{Agua Fria} \leq 20^{\circ}C$$

Dada la DTLM de 1°C, $T_{FriaPiscina} = 19^{\circ}C$

Calculo las Cs, $C_{caliente}$ y $C_{fría}$

$$C_{caliente} = 8,33 \text{ Kg/s} * 4,19 \text{ KJ/(Kg * K)} = 32.902,7 \text{ W/}^{\circ}C = C_{max}$$

$$C_{Fría} = 1,67 \text{ Kg/s} * 4,19 \text{ KJ/(Kg * K)} = 6.997,3 \text{ W/}^{\circ}C = C_{min}$$

$$R = C_{min} / C_{max} = 0,20$$

$$\varepsilon = (T_{caliente Piscina} - T_{Fría Piscina}) / (T_{Agua Caliente} - T_{Fría Piscina}) = (19 - 14) / (20 - 14) = 0,8333$$

$$NTU = UA / C_{min} = 3.254,6 * 4,31 / 6.997,3 = 2$$

$$\varepsilon = 1 - B * \exp(-c * NTU)$$

Despejando obtengo una ecuación con dos incógnitas

$$0,8333 = 1 - B * \exp(-c * 2)$$

Para despejar la eficiencia calculamos de nuevo para otros caudales de forma que obtenga dos puntos más. Duplicaremos los caudales:

$$C_{caliente} = 16,66 \text{ Kg/s} * 4,19 \text{ KJ/(Kg * K)} = 6.9805,4 \text{ W/}^{\circ}C = C_{max}$$

$$C_{Fría} = 3,34 \text{ Kg/s} * 4,19 \text{ KJ/(Kg * K)} = 13.994,6 \text{ W/}^{\circ}C = C_{min}$$

$$R = 0,20$$

$$NTU = UA / C_{min} = 3.254,6 * 4,31 / 13.994,6 = 1$$

En la gráfica relaciona ε con R y NTU, para NTU = 1 y R = 0,2 tenemos un ε de 0,595

$$0,595 = 1 - B * \exp(-c * 1)$$

Ya tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas, podemos resolver.

$$B = 0,332$$

$$c = -0,18617$$

Y para el caudal dado obtenemos una ε de 0,85, que usaremos en adelante en nuestro modelo para obtener los caudales de agua necesarios. Como vimos anteriormente, la opción inicial es la de integrar el sistema pasivo a la etapa de calefacción de la UTA, de forma que el intercambiador propuesto ha sido usado para obtener la eficiencia estimada en base a datos reales de un intercambiador como el que se usa en el proyecto Qanat.

Calculamos ahora las condiciones de la piscina. Dado que hemos elegido el vaso de la cara Noreste, el área será de 350 m^2 .

El volumen será:

$$V = A \cdot h$$

Donde:

- A es el área de la piscina.
- h es la profundidad de la piscina.

Dados:

$$A = 350 \text{ m}^2$$

$$h = 0,35 \text{ m}$$

$$V = 350 \text{ m}^2 \cdot 0,35 \text{ m} = 123 \text{ m}^3$$

El volumen de la piscina es de 123 metros cúbicos.

Establecemos una renovación del 60% del estanque por hora. Para calcular el caudal necesario para renovar el 60% del volumen de la piscina, primero necesitamos determinar qué volumen corresponde al 60% del total y luego calcular el caudal en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o metros cúbicos por hora (m^3/h).

$$V_{60\%} = 0,60 \times 123 \text{ m}^3 \approx 75 \text{ m}^3$$

El volumen de 75 m^3 se renueva cada hora, por lo que el caudal en metros cúbicos por hora (m^3/h) es simplemente $75 \text{ m}^3/\text{h}$. Para convertir de m^3/h a m^3/s , dividimos por el número de segundos en una hora (3600 segundos):

$$Q = 75 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ s}$$

$$Q \approx 0,0208 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo tanto, el caudal necesario para renovar el 60% del volumen de la piscina cada hora es aproximadamente $75 \text{ m}^3/\text{h}$ o $0.0208 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$Q_{kg/s} = Q_{m^3/s} \times \rho$$

Donde:

- Q es el caudal en kg/s .
- Q es el caudal en m^3/s .
- ρ es la densidad del agua (1.000 kg/m^3).

Sustituyendo los valores:

$$Q = 0,0208 \text{ m}^3/\text{s} \times 1.000 \text{ kg/m}^3 = 20,8 \text{ kg/s} = 1.250 \text{ L/minuto}$$

Ya sabemos el caudal de agua que podemos mover: $20,8 \text{ Kg/s}$

Bomba de agua:

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta}$$

Donde conocemos Q, H, ρ , g y el rendimiento

Vamos a seleccionar una bomba que supla nuestras condiciones. Necesitamos un caudal de 1.250 L/minuto y

una diferencia de alturas de 15 metros.

Recurrimos al catálogo de bombas de agua de IDEAL [5]. En la siguiente gráfica podemos ver los distintos modelos según altura y caudal. Para 1.250 L/minuto, el modelo RFI 65-14 / 5,5 resulta válido, ya que puede soportar una diferencia de altura de más de 15,3 metros para 1.499 L/minuto.

RFI	CV	KW	Ø		M3/h l/min	0	30	36	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	198	216	240
			ASP	IMP		0	500	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3300	3600	4000
RFI 65-14 / 7,5	7,5	5,5	80	65	METROS	20,3	19,7	19,4	18,8	18	16,8	15,3	13,7	11,7									
RFI 65-14 / 10	10	7,5	80	65		22,5	22	21,7	21,4	20,6	19,5	18	16,7	15	12,8								
RFI 65-16 / 15	15	11	80	65		36,5	36,2	36,1	35,8	35	34	33	30,9	28,8	26,5	23,5	20,2						
RFI 65-16 / 20	20	15	80	65		42,5	42	41,9	41,5	41	40	39	38	36	34	32	27	25	22	16			
RFI 65-20 / 20	20	15	80	65		44				43	42,5	40,5	39	36	34	30							
RFI 65-20 / 25	25	19	80	65		47,5				49,3	48,5	47,3	45,5	43,5	41	38							
RFI 65-20 / 30	30	22	80	65	MTS	56,5				56,5	55,7	54,7	53,3	51,6	49,6	47,1	44						
RFI 80-16 / 15	15	11	100	80		27			26	25,8	25,5	24,7	23,6	22,7	21,8	20,6	19,5	18,1	16,2	14,3	10,9		
RFI 80-16 / 20	20	15	100	80		32			31,8	31,6	31,5	31	30	29	28	27,5	26,8	25,5	24	21,5	19	15,5	
RFI 80-16 / 25	25	19	100	80		37			37	36,5	36	35,5	35	34,5	33,3	32,6	31,2	31	29,7	28	25,7	23,4	19
RFI 80-16 / 30	30	22	100	80		39			39	38,8	38,6	38,5	38,3	38	37,2	36,6	35,7	34,5	33,2	32	30,2	27,4	23

Tabla 8. Modelos de bombas según caudal y altura [6]

Esta bomba tiene una potencia de 5,5 kW, lo que debemos incluir en nuestros cálculos. La bomba consumirá 5,5 kWh.

3.6 Modelado y Simulación

Introducimos estos datos en una hoja Excel basada en el documento de datos (*Datos_diseño_sevilla_MET*, Datos climáticos desde el 1/05 hasta el 31/10), en el que conocemos la temperatura exterior del aire cada 10 minutos en Sevilla.

Para estos valores, diseñamos un sistema de control que encienda nuestra bomba cuando la temperatura exterior supere los 25 grados. De esta forma, y habiendo fijado la temperatura de impulsión de la escuela a 25 grados, podemos deducir la temperatura que tiene el estanque para un instante t .

Debemos tener también en cuenta que el estanque no sólo se irá calentando por el calor del intercambiador, sino también por:

1. Flujo de calor por convección en la superficie
2. Intercambio de calor por conducción a través de las paredes y el fondo
3. Flujo neto de radiación de larga en la superficie
4. Flujo de calor asociado a la evaporación de agua en la superficie
5. Flujo de calor asociado al funcionamiento de los jets

Siendo la temperatura del estanque función de q_c , q_p , q_{RL} , q_e , q_s y q_{UTA} , estos quedan definidos como:

- Calor por convección

$$q_c = hc \cdot (T_{ext} - T_{FríaPiscina}) \cdot A_{lámina\ de\ agua}$$

Donde:

$$hc = 2,8 + 3 \cdot v_{viento} [W/m^2K]$$

- Calor por conducción con las paredes y el suelo

$$qp = q_{cd paredes} + q_{cd suelo}$$

Donde:

- Conductividad térmica hormigón polimérico 1,2 W/ m²K
- Conductividad térmica chinos 2,5 W/ m²K

Se multiplican por la diferencia de temperaturas con respecto al agua y el área correspondiente de transferencia.

- Radiación de larga en la superficie

$$qRL = \sigma \cdot \varepsilon \cdot ((T_{FríaPiscina} + 273)^4 - (T_{cielo} + 273)^4) \cdot A_{lámina de agua}$$

Donde:

- $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8}$ [W/ m²K⁴] representa la constante de Stefan-Boltzmann.
- $\varepsilon = 0,95$ y representa la emisividad del agua.
- T_{cielo} y $T_{FríaPiscina}$ corresponden a la temperatura del cielo y a la temperatura.
- del agua del estanque respectivamente, ambas en [°C].
- Alamina de agua = 350 m² y representa la superficie de agua en el estanque.

- Calor de evaporación en la superficie

$$qe = \frac{Km}{R \cdot (T_{ext} + 273)} \cdot h_{fase} \cdot 1000 \cdot (P_{Vapor Tw} - HR \cdot P_{Vapor Ta}) \cdot A_{lámina de agua}$$

Donde:

- $Km = 9,38 \cdot 10^{-3}$ [m/s], constante.
- $R = 461,89$ [J /Kg·K], constante de los gases ideales para el agua.
- $h_{fase} = 2.257$ [KJ/ Kg], entalpía de cambio de fase.
- HR es la humedad relativa (en tanto por uno).
- $A_{lámina de agua} = 350 m^2$, superficie de agua en el estanque.

- Calor asociado a los jets

$$qs = m_{agua} \cdot Cp \cdot ((T_{FríaPiscina} - T_{bh})) \cdot eff$$

Donde:

- $\dot{m}_{agua}$ es el gasto másico de agua impulsado por los jets [Kg /s]
- $Cp = 4.180$ [J Kg/·K], es el calor específico del agua a presión constante
- T_{bh} y $T_{FríaPiscina}$ representan la temperatura de bulbo húmedo y a la temperatura del agua del estanque

- eff = eficiencia de los jets

- Calor intercambiado con la UTA

$$q_{UTA} = C_{min} \cdot \varepsilon \cdot (T_{ext} - T_{Fria\ Piscina})$$

Donde:

- C_{min} representa el menor de los productos de gasto másico y calor específico
- T_{ext} es la temperatura del aire exterior
- $T_{FriaPiscin}$ es la temperatura del agua

Esto nos desvela cuál será la temperatura del estanque. Para un instante t , la temperatura del estanque será igual a la del instante anterior y la variación del balance energético con su alrededor basado en todos los flujos de energía que ocurren.

Dado que también se instalarán pulverizadores de agua, emplearemos la siguiente expresión para calcular el volumen de agua que se evaporará en ese intervalo de tiempo y deberemos reponer.

$$m_{Agua\ evaporada} = \frac{q_e \cdot Periodo}{h_{fase}} + \frac{q_s \cdot Periodo}{h_{fase}}$$

Donde:

- q_e se corresponde con el calor de evaporación
- Periodo es el intervalo de tiempo (10 minutos, 600 segundos)
- q_s se corresponde con el calor asociado a las boquillas
- h_{fase} es la entalpía de cambio de fase (2257 KJ/Kg)

Así, a lo largo del día el agua se irá calentando y enfriando en función del calor aportado por las diferentes condiciones.

Conocidos los siguientes valores:

- Radiación difusa
- Radiación directa
- Humedad relativa
- Tiempo
- Temperatura exterior
- Temperatura interior (fijada a 25°C)
- Temperatura cielo
- Velocidad del viento

Podemos modelar nuestro estanque:

				si Text > Tw									
Tiempo	VELOC VIENTO	TEXT	Tw(T-AT)	ON/OFF	T_Imp_Teo	T_Imp_Teo < 25°	T_Imp_Re	Qa	Tw1	Tw2	QUTA	Tw(t)	
01/05/2011 0:00	2.10236	8.19999993	8	1	8.02999999	Si	25	0	8.16999994		0	7.959086972	
01/05/2011 0:10	2.102361667	8.23333327	7.95908697	1	8.00022392	Si	25	0	8.19219632		0	7.918618072	
01/05/2011 0:20	2.102363333	8.26666666	7.91861807	1	7.97082535	Si	25	0	8.21445932		0	7.878589744	
01/05/2011 0:30	2.102365	8.29999993	7.87858974	1	7.94180127	Si	25	0	8.2367884		0	7.838998462	
01/05/2011 0:40	2.102366667	8.33333327	7.83899846	1	7.91314868	Si	25	0	8.25918305		0	7.799840728	
01/05/2011 0:50	2.102368333	8.36666666	7.79984073	1	7.88486461	Si	25	0	8.28164272		0	7.761113075	
01/05/2011 1:00	2.10237	8.39999993	7.76111308	1	7.8569461	Si	25	0	8.3041669		0	7.722812066	
01/05/2011 1:10	2.10237	8.36666673	7.72281207	1	7.81939027	Si	25	0	8.27008853		0	7.68455091	
01/05/2011 1:20	2.10237	8.33333334	7.68455091	1	7.78186828	Si	25	0	8.23601603		0	7.646329286	
01/05/2011 1:30	2.10237	8.30000007	7.64632929	1	7.7443799	Si	25	0	8.20194945		0	7.608146876	
01/05/2011 1:40	2.10237	8.26666673	7.60814688	1	7.70692485	Si	25	0	8.16788875		0	7.570003363	
01/05/2011 1:50	2.10237	8.23333334	7.57000336	1	7.66950287	Si	25	0	8.13383389		0	7.531898435	
01/05/2011 2:00	2.10237	8.20000007	7.53189844	1	7.63211368	Si	25	0	8.09978482		0	7.493831782	
01/05/2011 2:10	2.10237	8.16666683	7.49383178	1	7.58725704	Si	25	0	8.02324158		0	7.455538784	
01/05/2011 2:20	2.10237	8.03333335	7.45553878	1	7.54220799	Si	25	0	7.94666429		0	7.41702143	
01/05/2011 2:30	2.10237	7.95000017	7.41702143	1	7.49696824	Si	25	0	7.87005336		0	7.378281693	
01/05/2011 2:40	2.10237	7.86666683	7.37828169	1	7.45153946	Si	25	0	7.79340906		0	7.339321529	
01/05/2011 2:50	2.10237	7.78333335	7.33932153	1	7.40592333	Si	25	0	7.71673171		0	7.30014288	
01/05/2011 3:00	2.10237	7.70000017	7.30014288	1	7.36012147	Si	25	0	7.64002157		0	7.260747668	
01/05/2011 3:10	2.10237	7.7	7.26074767	1	7.32663552	Si	25	0	7.63411215		0	7.221688724	
01/05/2011 3:20	2.10237	7.7	7.22168872	1	7.29343542	Si	25	0	7.62825331		0	7.182963327	
01/05/2011 3:30	2.10237	7.7	7.18296333	1	7.26051883	Si	25	0	7.6224445		0	7.144568779	
01/05/2011 3:40	2.10237	7.7	7.14456878	1	7.22788346	Si	25	0	7.61668532		0	7.106502403	
01/05/2011 3:50	2.10237	7.7	7.1065024	1	7.19552704	Si	25	0	7.61097536		0	7.068761545	
01/05/2011 4:00	2.10237	7.7	7.06876155	1	7.16344731	Si	25	0	7.60531423		0	7.031343574	
01/05/2011 4:10	2.10237	7.65000001	7.03134357	1	7.12414205	Si	25	0	7.55720162		0	6.993963365	
01/05/2011 4:20	2.10237	7.60000001	6.99396337	1	7.08486888	Si	25	0	7.50909459		0	6.956620658	
01/05/2011 4:30	2.10237	7.55000001	6.95662066	1	7.04562757	Si	25	0	7.46099318		0	6.919315196	
01/05/2011 4:40	2.10237	7.50000001	6.9193152	1	7.00641793	Si	25	0	7.41289736		0	6.882046723	
01/05/2011 4:50	2.10237	7.45000001	6.88204672	1	6.96723973	Si	25	0	7.36480709		0	6.844814988	
01/05/2011 5:00	2.10237	7.40000001	6.84481499	1	6.92809275	Si	25	0	7.31672233		0	6.807619739	

Tabla 9. Simulación de la temperatura del agua

Aportando el valor inicial $Tw(t-\Delta t) = 8^{\circ}\text{C}$, podemos simular el comportamiento de la temperatura con el tiempo en función de las condiciones meteorológicas y de la UTA.

Como es evidente, en las horas sin radiación solar y temperatura exterior < temperatura agua, el estanque irá cediendo energía al ambiente en forma de radiación, convección y conducción hasta que su temperatura sea igual a la del ambiente.

Se observa que el flujo energético por radiación es considerable por lo que se propone incluir como opción adicional elementos de sombra para el estanque, aunque deben permitir el enfriamiento del agua por las noches con el intercambio radiante con el cielo.

Debemos considerar también el consumo energético de la bomba para completar nuestros cálculos. Se impondrá que la bomba consume, en los intervalos de 10 minutos, 5,5/6kWh en caso de que el sistema esté activo, y 0 si no lo está.

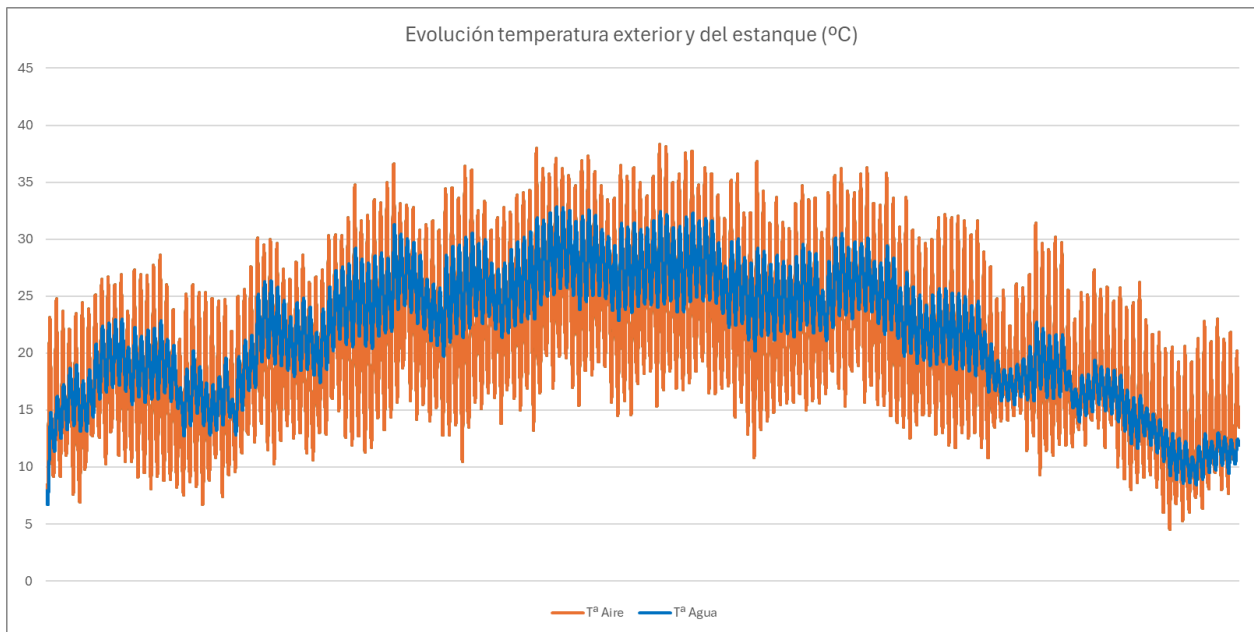


Figura: 31. Evolución temperatura exterior y temperatura del estanque

Dada nuestra simulación, y evaluando en paralelo el comportamiento de la UTA sin el uso del estanque renovable, podemos sacar conclusiones sobre los consumos antes y después de esta instalación.

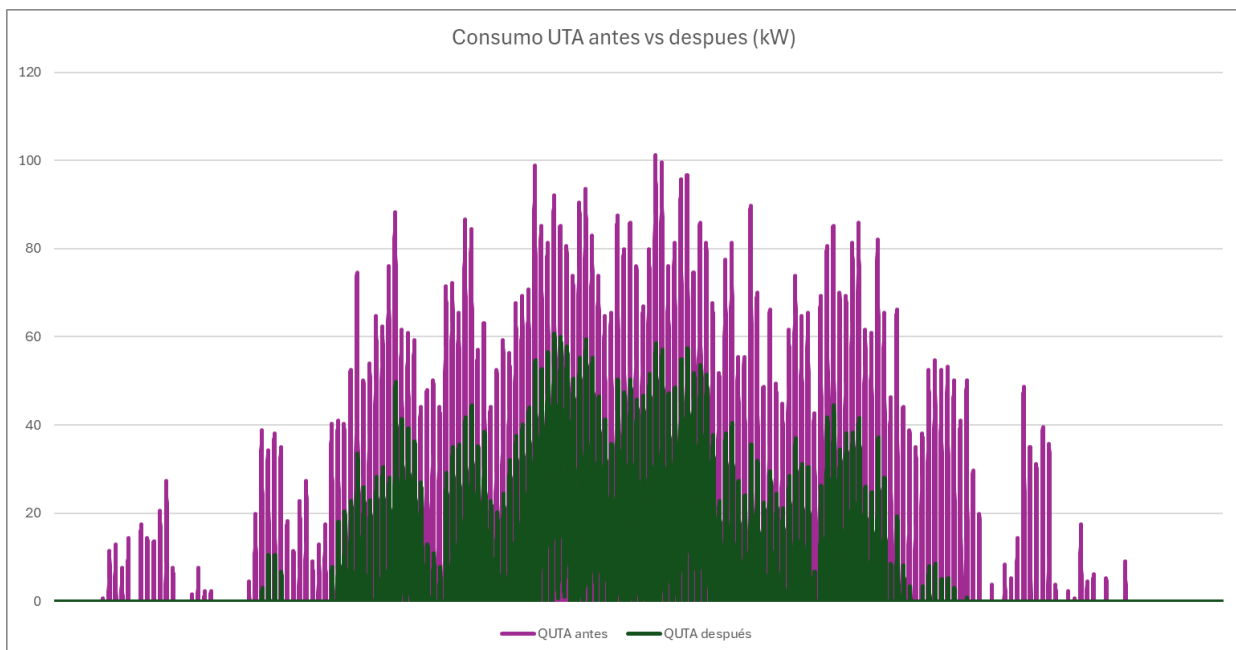


Figura: 32. Comparación consumo unidad tratamiento aire

Dado el intervalo de meses objeto de estudio, se obtiene un consumo total de casi 43.000 kWh anuales en régimen de refrigeración y ventilación.

Aplicando el aporte del sistema propuesto, y considerando que este supone un consumo de la bomba de 1.600 kWh anuales aproximadamente, vemos que el consumo total de la UTA se reduce a menos de 28.000 kWh, lo que supone un ahorro de más de 13.000 kWh anuales de energía.

Consumo		Energía	
Antes (sólo UTA)		257541.2 kW	42923.5 kWh
Después (con estanque)		166399.7 kW	27733.3 kWh
Bomba		9572.8 kW	1595.5 kWh
AHORRO		81568.7 kW	13594.8 kWh

Tabla 10. Consumo de ventilación y refrigeración en mayo-octubre

Esta reducción del 32% de consumo es una cifra considerable dados los volúmenes de energía que requiere la escuela.

Al consumo de agua, inicialmente de 123 m³, debemos añadirle la evaporación que se produce de forma natural y por los pulverizadores. Introduciendo los valores en la hoja de cálculo, obtenemos aproximadamente 105 metros cúbicos de agua que se evaporan en el periodo de mayo-octubre. La evaporación natural supone un tercio de la evaporación en ese periodo aproximadamente, lo que nos ayuda a determinar que la evaporación total anual asciende a 160 metros cúbicos aproximadamente. Esto tendría un coste aproximado de 300 € anuales para reponer el agua que se evapora.

3.7 Variantes/alternativas al proyecto inicial

Para mejorar el sistema, se propone añadir una estructura de sombra al estanque que elimine la radiación directa del sol hacia el agua y evite el sobrecalentamiento de esta en días de mucha energía radiante.



Figura: 33. Toldos para el estanque

Para simular esta opción anulamos la radiación directa de nuestra hoja de cálculos y mantenemos la directa. Esta

propuesta tiene como desventaja el enfriamiento del agua en horas sin sol por el intercambio de calor con el cielo. Se aplica un factor de forma de 0,6 a antes de la instalación del toldo, y un 0,05 después del toldo. Así, introduciendo estas condiciones en la simulación, obtenemos que el calentamiento del agua se reduce notablemente, lo que aumenta las horas en las que el sistema de enfriamiento está activo.

En las siguientes gráficas se representa el comportamiento de la temperatura del estanque con respecto a la exterior y a la del estanque sin la instalación de sombra:

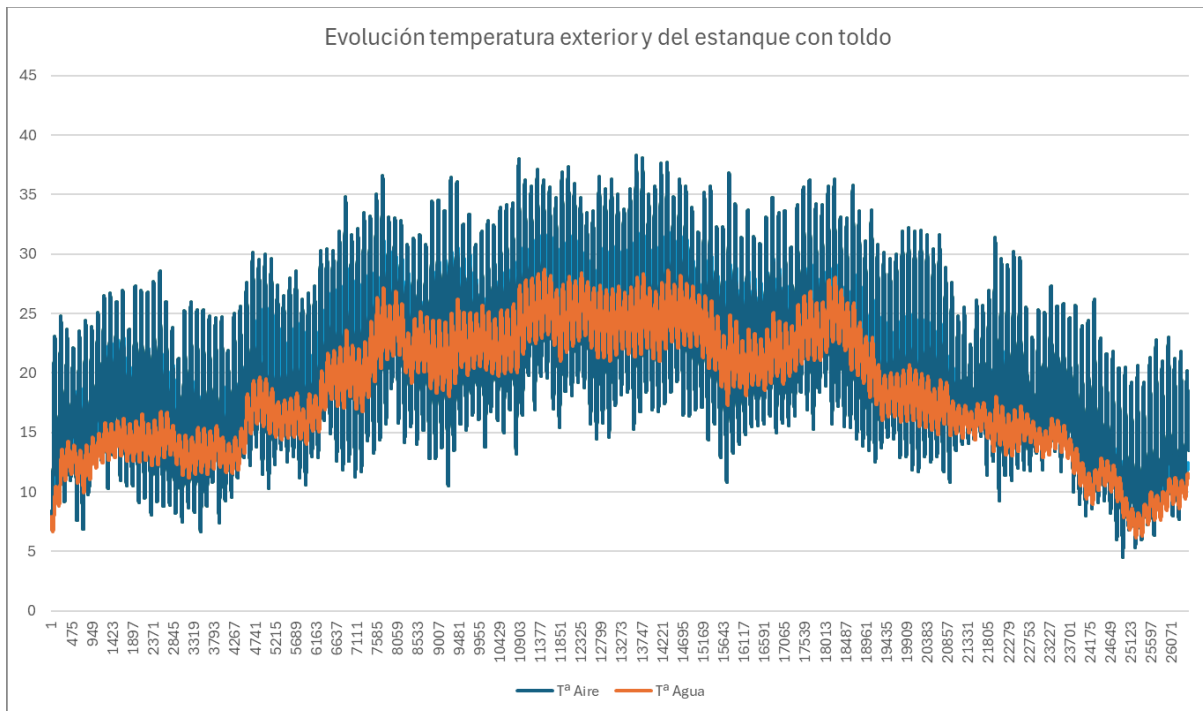


Figura: 34. Temperatura exterior y del estanque en la instalación con toldo (mayo-octubre)

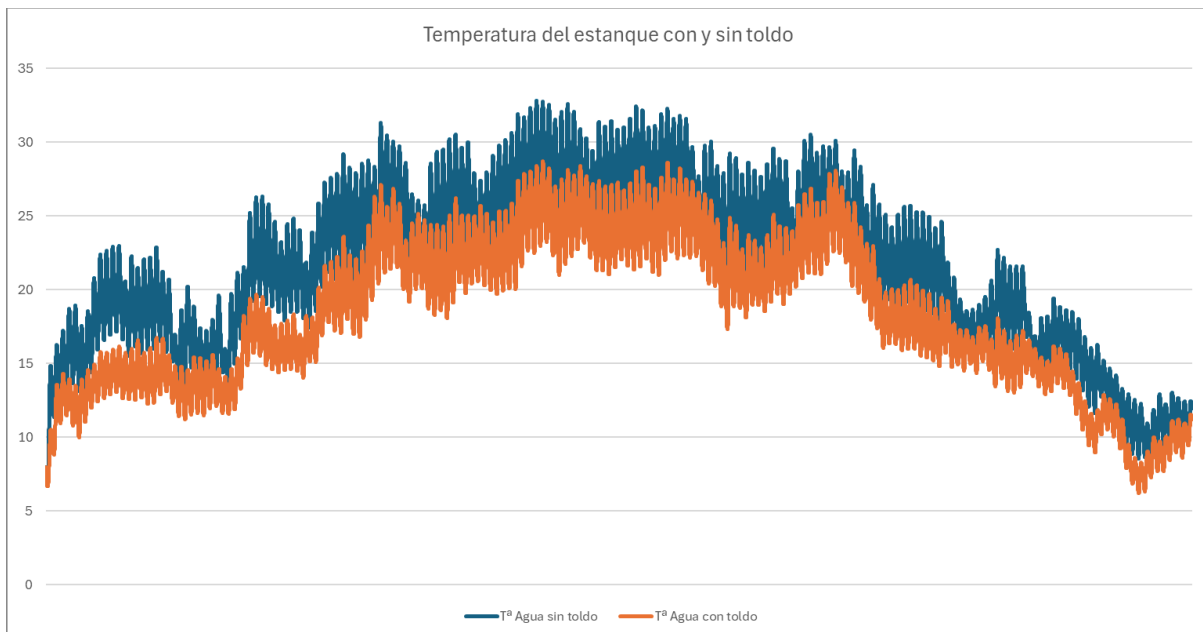


Figura: 35. Temperatura del estanque con toldo (rojo) y sin toldo (azul) (mayo-octubre)

Esto aumenta el ahorro energético a más de 36.000 kWh anuales.

Consumo	Energía	
Antes (sólo UTA)	257541.2 kW	42923.5 kWh
Después (con estanque)	39568.2 kW	6594.7 kWh
Bomba	13513.5 kW	2252.2 kWh
AHORRO	204459.4 kW	36328.8 kWh

Tabla 11. Consumo de ventilación y refrigeración con toldo en mayo-octubre

De igual manera, hay que tener en cuenta que estos cálculos son aproximados, y no tienen en cuenta el calentamiento del aire por otros mecanismos de transmisión de calor como son la convección (que aumentará notablemente por la temperatura del aire entre el agua y el toldo) y conducción. Nos da, eso sí, una idea de cómo influye la radiación directa en el calentamiento del agua en nuestro sistema.

Otra variante de interés es la de incluir un circuito cerrado de agua entre el estanque y la UTA. Como ventaja encontraríamos una reducción del salto de alturas dado que el circuito es cerrado, y el consumo de la bomba se vería reducido significativamente. Sin embargo, también existen desventajas como puede ser la disminución de la eficiencia global del sistema, pues esta opción supone añadir otro intercambiador de placas agua-agua que, como mínimo, elevaría la temperatura a la entrada de la UTA en 1°C con respecto al caso inicial (DTLM=1).

Como medida adicional, también podrían incluirse placas fotovoltaicas en la cubierta para producir la energía requerida por la bomba. De esta forma, la instalación pasaría a ser 100% renovable.

4 ESTUDIO ECONÓMICO Y VIABILIDAD

El propósito de este capítulo es evaluar la viabilidad económica del sistema de enfriamiento para la Escuela Técnica Superior de Ingeniería. La implementación de un sistema como este promete no solo un aporte renovable y sostenible, sino también una potencial reducción de los costes de energía actuales.

Para evaluar la viabilidad económica, se utilizarán varios indicadores que permitirán determinar la rentabilidad del proyecto y su potencial para generar beneficios económicos a largo plazo. Además, se incluirán los gastos estimados necesarios para la implementación del sistema, como la instalación de tuberías, válvulas, bombas, sensores, y el sistema de control automatizado.

Uds	Descripción	Precio	
62	Metro Tubería de 110 mm de diámetro exterior de polietileno doble pared (13,17€/metro)	13,17 €	816,54 €
4	Válvula Circuladora Yonos Pico 30/1-8, conexión roscada, regulación electrónica y resistencia al bloqueo.	242,01 €	968,04 €
10	Juntas y canalizaciones	10,00 €	100,00 €
10	Codo unión tubería	3,44 €	34,40 €
1	Excavación, cimentación y soporte para bomba	500,00 €	500,00 €
1	Grupo de presión multicelular vertical Ebara modelo EVMSL5 23F5/5,5. 400/690 V.o similar, con una potencia de 5,5 kW	3.600,75 €	3.600,75 €
4	Boquillas pulverizadoras	13,72 €	54,88 €
20	Tubería 50 mm pulverización	5,27 €	105,40 €
1	Limpieza y adecuación del estanque	600,00 €	600,00 €
1	Integración tuberías UTA	500,00 €	500,00 €
1	Sistema de control, cableado y sensorización	1.000,00 €	1.000,00 €
2	Conexión manguera	33,67 €	33,67 €
1	Pack de filtrado	135,00 €	135,00 €
1	Bomba recirculación circuito	1.500,00 €	1.500,00 €

Tabla 12. Presupuesto instalación

Este presupuesto se ha elaborado de forma orientativa con los principales elementos necesarios para la instalación. Se han incluido precios similares a los obtenidos en el presupuesto del proyecto Cartuja Qanat [7], y el total asciende a 9.948,68 €. Para la instalación con toldo asumimos un coste adicional de 5.000 € por las velas y la estructura de anclaje.

El sistema propuesto consume 1.595 kWh anuales, y hace reducir el sistema de refrigeración convencional de 42.900 kWh anuales a 27.700 kWh anuales, lo que supone una reducción de energía de 13.500 kWh aproximadamente (considerando el consumo energético de la bomba).

Trasladado a costes, y considerando un precio de kWh de 0,17 € [8], este ahorro energético supone una reducción anual de 2.310 €.

Dado el coste de la instalación de 9.948,68 €, esta instalación tendría un periodo de amortización de 4,3 años. A partir del 5º año, el sistema estaría amortizado. Para el caso del sistema con toldo incluido, el ahorro energético anual ascendería a 5.790 € aproximadamente, lo que teniendo en cuenta el coste inicial total de 14.948,68€, nos deja un periodo de amortización de 2,6 años.

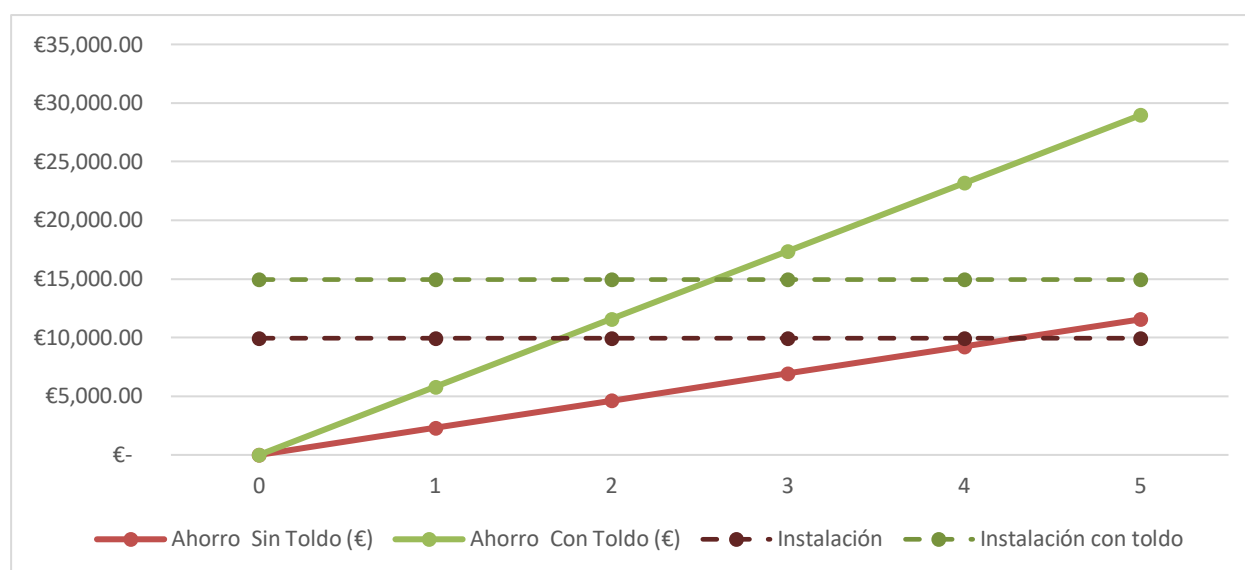


Figura: 36. Amortización de la inversión de la instalación en sus dosvariantes

Un sistema como el propuesto puede tener una vida útil de 15-20 años perfectamente, en los que habría que realizar revisiones periódicas de mantenimiento. Estas revisiones incluyen inspecciones periódicas para detectar y corregir problemas antes de que se vuelvan fallos graves, limpieza de componentes para evitar la corrosión y reemplazo de piezas desgastadas si procede. Elaborar un plan de mantenimiento bien planificado puede extender la vida útil del sistema, así como mejorar su eficiencia.

Las condiciones ambientales también jugarán un papel clave en la durabilidad del sistema, y será recomendable operar siempre dentro de los parámetros razonables de temperatura.

Es evidente que un sistema como el propuesto supone un ahorro significativo anualmente para la escuela, y los contratiempos que supongan un sobrecoste en el presupuesto real de la instalación seguirían siendo soportados por el alto ahorro que se ha obtenido en los modelos. Cabe destacar la diferencia que supone añadir el toldo al sistema.

5 CONCLUSIÓN

Dados los resultados obtenidos en el modelo de la propuesta presentada en este trabajo, obtenemos una serie de conclusiones que plantean el interés de este proyecto. La recuperación de uno o varios estanques en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería garantizaría un aporte energético considerable al actual sistema de climatización

Con las obras pertinentes este proyecto podría llevarse a cabo no sólo en un estanque si no en las cuatro esquinas de la Escuela, aportando a cada una de las 4 UTAs del edificio.

Esta propuesta brinda un enfoque sostenible a la escuela, aportando medidas naturales de enfriamiento y reduciendo el consumo de energía de la unidad de tratamiento de aire.

Como se ha visto, añadir elementos de sombra para garantizar un menor calentamiento del vaso de la piscina mejoraría aún más el sistema y conllevaría un aumento del aporte energético. Utilizar un sistema de placas fotovoltaicas para alimentar la bomba de agua aumentaría el rendimiento de la instalación y reduciría nuevamente los gastos anuales de energía.

Este proyecto aspira a ofrecer una solución integral y sostenible para la gestión de la energía en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Sevilla. Al aprovechar fuentes de agua externas de manera inteligente, se busca no solo reducir la factura energética, sino también sentar las bases para un enfoque más consciente y sostenible en la gestión de recursos energéticos. Sería también interesante, como idea complementaria, sustituir el resto de las fuentes por césped e incluir un sistema de riego para enfriar el ambiente.

REFERENCIAS

- [1] https://www.researchgate.net/publication/309312597_COOLING_WITH_WATER_AND_GREEN_ROOFS_Passive_systems_to_improve_thermal_comfort
- [2] https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-08/briefingnote-a_importance-of-energy-efficiency-in-the-refrigeration-air-conditioning-and-heat-pump-sectors.pdf.
- [3] <https://expo92.blogspot.com/2006/03/pabelln-plaza-de-amrica.html>.
- [4] <https://legadoexposevilla.org/se-entregan-las-llaves-plaza-de-america/>.
- [5] <https://iicbe.org/upload/9452DIR1216417.pdf>.
- [6] <https://auladehistoria.org/termas-de-caracalla-comentario/>.
- [7] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002742>.
- [8] <https://cartujaqanat.com/>.
- [9] <https://cartujaqanat.com/>.
- [10] <https://pdhonline.com/courses/m356/m356content.pdf>.
- [11] <https://app.shadowmap.org/?lat=37.41164&lng=-6.00111&zoom=17.99&azimuth=-3.13786&basemap=map&elevation=nextzen&f=29.0&polar=0.52360&time=1708783156868&vq=2>.
- [12] <https://www.topdon.com/pages/pro-prama?fuzzy=ITC629>.
- [13] <http://www.bombasideal.net:452/publictemp/RFI%201032.pdf>.
- [14] <https://www.bombasideal.com/catalogo/>.
- [15] <https://cartujaqanat.com/>.
- [16] <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-precio-hogares/espana>.