

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Uno de los aspectos fundamentales de este proyecto fin de carrera ha consistido en hacer una amplia revisión bibliográfica previa, para partir de una documentación completa y sólida sobre la que construir y desarrollar el mismo.

2.1 ANTECEDENTES

A lo largo de la historia, tanto la disipación de calor como la producción de frío, han sido un objetivo claro y evidente de estudio e investigación para el desarrollo de los seres humanos. Sin lugar a dudas, fue la importancia de su aplicabilidad a los distintos medios que rodeaban al hombre y sobre los que evolucionaba el mismo, con objeto de mejorar muy mucho su calidad de vida, la que despertó el interés en estos fenómenos físicos a los que a día de hoy vivimos íntimamente ligados.

A continuación se citan algunos ejemplos españoles de los desconocidos como “frigoristas”, y que sin embargo, fueron verdaderos precursores del frío en el mundo [3]:

- El gaditano Columela, el primer «ingeniero agrónomo» del mundo, precursor, hace dos mil años de la conservación frigorífica de los alimentos.
- Los hispanorromanos e hispanoárabes que inventaron el acondicionamiento del aire, con las casas andaluzas, y los alimentos congelados, con el alhale.
- Los sevillanos Mexía y Monardes, precursores, hace cuatro siglos y medio, del aislamiento frigorífico y de la tecnología frigorífica, respectivamente.
- El madrileño Murillo, quien introdujo el concepto de calor latente y observó la influencia de la humedad –unida al frío– en la conservación de los alimentos.
- Marqués, que, posiblemente, patentó por vez primera una máquina portátil de fabricación de hielo (1865).
- Reull, que fabricó antes que nadie, planchas de corcho aglomerado (1980).
- Aguierre, que patentó, por primera vez, un vagón de pasajeros con acondicionamiento de aire (1900).
- Sitjas y Bigas, quienes inventaron los «sandwiches» aislantes (1908).

- Rodríguez, que definió el concepto de grado higrométrico (1858).
- Calvet y Sangerman, quienes respectivamente descubrieron la importancia de la humedad relativa en el confort humano (1866) y pensaron seriamente en la utilización de la energía solar.
- O que hace ya más de un siglo, se fabricaban compresores frigoríficos, existían cámaras frigoríficas y, en distintas publicaciones, aparecían artículos de divulgación sobre la conservación frigorífica de alimentos (Balaguer), sobre producción de frío (Alcover), sobre técnica frigorífica (Echegaray) y sobre aplicaciones del frío (Guillén-García).

El propio Guillén-García fue el primero que percibió la importancia de la enseñanza del frío en España. En el año 1912, ya escribía: «Por lo expuesto se ve claramente la necesidad de divulgar las numerosas aplicaciones de las bajas temperaturas y cuán necesario es que se enseñen en las escuelas industriales, sobre todo en las escuelas de ingenieros». Repitiendo esta idea dos años más tarde (1914): «Para conocer bien las aplicaciones del frío se necesita un curso; su estudio es vastísimo, y no tardaremos mucho en que las Escuelas Industriales se verán obligadas a dar a conocer el frío como lo exigen las grandes industrias establecidas» [3].

Bien es cierto que el campo de la tecnología frigorífica es, tal y como nos recordaba Guillén-García, vastísimo, por lo que sería una tarea de dimensiones incalculables ejecutar un proyecto que abarcara toda esta tecnología.

Este trabajo, que aunque se apoya y usa como referencia toda esta historia, se centra en el estudio, más que de la producción de frío, de la disipación de calor. Y más concretamente, de la disipación de este calor a través de un fenómeno específico, el de enfriamiento nocturno; y de su aplicación a los sistemas de enfriamiento en centrales de producción de potencia eléctrica que usen el ciclo de vapor.

Por consiguiente, se hará previamente una explicación breve por un lado, de los sistemas de enfriamiento históricamente más utilizados en este tipo de centrales, denominados como «Sistemas Clásicos de Enfriamiento»; y por otro, dado que el enfriamiento nocturno es una manera pasiva de cesión de calor, de los sistemas pasivos de enfriamiento calificados como «Otras Técnicas Disipativas».

2.1.1 Sistemas clásicos de enfriamiento

En una central de producción de potencia eléctrica que utilice el ciclo de vapor, el condensador juega un papel esencial para el correcto funcionamiento de la misma y determinante en cuanto al rendimiento del propio ciclo.

A su vez, el condensador, cuya función principal es la de condensar el vapor de salida de la turbina, necesita de un sistema de enfriamiento para que a través de este, se evacúe el calor producido en dicha condensación. Es por tanto, que el adecuado diseño, en cada caso, del sistema de enfriamiento es de similar importancia al del condensador mismo.

Cabe decir, que la elección del tipo de sistema de refrigeración usado en una estación térmica esta íntimamente ligado a la localización de la planta, a la disponibilidad de agua para propósitos de enfriamiento, e incluso también al impacto ambiental que pudieran causar dichos sistemas. No obstante, los sistemas de enfriamiento que más han sido utilizados desde que este tipo de centrales industriales comenzara su actividad, podrían clasificarse en los siguientes grupos:

- 1) Sistemas de enfriamiento por agua de ciclo abierto
- 2) Sistemas de enfriamiento húmedo de ciclo cerrado
- 3) Sistemas de enfriamiento seco de ciclo cerrado
- 4) Sistemas híbridos húmedo/seco

Sistemas de enfriamiento por agua de ciclo abierto

Los sistemas de ciclo abierto necesitan disponer de grandes volúmenes de agua tales como mares, lagos, embalses o grandes ríos, que tienen la capacidad de disipar el calor evacuado en el ciclo de vapor. En este tipo de sistemas, el agua es bombeada desde estos focos de enfriamiento, para posteriormente pasar a través del condensador y ser descargada de nuevo a la fuente pero en otro punto, lejos del de succión, con objeto de evitar que el calor transferido al agua pueda volver a entrar en el ciclo.

Los sistemas de enfriamiento que usan lagos, embalses o grandes balsas difieren un poco de los verdaderos sistemas abiertos ya que al tratarse de agua relativamente

estática, la temperatura del volumen en cuestión se verá incrementada debido a la recirculación de agua caliente, especialmente en el periodo estival.

Tradicionalmente, para solucionar esta contrariedad en este tipo de tecnología, se han usado torres de refrigeración auxiliares que ayuden a bajar la temperatura de devolución de agua a la fuente, de manera que esta no supere el punto máximo para el que el circuito de refrigeración trabaja correctamente. Este caso, concretamente, es uno de los que objetivos en que se centra el estudio, ya que con el enfriamiento nocturno, este problema podría ser resuelto o altamente mitigado, sin necesidad de apoyarse en torres de refrigeración auxiliares.

Sistemas de enfriamiento húmedo de ciclo cerrado

Aquí, a diferencia de los anteriores, el calor evacuado en el condensador es transferido únicamente al circuito de refrigeración. Este calor sobrante es posteriormente descargado a la atmósfera a través de la torre de refrigeración.

El enfriamiento que experimenta el agua en su paso por la torre de refrigeración se basa en la transmisión combinada de masa y calor al aire que circula por el interior de la torre.

Es cierto que las torres de refrigeración ofrecen muy buen comportamiento y han sido y son ampliamente usadas en los sistemas de refrigeración que usan agua como medio disipativo. No obstante, cabe destacar que en condiciones normales de operación, se producen una serie de inconvenientes sobre el agua de circulación o refrigeración, tales como la evaporación de parte del agua, las pérdidas debidas al arrastre de gotas del aire saliente y los ciclos de concentración que se dan como consecuencia del agua de reposición. Esto es también, parte del alcance de nuestro estudio, ya que el enfriamiento nocturno no sufre ninguno de estos inconvenientes.

Sistemas de enfriamiento seco de ciclo cerrado

En este tipo de sistemas, el calor evacuado en el condensador hacia el ambiente se consigue a través de un sistema refrigeración por aire, de manera que este calor se

disipa calentando la corriente de aire. Los sistemas secos pueden ser de dos tipos: directos e indirectos. Los sistemas directos conducen el vapor dentro de condensadores refrigerados por aire, que pueden ser igualmente de tiro mecánico o de tiro natural [26].

Por otra parte, los sistemas indirectos condensan el vapor en condensadores de superficie enfriados por agua, desde los que el agua calentada es bombeada a intercambiadores de calor refrigerados por aire, donde es enfriada y luego recirculada al condensador de vapor [26].

Sistemas híbridos de enfriamiento húmedo/seco

Los sistemas híbridos emplean una combinación de las tecnologías de enfriamiento húmedo y seco. Los dos principales tipos de sistemas híbridos son los diseñados para la conservación de agua y disminución de la columna de aire caliente [26].

Los sistemas de conservación de agua están orientados a reducir, que no eliminar completamente, el uso de agua para disipar el calor evacuado de una planta. Una parte limitada de agua es usada durante los periodos más calurosos del año para mitigar las grandes pérdidas en el rendimiento del ciclo de vapor y en la eficiencia de la planta asociadas a la operación con sistemas totalmente secos. A continuación, se representa un modelo de estos sistemas híbridos para la conservación de agua:

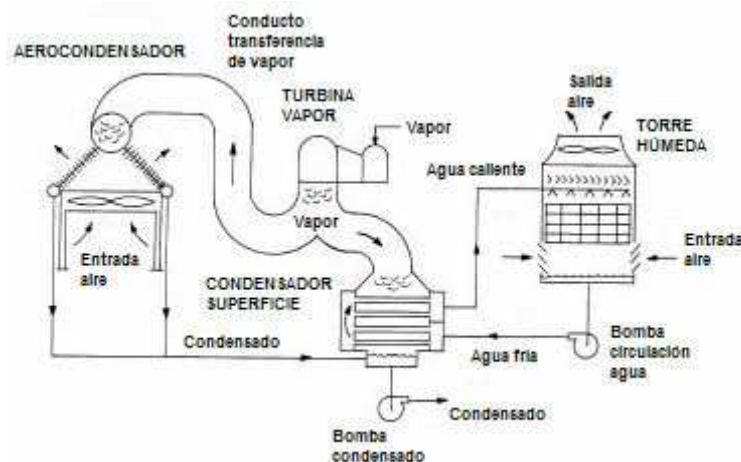


Figura 1. Sistema híbrido de conservación de agua [26]

Por otro lado, las torres de disminución de columna de aire caliente son esencialmente sistemas cien por cien húmedos que desarrollan una pequeña parte de enfriamiento seco para secar, o deshumidificar, la columna de aire caliente de salida durante los periodos fríos, de humedad alta que es cuando las columnas llegan a ser realmente visibles [26]. En la figura 2 podemos observar un ejemplo de este tipo de tecnología:

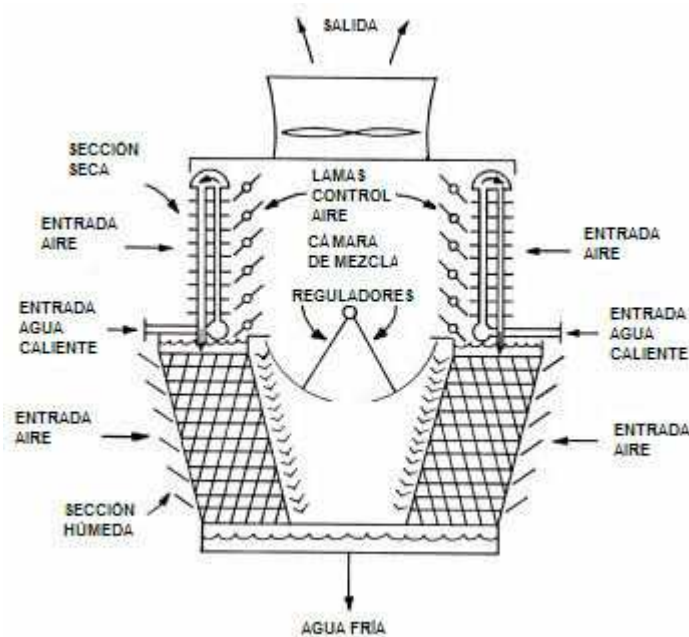


Figura 2. Torres de disminución de columna de aire saliente [26]

Un ejemplo de sistema híbrido de enfriamiento y que constituye una tecnología alternativa es el denominado condensador evaporativo. Este condensador, que ha sido ampliamente utilizado en procesos químicos y recientemente ha sido considerado para su aplicación en plantas de potencia, se denomina también aerocondensador de superficie húmeda [26].

El equipo es por lo general diseñado para operar en el modo cien por cien húmedo, donde el agua no sea un factor limitador de manera que se pueda obtener el mayor aprovechamiento de la evaporación del agua de recirculación obteniendo el máximo enfriamiento. Si la conservación de agua se convirtiere en un objetivo, la unidad podría ser diseñada para un consumo del 50% del consumo básico anual. Por debajo de este valor, dicha tecnología pierde parte de su fiabilidad, por lo que su aplicación en el

modo seco no sería viable. Para un mejor entendimiento de esta tecnología se adjunta el siguiente esquema:

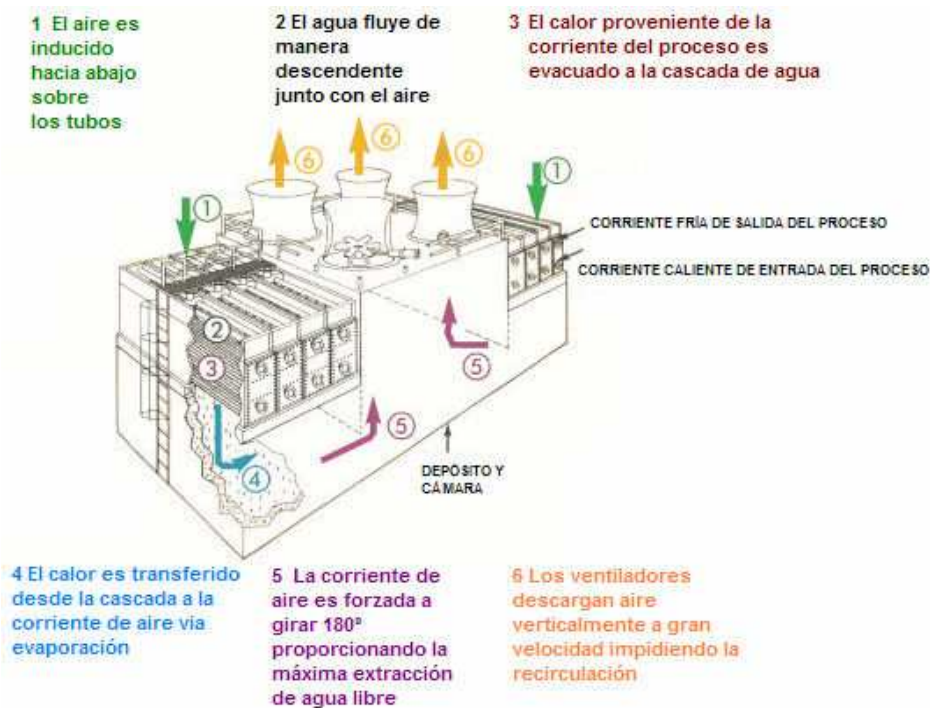


Figura 3. Condensador evaporativo [26]

2.1.2 Otras técnicas disipativas

Al inicio de este capítulo, se certificó lo amplio que es el campo de la producción de frío y el de la disipación de calor. Pues bien, acotando dentro de este vasto campo y en dirección a su posible aplicación a las plantas de producción de potencia, encontramos un fenómeno clave llamado enfriamiento pasivo.

El enfriamiento pasivo se define como la transferencia de calor desde un medio caliente a otro frío, menos caliente, de una manera completamente natural, es decir, sin requerimientos energéticos convencionales. El medio frío constituye un “pozo térmico” hacia donde la energía es transferida sin representar esto un incremento sensible de su temperatura. Es por lo que en el campo de las aplicaciones térmicas de las energías renovables, donde el uso racional de energía es esencial, el empleo de estos sistemas representa una gran posibilidad.

Los “pozos térmicos” que conseguimos en la naturaleza pueden ser: el suelo, el aire, el agua y el cielo. Por consiguiente, se puede decir que existen, a grandes rasgos, cuatro tipos o mecanismos de enfriamiento pasivo: conductivo, convectivo, evaporativo y radiante, respectivamente.

Cada uno de ellos puede ser utilizado en fuerte dependencia de las condiciones climáticas del lugar. Es por esta razón que en cada lugar o región son diferentes los potenciales disponibles por tipo de enfriamiento pasivo.

El uso de sistemas pasivos de enfriamiento ha sido ampliamente estudiado y aplicado a la refrigeración de edificios, especialmente. Por lo tanto, en lo que sigue, se usarán, con objeto de ser más ilustrativo, las experiencias que sobre las edificaciones se tienen a este respecto, si bien es cierto que el alcance del enfriamiento pasivo excede, y mucho, de ser tan sólo aplicada a estas.

Una clasificación más completa de los mencionados sistemas, así como de sus opciones y aplicaciones, también a cerca de la refrigeración de edificios, fue hecha por B. Givoni en su artículo “Options and Applications of Passive Cooling” [6]. En éste, el autor clasifica el enfriamiento pasivo según los principales mecanismos de transferencia de calor en función de los distintos sumideros de calor naturales, anteriormente denominados como “pozos térmicos”, que para ser más exactos son: el aire ambiente, el vapor de agua ambiental, el cielo y el subsuelo terrestre. Dichos mecanismos son:

- (1) Enfriamiento convectivo por ventilación nocturna
- (2) Enfriamiento evaporativo
- (3) Enfriamiento nocturno por radiación
- (4) La Tierra como una fuente de enfriamiento

Enfriamiento convectivo por ventilación nocturna

La refrigeración de un edificio a través del aire nocturno, en lugares con temperaturas nocturnas suficientemente bajas, y almacenar este aire, pasiva o activamente para refrescar el mismo edificio durante el día siguiente, es el concepto más simple de enfriamiento por medios naturales. Cuando un edificio es ventilado por la

noche, la masa estructural es enfriada por convección desde el interior. Durante el día, la masa estructural enfriada puede servir como sumidero para absorber el calor que poco a poco va ganando el edificio.

En regiones templadas, donde las temperaturas ambiente nocturnas en verano están por debajo del rango de confort humano (unos 20 °C), es posible almacenar dicho frescor procedente del aire de la noche no sólo en la masa del edificio, sino también en una especie de almacén específico a este efecto. Sin embargo, en regiones áridas será posiblemente necesario preenfriar el aire ambiente por evaporación. Este efecto será visto un poco más adelante.

Según los estudios hechos en Israel por Givoni, la conclusión es que la ventilación nocturna de edificios y el consiguiente almacenamiento de frío en sus materiales estructurales, puede mantener la temperatura interna del edificio durante el día sobre un 15% por debajo de la temperatura exterior [6].

Enfriamiento evaporativo

La refrigeración de edificios utilizando la energía consumida por la evaporación del agua puede ser llevada a cabo de dos maneras: directa o indirectamente [6].

La refrigeración evaporativa directa consiste en hacer circular una corriente de aire en contacto con una masa de agua, de modo que la evaporación del agua produce una disminución de las temperaturas de ambos. Este aire enfriado y humidificado se introduce posteriormente en el edificio y contribuye a refrescarlo. La temperatura menor que puede alcanzarse por este procedimiento es igual a la temperatura de rocío del aire, que varía en función de la humedad relativa del aire: cuanto menor sea ésta, menor será la primera.

El enfriamiento indirecto se da por evaporación en un elemento dado del edificio, que entonces sirve como sumidero de calor y absorbe el que entra a través de su contorno o el que se genera interiormente. Una característica esencial de este sistema es que no eleva el contenido de vapor del aire del interior del edificio para disminuir su temperatura.

La técnica de la refrigeración pasiva evaporativa puede materializarse de muy diversas formas: estanques y fuentes interiores o en patios, cubiertas inundadas, aspersión de agua en las cubiertas, etc [23].

Enfriamiento nocturno por radiación

Cualquier superficie sobre la Tierra que “mire” al cielo experimenta un flujo de cesión de calor radiante durante la noche.

Esta cesión de calor no sólo depende de este flujo saliente de calor, sino también del intercambio por convección entre la superficie radiante y el aire del ambiente. Este intercambio de calor puede ser favorable o contrario al enfriamiento. Dependerá de si la temperatura ambiente es o no, superior a la de la mencionada superficie. En caso de que así sea, la convección será del aire exterior hacia el radiador, por lo que contrarrestará en parte el calor cedido por radiación; en caso contrario, ayudará a la potencialidad del enfriamiento.

La esencia de esta cesión de calor por radiación es que la transmitancia de la atmósfera es bastante alta cuando se emite a largas longitudes de onda. Y la Tierra por la noche emite en el infrarrojo de larga longitud de onda. Es por tanto, que en noches despejadas y en climas generalmente secos, este fenómeno encuentra el óptimo de su utilidad.

Para la utilización de la cesión de calor por radiación de onda larga en edificios, encontramos dos situaciones posibles:

(1) Refrigeración nocturna directa de una masa de almacenamiento a enfriar (normalmente los techos), y protegerla durante el día de la radiación solar y del cálido aire que envuelve el edificio.

(2) Utilización de un radiador ligero especial y aislado para ser enfriado por debajo de la temperatura ambiente, y usarlo para enfriar un almacenamiento térmico específico o la masa estructural del edificio en sí.

Las construcciones con un patio interior, especialmente en los climas cálidos-secos, constituyen un ejemplo de aplicación de esta técnica. Durante la noche, los patios y las construcciones que los rodean ceden calor hacia el firmamento por radiación, enfriándose y originándose una bolsa de aire enfriado que contribuye a refrescar el propio patio y las estancias que lo rodean.

Las *cubiertas inundadas* representan un sistema de cesión de calor que engloba al mismo tiempo enfriamiento evaporativo indirecto y nocturno por radiación.

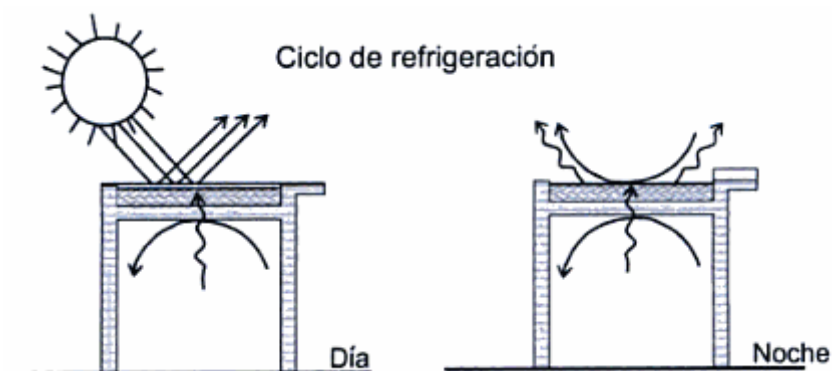


Figura 4. Utilización de cubiertas inundadas para enfriar [23]

El estanque situado en el techo, actúa como un foco de enfriamiento por radiación y convección para el espacio que tiene bajo él. La refrigeración resulta más eficaz si el agua no está encerrada y puede evaporarse. Es por lo que durante la noche, se retira la cubierta impermeable y el agua se enfría (por radiación nocturna y refrigeración evaporativa), absorbiendo calor del edificio. El propio Givoni demuestra en sus estudios que estos dos mecanismos son independientes [6], por lo que la utilización conjunta de ambos puede ser efectuada para potenciar el refrescamiento interior de edificio. Durante el día, se cubre la masa de agua con una protección, siendo aconsejable que esta actúe también como aislante térmico a fin de minimizar el calentamiento diurno del agua. Este sistema de refrigeración resulta efectivo en climas cálidos y secos con noches claras.

La Tierra como fuente de enfriamiento

Por último, nos encontramos los nombrados *sistemas de intercambio térmico con el terreno o intercambiadores geotérmicos*, que pueden utilizarse tanto para refrigerar

como para calentar según la época del año de que se trate, y que utilizan el terreno como fuente o sumidero de calor.

Estos sistemas radican en que la diferencia de temperaturas existente entre el aire y el terreno se mantiene bastante uniforme a lo largo del año, siendo inferior a la temperatura del aire en verano y superior en invierno, especialmente a varios metros de profundidad.

De este modo, un edificio que esté integrado completamente en el subsuelo, se verá directamente beneficiado por el calentamiento de la tierra que lo rodea en invierno y por el enfriamiento de la misma en verano.

Otro modo de usar el subsuelo sería, haciendo circular aire por el interior de un conducto enterrado en el terreno una longitud suficiente para que se produzca un enfriamiento o calentamiento del aire, según sea la época del año. El aire puede hacerse circular mediante convección natural (sistemas pasivos) o mediante convección forzada, con la asistencia de ventiladores o turbinas (sistemas activos) [23].

2.2 CLASIFICACIÓN DE CONTENIDOS

Ya se citó al inicio de este capítulo, que para el desarrollo de este proyecto fin de carrera ha sido preciso realizar un gran trabajo de documentación acerca del fenómeno de enfriamiento nocturno.

Muchos han sido los artículos publicados al respecto, aunque también son muchos los enfoques, los alcances y los objetivos de cada uno de ellos. Pues bien, llegados a este punto y tras hacer un pormenorizado análisis de los trabajos publicados, se hace necesario realizar un sumario de los mismos que los divida en función de su naturaleza. Por tanto, clasificaremos los citados trabajos según:

- 1) Modelado y/o simulaciones
- 2) Dispositivos experimentales
- 3) Materiales

2.2.1 Modelado y/o simulaciones

Las ventajas que ofrecen el modelado y la simulación en cualquier campo de investigación han hecho que estos sean ampliamente trabajados en aspectos relacionados con el enfriamiento radiante.

Pérez y colaboradores (1998) han comparado el desempeño de los modelos que calculan la emisividad del cielo, basados en la distribución vertical de la temperatura y el contenido de vapor de agua, logrando mejorar su precisión [21]. Fang (2003), ha desarrollado una ecuación que determina la temperatura óptima y la emisión de radiación por un cuerpo negro para un cierto intervalo de longitud de onda [21]. Esta información es fundamental en la evaluación de la radiación infrarroja emitida.

El modelado de dispositivos de aplicación es un tema que se aborda con frecuencia. Al-Nimr (1998) y Haddad (2000), proponen un sistema mejorado de destilación de agua, mediante la incorporación de un mecanismo de enfriamiento radiante compuesto por un panel radiante y un tanque empacado de almacenamiento. En su modelo matemático incorporan en el desempeño del destilador diferentes datos climáticos, como la temperatura ambiente, la efectiva del cielo, radiación solar incidente, etc., así como las condiciones de operación [15]. El mismo Al-Nimr junto con otros colaboradores (1999) realizaron otro modelo matemático que describe un sistema de enfriamiento mejorado con la incorporación de un almacén de frío que irradia en el infrarrojo hacia la atmósfera durante la noche. El modelo predice la variación de la temperatura del sistema [18].

Precisando un poco más, el campo de la climatización de edificios o viviendas a través del fenómeno de enfriamiento nocturno también ha sido objeto de estudio y simulación. Sin ir más lejos, Balen, Soldo y Kennedy (2003) realizaron un interesante análisis de un sistema simultáneo de calentamiento y enfriamiento de agua con colectores solares de placa plana [22].

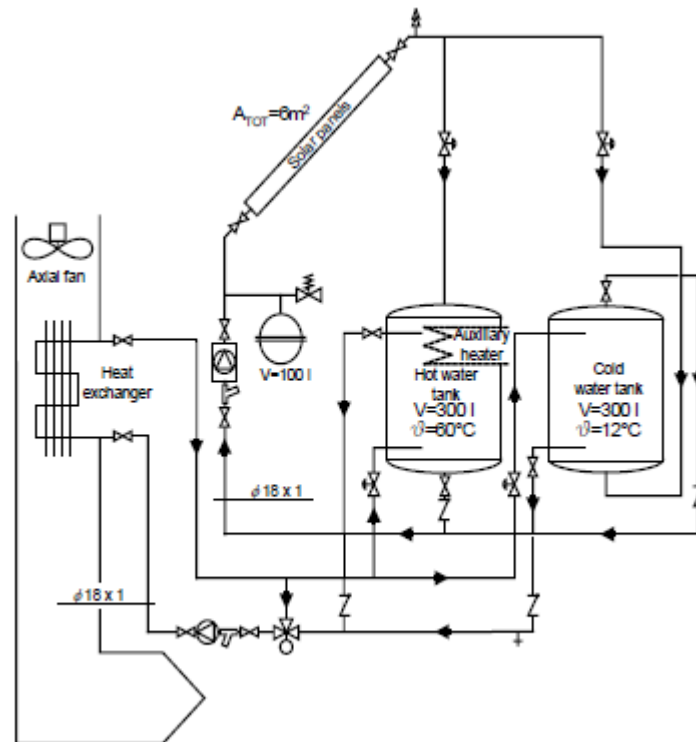


Figura 5. Mecanismo de simulación del sistema de climatización [22]

Dicho sistema aprovecharía la radiación solar durante el día para el primer propósito, y la emisión nocturna de dichos colectores durante la noche para el segundo. Tanto el agua caliente como el agua fría se almacenarían en depósitos separados para su almacenamiento, regulación y uso. El agua almacenada en los tanques, se conectaría a un intercambiador de calor agua-aire para el suministro de la climatización requerida en cada momento.

Otro ejemplo de modelos basados en el enfriamiento nocturno y aplicado a climatización podemos encontrarlo en Parker (2005). Éste, antes del montaje de su posterior prototipo experimental, hizo una profunda evaluación teórica del concepto de enfriamiento nocturno y desarrolló un modelo de previsión para dicho enfriamiento teniendo en cuenta aspectos como el punto de rocío, las características espectrales de la emisividad, el factor de visión, la nubosidad, la velocidad y temperatura del aire o la eficiencia de los dispositivos propuestos en el modelo [24].

Por otra parte, la utilización del enfriamiento radiante en edificaciones también es un tema de interés. De hecho, Erell (2000) estudia un modelo de enfriamiento nocturno infrarrojo en el que considera las características de diseño del radiador, las condiciones ambientales y la forma de operación del radiador de placa plana que circula agua en su interior [21].

Por último, y relacionando el título de este apartado con aplicaciones a plantas de producción de potencia termosolares, cabe destacar el proyecto fin de carrera realizado por Sánchez (2007). Aquí, el autor estudia la viabilidad e implantación de un sistema de refrigeración del condensador de una planta termosolar basado en el enfriamiento nocturno [26]. Lo hace a través de la simulación de un modelo energético desarrollado por él mismo y concerniente a dicho sistema apoyado en datos de partida suministrados por una planta termosolar concreta. Este estudio parte de la necesidad de enfriar el agua de una balsa que se calienta por encima del punto máximo admitido para la refrigeración del condensador, debido a la reutilización de esta agua en el ciclo de refrigeración, inutilizando la balsa como fuente para la disipación de calor requerida. Se muestra a continuación un esquema del diseño simulado:

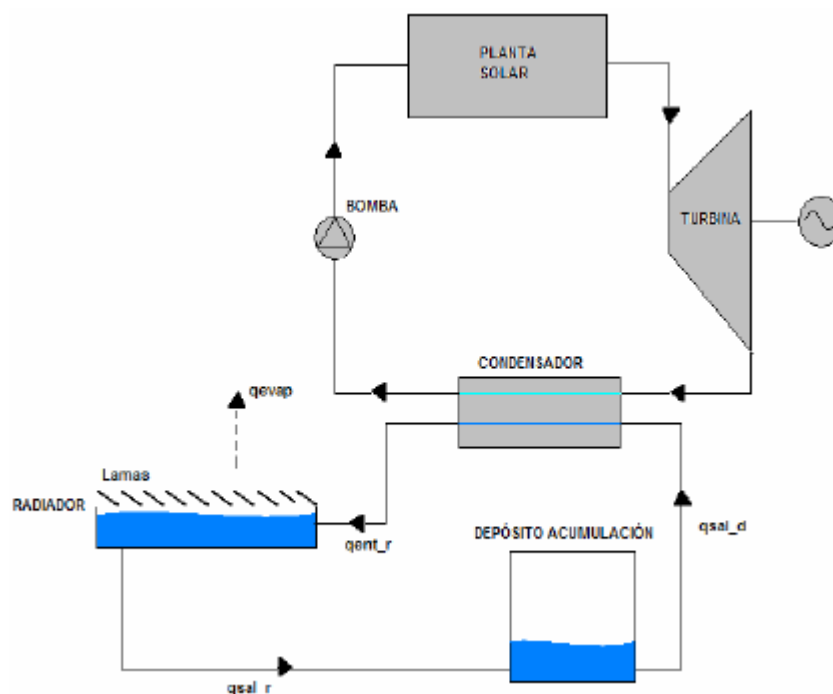


Figura 6. Esquema de la tecnología de refrigeración del condensador con radiador [26]

2.2.2 Dispositivos experimentales

En un segundo grupo de trabajos se encuentran la construcción y operación de distintos dispositivos experimentales, así como la valoración de los resultados aportados por los mismos.

Por ejemplo, Meir (1999), realizó un experimento en el que investigó el potencial de enfriamiento radiante de un dispositivo hecho a base de polímeros [21]. Éste forma parte de un sistema de calefacción doméstico. En su trabajo reporta una temperatura de 5 a 7 °C por debajo de la ambiente durante el transcurso de la prueba. La potencia de enfriamiento que calculó, bajo condiciones favorables, fue de 40 W/m².

En otro contexto, Saitoh (1997), propone un ingenioso sistema con el cual pretende disminuir el efecto de “islas de calor” en zonas urbanas. El sistema está compuesto de un almacén que contiene cápsulas esféricas rellenas de Na₂SO₄–10H₂O cuya temperatura de fusión es de 8 °C [21]. Éstas se funden al recibir el calor rechazado por un sistema de climatización convencional de compresión, almacenándose el calor. Durante la noche, un radiador infrarrojo ubicado en el exterior del edificio enfría agua que se bombea hacia el almacén para retirar el calor almacenado en las cápsulas. El equipo ha sido probado en varias ciudades japonesas, encontrando resultados satisfactorios.

En Taiwán, Shyu-Min (1995) probó un equipo de acondicionamiento de aire basado en varios subsistemas: deshumidificación del aire en un lecho de gel de sílice, enfriamiento del aire mediante un enfriador radiante nocturno, regeneración del lecho con radiación solar durante el día, humidificación y enfriamiento del aire [21]. El autor reporta que el sistema funcionó muy bien y permitió suministrar aire acondicionado las 24 horas del día.

No se ha querido profundizar más en este subapartado por considerar que los dispositivos experimentales de mayor similitud a los reportados en este proyecto o de apoyo al fundamento teórico posteriormente desarrollado, son de tal relevancia que han de ser estos explicitados en un apartado mayor. Dicho esto, pueden tomarse los párrafos contenidos en este subapartado, como una introducción al tercer punto de este capítulo, que es donde se desarrollan, tal y como se acaba de comentar, con más detalle los artículos a los que se ha dado mayor significación.

2.2.3 Materiales

Hay un tercer grupo de trabajos orientados al estudio de los materiales que se utilizan en la construcción de enfriadores radiantes nocturnos. En lo que sigue, se citan algunos ejemplos de los mismos.

A los materiales que facilitan el enfriamiento radiactivo en el infrarrojo y absorben menos la radiación solar se les denominan superficies selectivas frías. Orel y otros copartícipes (1993) estudiaron la eficiencia del enfriamiento radiante de pinturas blancas pigmentadas [9]. Éste realizó medidas de temperatura nocturnas de varios radiadores infrarrojos selectivos para comprobar y diferenciar sus rendimientos. Las superficies radiantes fueron preparadas aplicándoseles diferentes tipos de pinturas con sustratos de aluminio. Quedó demostrado que la adición de BaSO_4 en la pintura incrementa el rendimiento enfriador de los radiadores.

Kiklasson (1995) estudió el empleo de hojas de polietileno pigmentadas con ZnS , ZnSe , TiO_2 , ZrO_2 y ZnO [21]. Encontraron que la cubierta pigmentada con ZnS se enfriaba muy bien, con una reflectividad solar de 0,849.

Hamza (1998) estudió el efecto de la edad, espesor y color de las películas delgadas de polietileno empleados en enfriadores [14]. Midió la transmitancia de películas de polietileno aplicadas sobre paneles de distintos grosores para 5, 30 y 100 días de trabajo de un dispositivo de enfriamiento. Sus resultados muestran que el “envejecimiento” del polietileno origina una disminución de la transparencia de la película en el intervalo de interés de 8 a 13 μm , lo cual implica una disminución de su potencia de enfriamiento hasta del 33%. La disminución del espesor de 50 a 25 μm mejora la transmitancia de la película y un incremento de casi 9% de la potencia de emisión del dispositivo. También demostró que el color de la película de polietileno no tenía un efecto significativo sobre sus propiedades ópticas, y consecuentemente, sobre el rendimiento del enfriamiento nocturno de la unidad.

Tanemura y sus colaboradores (1999), midieron la reflectividad espectral hemisférica de varias pinturas blancas comerciales en el intervalo de longitud de onda de 0,25 a 25 μm , encontrando una gran variedad en función de la calidad y composición de la pintura [21].

2.3 APLICACIONES

Una vez finalizada la clasificación de contenidos de los artículos considerados para la ejecución de este estudio, se procederá a relatar, tal y como se comentó anteriormente, de una manera más detallada, las aplicaciones de los trabajos que han tenido un peso específico mayor en dicha ejecución.

Adicionalmente se recuerda y se matiza que por ser este proyecto de fin de carrera concretamente un proyecto experimental, se ha estimado explicitar sólo aquellos trabajos que también se hayan apoyado en datos aportados por dispositivos experimentales, y que además guarden una cierta similitud con el mismo.

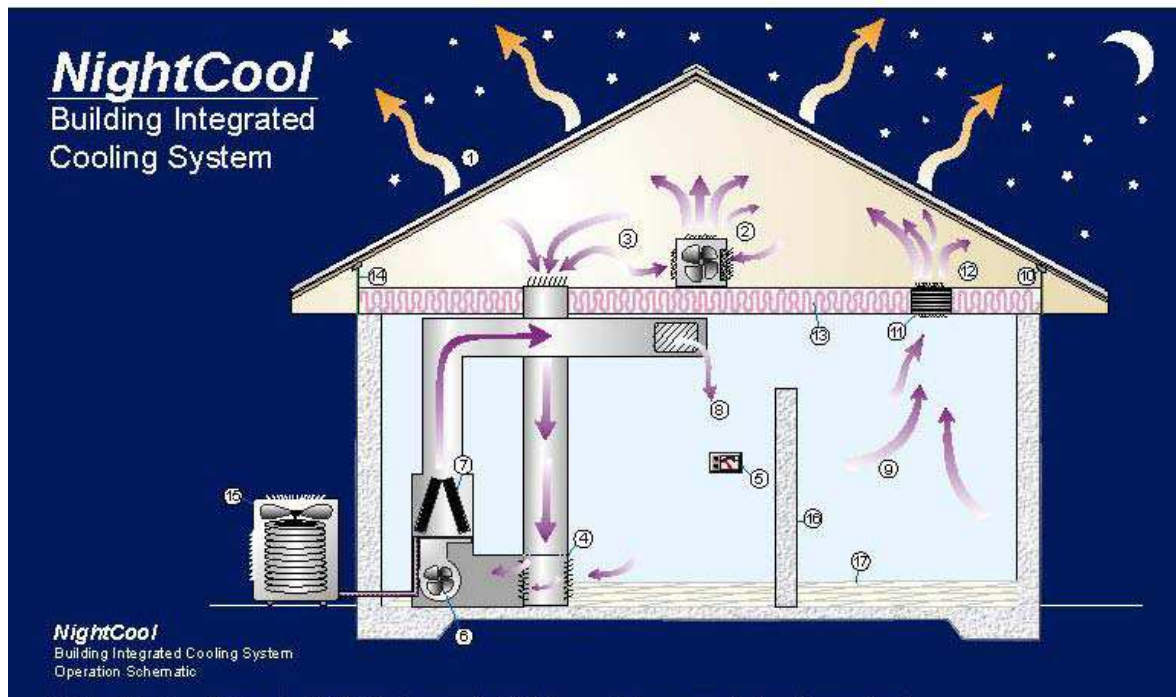
2.3.1 Nightcool: concepto de enfriamiento nocturno por radiación

Este fue el prototipo experimental desarrollado por D. Parker y sus colaboradores [27], tras una primera publicación en la que propuso una simulación de este posterior experimento, tal y como se comentó previamente. Dicho prototipo está enfocado a la climatización de viviendas usando el enfriamiento nocturno como medio de conseguirlo.

Se trata de un sistema innovador que consiste en un ático precintado cubierto por un techo metálico altamente conductor que hace las veces de radiador integrado, para proporcionar frío a la masa de aire del ático que posteriormente será conducida al interior de la casa.

Durante el día, ya que el concepto en sí no tiene sentido alguno, la zona principal, es decir, el interior de la casa, es desacoplada del ático.

Durante la noche, cuando la superficie interior del techo metálico cae dos grados por debajo de la consigna indicada por el termostato, el aire de retorno que volvía durante el día por el sistema de aire convencional (punto 4 del dibujo), es ahora canalizado a través del ático (puntos 11 y 3 del dibujo), debido a que se cierra automáticamente la vía de retorno directa (punto 4 del dibujo). El aire caliente del interior de la casa se enfría en la zona interna de los paneles metálicos que conforman el techo, que entonces irradia hacia el cielo nocturno el calor que entra con dicho aire.



1. White metal roof on metal battens (no decking). Both sides are surfaced for high emissivity. A temperature probe measures roof underside temperature.
2. Small capacity dehumidifier (such as *Whirlpool AD40DBK*); operates only during evening hours when thermostat and roof temperature monitor calls for cooling and attic relative humidity is greater than 55%.
3. Baffled inlet frill from attic for nighttime operation.
4. Room return inlet (for daytime operation). Closed by damper at night when temperature conditions are met.
5. Thermostat (compares roof surface temperature and setting to determine vapor compression vs. nighttime cooling operation).
6. Variable speed air handler fan with electronically commutated motor.
7. Vapor compression air conditioner cooling coil.
8. Interior duct system with supply outlet.
9. Interior room air return to attic during evening hours when Night Cool is activated.
10. Roofline drip collection system with drain.
11. Ceiling return for *NightCool* operation mode.
12. Attic air connects to cool roof for nocturnal cooling
13. R-30 ceiling insulation.
14. Sealed attic construction with top plate baffles.
15. Air conditioner outdoor unit (condenser).
16. Concrete interior walls (thermal mass for sensible cool storage).
17. Tile floor (add thermal mass).

Figura 7. Esquema del dispositivo “Nightcool Concept”

Por otro lado, la ganancia de calor durante las horas de sol es mínima debido al metal blanco altamente reflectivo del que está hecho el techo. Durante este tiempo, la zona principal será enfriada convencionalmente con el sistema de aire acondicionado del que dispone el sistema completo.

Si se requiriese una refrigeración más intensa, se podrá variar el manipulador del ventilador de aire (punto 6 del dibujo), para incrementar así su velocidad y proporcionar un mayor enfriamiento. En caso de que la temperatura del interior de la casa no sea lo suficientemente fría durante la noche, el sistema estándar de aire acondicionado suplementa al de enfriamiento nocturno. Además, si se cumplen las condiciones de temperatura, pero no la de humedad relativa, el deshumificador entrará en acción.

Adicionalmente, los materiales de los que esta hecha la casa por dentro (losa de azulejos y muros internos de hormigón), almacenan frío sensible para reducir las necesidades de acondicionamiento de la casa al día siguiente.

El elemento esencial de la configuración que pone en liza este concepto es que, a diferencia de las cubiertas inundadas u otros sistemas, el aislamiento está instalado convencionalmente en el techo (punto 13 del dibujo).

El ahorro energético que este dispositivo presenta sobre una casa convencional está en una media del 15% durante los ocho meses en los que se estuvieron registrando medidas. Por lo que este concepto integrado representa una prometedora tecnología para casas de bajo consumo energético.

Se demuestra, tras los datos obtenidos, que este dispositivo trabaja de manera aceptable en otoño, primavera y gran parte del verano, proporcionando frío sensible.

El autor además, planea integrar en un futuro paneles fotovoltaicos en este concepto, para poder suministrar en un mismo modelo electricidad, enfriamiento nocturno y calefacción en las tardes invernales.

2.3.2 Análisis y verificación experimental de un radiador mejorado

Este apartado intenta explicar el modelo analítico y la verificación experimental que los científicos E. Erell e Y. Etzion [17] hicieron al mejorar un radiador de placa plana para su aplicación a procesos de enfriamiento en edificios.

El sistema de enfriamiento propuesto consistía en un estanque poco profundo de agua aislado del ambiente, y colectores de placa plana expuestos al cielo, a través de los cuales se hizo circular agua por la noche, para ser enfriada por radiación de onda larga y por convección. El objetivo de su estudio fue, esencialmente, maximizar el enfriamiento por unidad de área del radiador.

Primeramente, propusieron un modelo analítico que permitía el cálculo de la temperatura del fluido en cualquier punto dado de los tubos que componen el radiador,

parámetro esencial en su diseño para refrigeración. Sabiendo la temperatura del fluido, se puede predecir la capacidad de enfriamiento de tal radiador.

Para el diseño del radiador de placa plana, concluyeron, en base al modelo analítico previamente desarrollado, especialmente que: la distancia entre los tubos del radiador debe ser la mínima posible; y que conseguir que el fluido opere en turbulento comprende un mejor intercambio de calor entre este y las paredes de los tubos.

Ya que la capacidad de enfriamiento producida por este radiador depende absolutamente de la temperatura de su superficie, el sistema de enfriamiento en su conjunto debería ser diseñado teniendo en cuenta los siguientes factores:

- 1) La temperatura de entrada al radiador debería ser idealmente tan caliente como la parte más caliente del edificio a enfriar.
- 2) El caudal másico de agua debería ser controlado de manera que se consiga un perfil de temperaturas bastante uniforme a lo largo de los tubos, en orden a que la temperatura media de la superficie del radiador sea alta. Esto conlleva a un incremento del enfriamiento radiante, bajo cualquier condición ambiental.

Como referencia, se escogieron radiadores que habían sido mayormente utilizados para calentar agua de piscinas. Estos radiadores estaban hechos de tubos muy finos de polipropileno. Los tubos a su vez, estaban conectados a un colector de mayor diámetro y con poca separación entre ellos. Cabe destacar que la emisividad del polipropileno es aproximadamente un 0,95. Dadas estas características constructivas, se concluyó que su diseño era muy próximo a los que exige un radiador para enfriar. Por lo tanto, se tomaron dichos radiadores de placa plana y se mejoraron según los patrones citados en los dos párrafos anteriores.

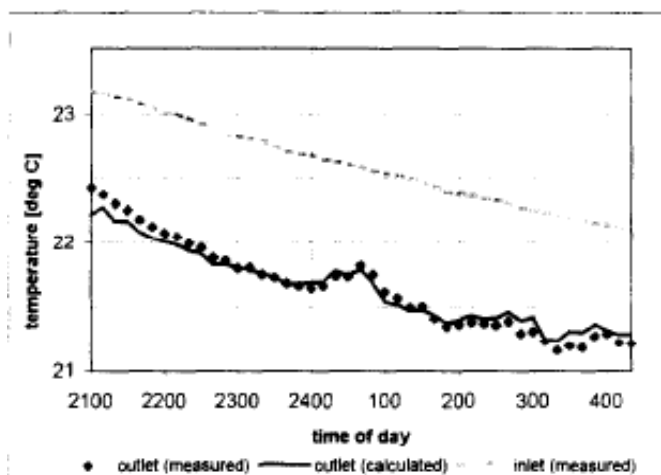
La temperatura del cielo, requerida para el cálculo de las pérdidas de calor por radiación, fue derivada de las medidas del radiómetro neto instalado *in situ*, en el propio desierto de Israel por los científicos anteriormente citados. A continuación se muestra una tabla con los datos registrados en dos meses bien diferenciados, y una gráfica que representa la evolución de las temperaturas, habiendo trabajado con un caudal de agua uniformemente alto:

Tabla 1. Datos registrados para el radiador mejorado entre las 21:00 y las 5:00 [17]

Table 1: Mean nightly cooling rates
(Figures in parentheses refer to the standard deviation)

Period	mean sky depression [deg C]	cooling rate [W/m ²]
July 8 - 14	12.2 (1.2)	91.4 (21.0)
Sept. 6 - 12	7.9 (2.0)	65.1 (15.4)

Fig. 1: Fluid temperature in the radiator on a clear night



Gráfica 1. Evolución de temperaturas en el radiador mejorado en una noche clara [17]

Se concluye por un lado, el buen comportamiento de este dispositivo en cuanto a calor irradiado y a depresión en la temperatura del agua; y por otro, que los radiadores diseñados específicamente para aplicaciones de enfriamiento nocturno por radiación difieren en pequeñas pero significantes maneras de los colectores de placa plana usados en sistemas de calentamiento de agua doméstico.

2.3.3 Enfriamiento por radiación de edificios con colectores solares

Aquí se expone lo que los investigadores E. Erell e Y. Etzion [20] concluyeron tras analizar y realizar pruebas a tres tipos de colectores solares de placa plana, convertidos en dispositivos para la refrigeración de edificios.

Éstos vuelven a usar un sistema de enfriamiento basado en recircular agua almacenada en estanques, a través de dichos colectores durante la noche, con objeto de enfriarla y de que sirva para que el edificio se refrigere.

Los citados investigadores adaptaron un modelo analítico, originalmente desarrollado para aplicaciones de calentamiento, a un dispositivo de enfriamiento nocturno por radiación de onda larga. La eficacia del modelo fue verificada sobre los datos experimentales registrados tras ensayar los tres tipos de radiadores.

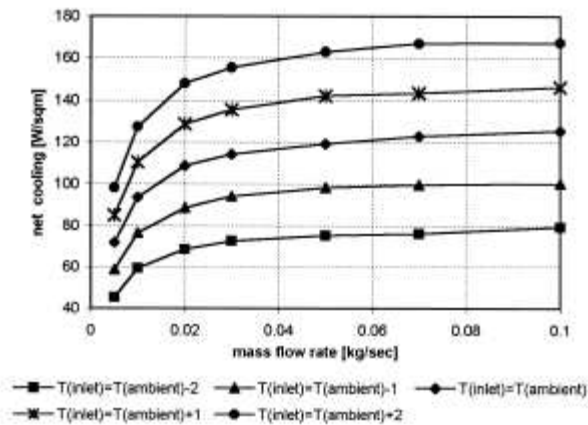
Los radiadores usados en este experimento están basados en colectores solares de placa plana utilizados para aplicaciones de calentamiento, y a los que se les extrae la cubierta de vidrio en orden en orden a adaptarlos a radiación en lugar de absorción.

Para la aplicación del modelo previamente estudiado, se tuvieron en cuenta las características de diseño del radiador, las condiciones ambientales y las condiciones de operación. En cuanto al diseño, se prestó especial atención al coeficiente de pérdida de calor del radiador y al factor de eficiencia de aleta. Para el cálculo del primero se consideraron las pérdidas térmicas del radiador por la parte de arriba (que depende de la convección externa y por tanto de la temperatura y velocidad del aire), por la de abajo (que depende de la conductividad del aislamiento) y por los lados (que es muy pequeña). Para el cálculo del segundo se tomó la geometría del propio aleteado.

En este modelo, se consideró la emisividad del cielo en función de la temperatura del punto de rocío, para poder así calcular la complicada temperatura de cielo. Aunque, para el cálculo de esta en cuanto al dispositivo experimental, se usó un radiómetro neto instalado *in situ*.

En cuanto a la importancia de las condiciones de operación, se estudiaron la influencia del caudal másico sobre la depresión de la temperatura entre la entrada y la salida del colector y la influencia de la temperatura de entrada en relación con el caudal másico de entrada sobre la potencia radiante. Con respecto a la primera influencia concluyeron que cuanto mayor es el caudal, menor es el salto de temperatura. Y con respecto a la segunda, dedujeron que a mayor temperatura de entrada para un mismo

flujo, la potencia de enfriamiento aumentaba, y que esta seguía aumentando si el propio flujo también crecía. Veámoslo mejor en esta gráfica:



Gráfica 2. Enfriamiento, temperatura de entrada al radiador y el caudal másico [20]

El montaje experimental consistió en probar la capacidad de enfriamiento de tres tipos de radiadores: A, B y C. Se detallan, en lo que sigue, sus características:

a) Radiador tipo A: colector Lordan LSC-F, con doce tubos finos de cobre unidos a un colector, también de cobre, de mayor diámetro. Cada tubo fino es instalado en el centro y a lo largo del eje de una delgada placa de acero inoxidable que era usada como absorbedor solar. La parte inferior del colector estaba encofrada en una espuma aislante de poliuretano cubierta con una lámina de aluminio reflectiva.

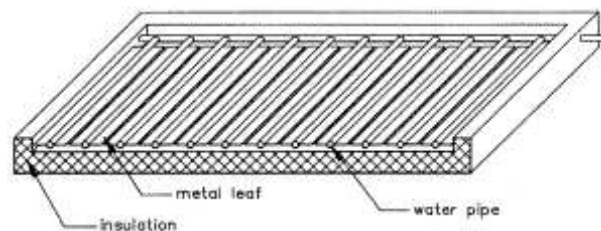
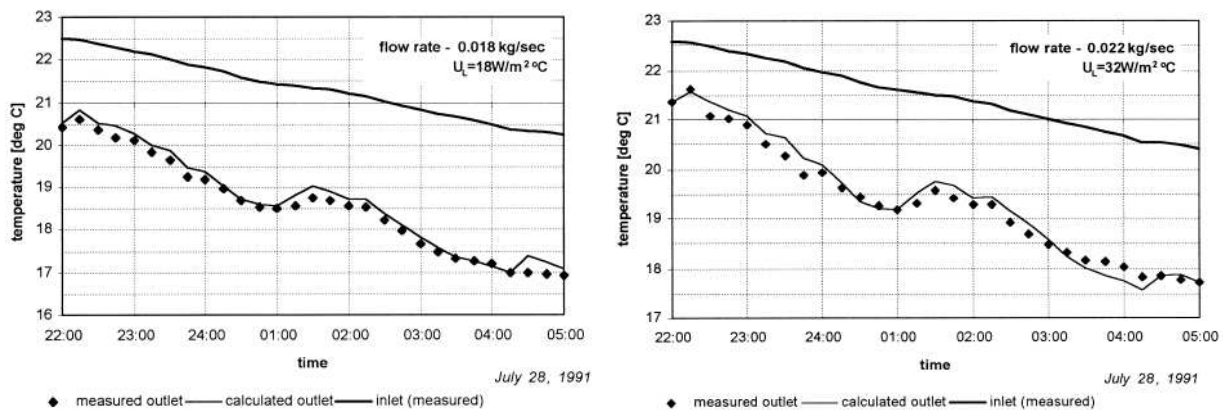


Figura 8. Sección axonométrica del radiador tipo A

b) Radiador tipo B: igual que el anterior, pero extrayéndosele el aislamiento de poliuretano que tenía en la parte inferior. Este colector está pues, expuesto a intercambio por convección y radiación por ambos lados, el inferior y el superior.

c) Radiador tipo C: colector Chromagen CR-12, similar al tipo A, pero sustituyendo las placas delgadas metálicas sobre los tubos finos por aletas de aluminio perpendiculares al contorno de estos. A este colector, también se le quitó el aislamiento inferior para maximizar el intercambio de calor por convección.



Gráfica 3. Evolución de las temperaturas de los radiadores tipo B y C

De entre las conclusiones que se obtuvieron, cabe destacar el buen resultado de estos colectores metálicos como enfriadores nocturnos y que los radiadores aleteados no mejoran la eficiencia de aquellos que sólo usan tubos bajo delgadas láminas de metal.

2.3.4 Investigación del enfriamiento nocturno bajo clima tropical

En este trabajo, ejecutado por J. Khedari y otros [19], se discute la viabilidad de la refrigeración mediante radiación nocturna bajo un clima cálido y húmedo, aplicada a edificios. Cuatro tipos de radiadores, hechos de materiales similares, fueron probados bajo tres condiciones de cielo: claro, nublado y lluvioso. A continuación se representan y especifican las cuatro configuraciones para el radiador:

- Radiador tipo A: con lámina metálica plana de Zinc pintada de blanco sobre tejas Monier CPAC. Emisividad del 0,9.
- Radiador tipo B: con tejas Monier CPAC pintadas de blanco. Emisividad: 0,94.
- Radiador tipo C: con tejas Monier CPAC simples. Emisividad igual a 0,93.

d) Radiador tipo D: con lámina metálica de Zinc corrugada pintada de blanco sobre tabla de yeso y tejas Monier CPAC. Emisividad del 0,89.

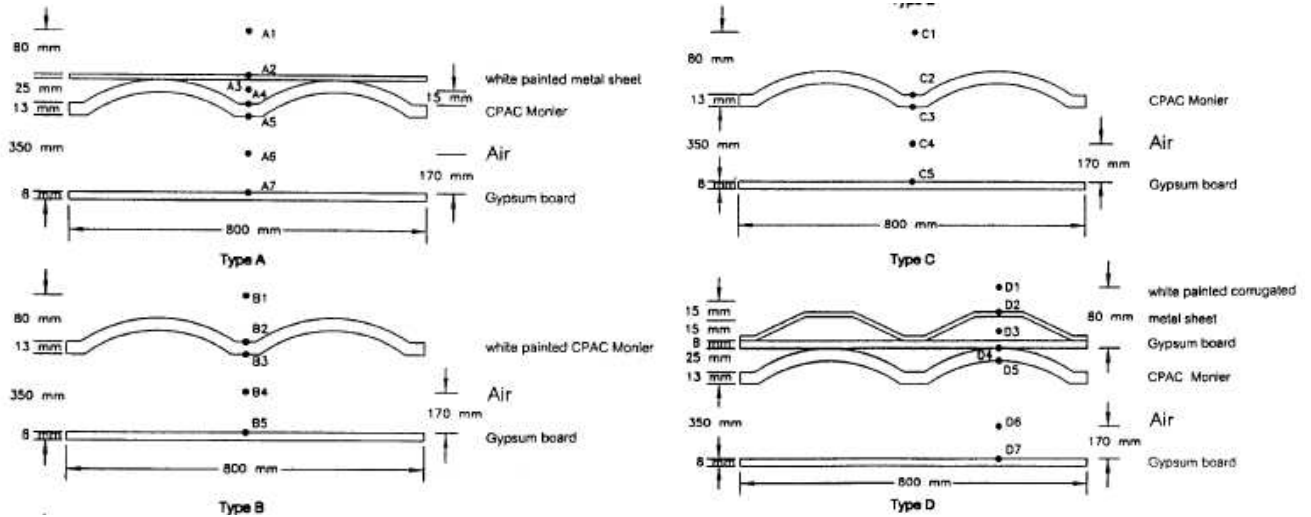
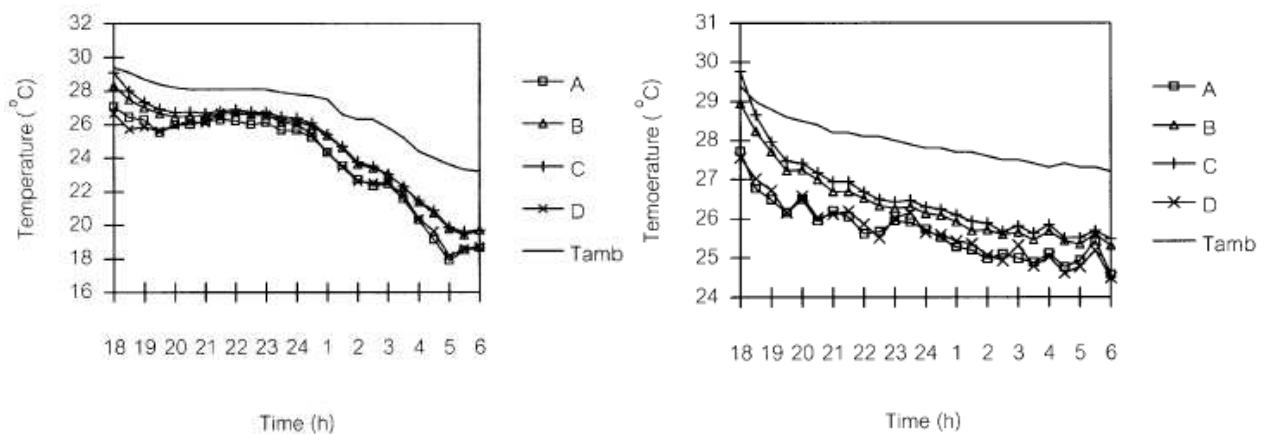
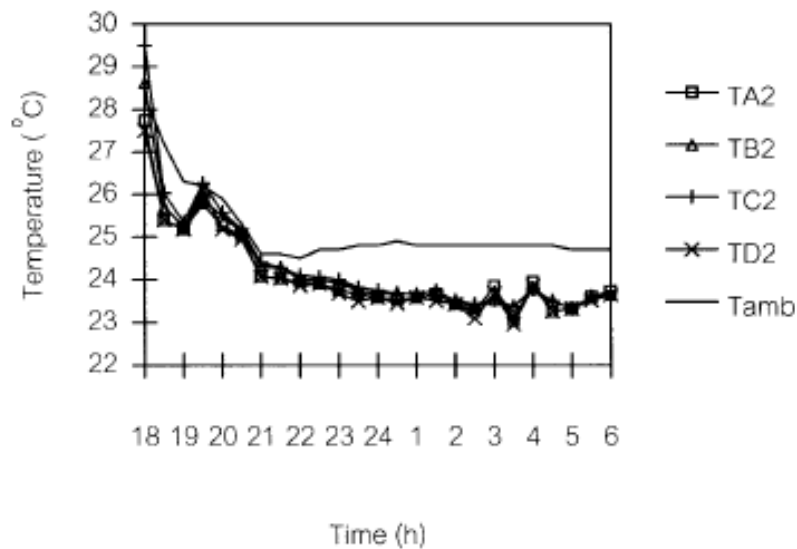


Figura 9. Cuatro tipos de radiador para enfriamiento de edificios desde el techo [19]

Los experimentos, realizados durante el invierno de Tailandia, fueron hechos a partir de las 18:00 (hora local), que era a partir de la cual se producía el ocaso. En lo que sigue, se muestran gráficas que representan la evolución horaria de las temperaturas superficiales de cada radiador y la de la temperatura ambiente, diferenciando las tres condiciones de cielo anteriormente mencionadas:



Gráfica 4. Temperaturas en noches nublada y despejada respectivamente [19]



Gráfica 5. Temperaturas en una noche con lluvia entre las 19:00 y las 21:00 [19]

Se ha considerado representar individualmente la evolución de temperaturas en la noche con precipitaciones, por ser esta la única gráfica en la documentación revisada que represente el enfriamiento nocturno bajo este efecto.

Vemos, sin lugar a dudas, que las condiciones de cielo despejado producen un enfriamiento notablemente superior frente a las otras dos condiciones climatológicas consideradas. También se puede apreciar que en el intervalo en que la lluvia está presente (entre las 19:00 y las 21:00), tal y como era de esperar, no existe enfriamiento por radiación. En este caso, la temperatura superficial del panel asciende inicialmente hasta prácticamente coincidir y evolucionar con la del ambiente lluvioso que le rodea, interrumpiendo el proceso de radiación.

Tras seguir analizando los resultados, queda patente que las configuraciones B y C, pese a tener mayores emisividades, enfrían menos que las A y D. Esto se debe a que los radiadores tipo B y C almacenan mucho más calor durante el día que los otros dos, que poseen láminas y características constructivas que evitan este fenómeno.

En este trabajo también fue considerado el efecto de la condensación del agua sobre los radiadores. Se demuestra que cuando esto ocurre, las temperaturas superficiales de los radiadores llegan a ser muy parecidas entre sí y prácticamente iguales a la de la temperatura de rocío. En este caso, la diferencia de temperaturas entre

las superficies y la del ambiente cae considerablemente, reduciendo el fenómeno de enfriamiento nocturno por radiación, aunque cediendo aún suficiente calor a ser considerado.

Por último, se tomaron medidas de la evolución de la temperatura de los radiadores bajo las láminas metálicas y bajo las tejas. Se pudo comprobar que las temperaturas bajo las láminas metálicas de las configuraciones A y D están siempre por debajo de la del ambiente en un rango de 1-3 °C, permitiendo así proveer enfriamiento a los edificios. Por otro lado, se registraron los datos de temperatura bajo las tejas Monier CPAC de los cuatro radiadores. Viendo estos datos, se concluyó que ésta era demasiado alta para ser usada como espacio refrigerante. Esto se debe al gran calor almacenado durante las horas de sol por las tejas Monier CPAC. En orden a vencer este problema, los investigadores propusieron como mejora, estudiar los radiadores tipo B y C como «chimeneas solares», creyendo que se puede reducir notoriamente el calor almacenado por el día haciendo circular el aire que albergan en este periodo, y mejorando así la efectividad del enfriamiento radiante nocturno para estas aplicaciones.

Por consiguiente, queda claro que el uso de la técnica de radiación nocturna parece ser también viable en países cálidos y húmedos como Tailandia, especialmente durante su invierno, en el que la temperatura superficial de los radiadores se encuentra en el rango 1-6 °C por debajo de la temperatura ambiente.

2.3.5 Enfriamiento circulando agua por un radiador al cielo nocturno

En 1998, A. Hamza y sus colaboradores [12], montaron un radiador nocturno de dos placas paralelas, siendo la superior de estas (la emisora al cielo) de aluminio y pintada de negro. La placa emisora (la superior), fue cubierta por una carcasa transparente protectora de viento con una fina película de polietileno. El banco de ensayo estaba destinado a un circuito abierto en el que el agua fluyera por gravedad.

Previo al montaje se hizo un análisis teórico del sistema que incluía por un lado, un modelo matemático, donde se consideraron especialmente la transferencia de calor neto, la variabilidad del caudal másico del agua y los coeficientes de transferencia de calor; y por otro, el rendimiento del radiador.

Una vez considerado el fundamento teórico, se procedió a poner en liza el banco de ensayo que detallamos a continuación:

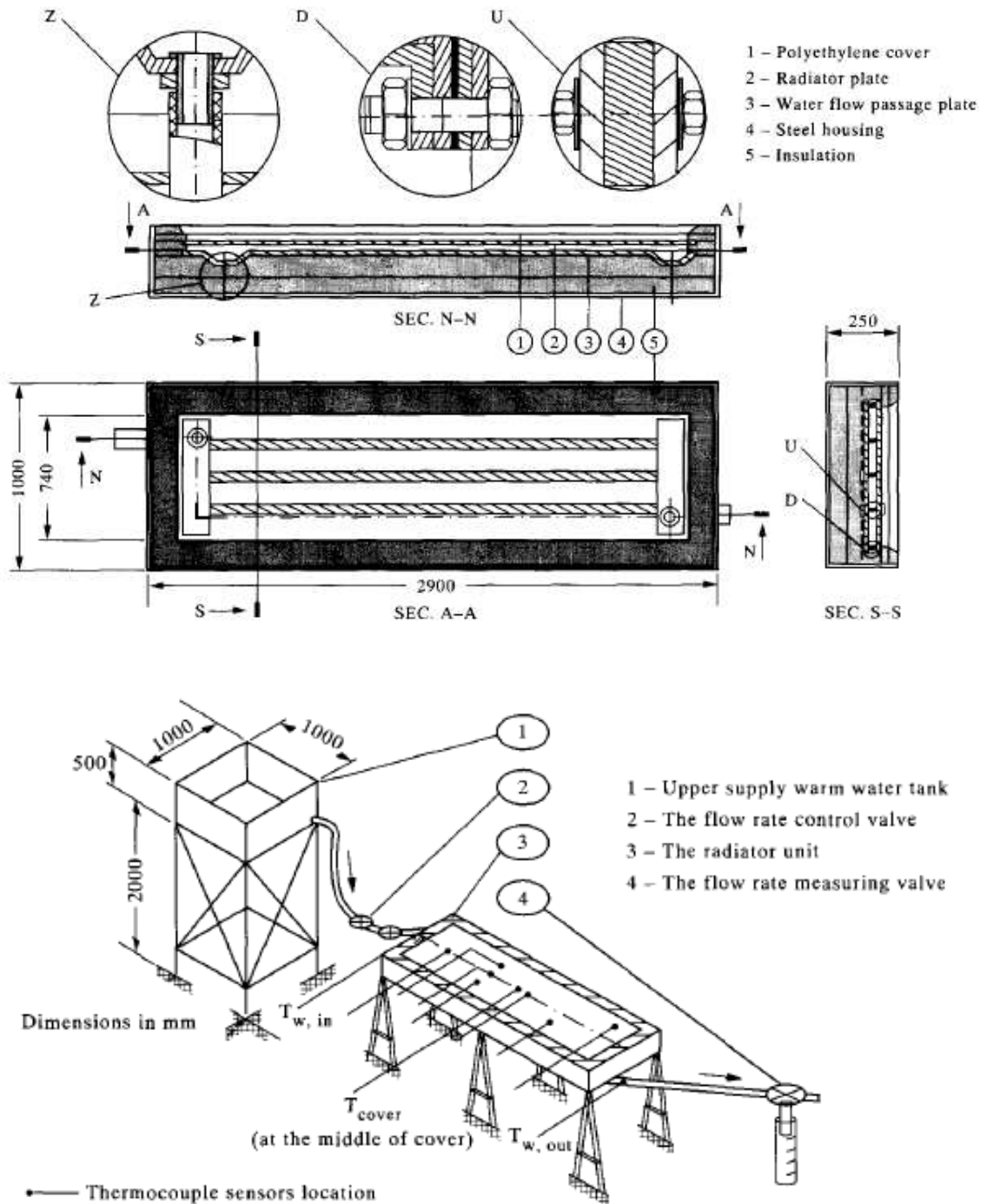
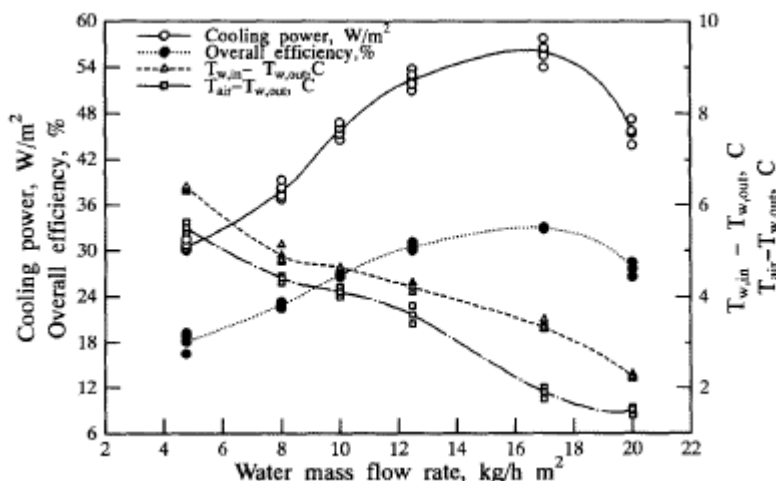


Figura 10. Detalle constructivo del panel radiador y esquema del circuito abierto de refrigeración del agua de un depósito [12]

Se comprobó el efecto del caudal másico de agua medio, confirmando que la caída de temperatura del agua en su paso por el radiador decrece cuanto mayor es dicho caudal, pero que esto hace también aumentar la potencia de calor emitida y por tanto, el rendimiento medio como refrigerador mejora. No obstante, cabe señalar que el aumento del caudal másico tiene sus limitaciones, y que a partir de un punto, la potencia de enfriamiento empieza a decrecer, tal y como muestra esta gráfica:



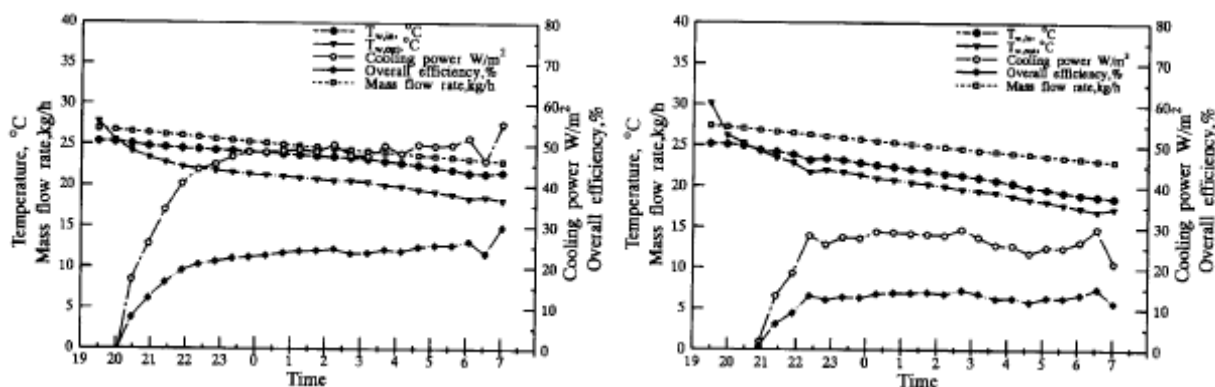
Gráfica 6. Efecto del caudal másico de agua sobre el rendimiento del radiador [12]

Es por tanto que el diseñador ha de encontrar un compromiso entre el objetivo de obtener agua a una temperatura considerablemente más baja que la temperatura del aire atmosférico y el objetivo de obtener la máxima potencia radiante posible.

Paralelamente, se observó que las condiciones de día afectan al rendimiento del sistema. Es notorio, que la cesión de calor durante las primeras horas de la noche es bastante pequeña. Esto es producto de la energía almacenada por la estructura en forma de calor durante las horas de sol.

A raíz de esto, se hacen comparaciones entre los resultados obtenidos dejando el tanque suministrador de agua al descubierto y cubriéndolo para mantener la temperatura del agua. De los ensayos se obtiene, que el tanque descubierto se enfría más a lo largo de la noche, pero sin embargo, la emisión de calor en el radiador es más alta con el tanque cubierto. Esto se debe a que en el tanque descubierto se da el enfriamiento por

evaporación y que por tanto, al entrar agua a menor temperatura la potencia irradiada también decrece. Aunque esto no significa que el tanque cubierto se comporte mejor que el otro. A continuación se muestran las gráficas de evolución de los parámetros del sistema con el tanque cubierto y descubierto respectivamente:



Gráfica 7. Parámetros para el sistema con tanque cubierto y descubierto [12]

Por último, se estudiaron las diferencias entre el enfriamiento nocturno de agua estancada y agua fluyendo. Quedó patente, tal y como se preveía, que haciendo fluir el agua se obtenían al mismo tiempo un descenso de la temperatura del agua así como una mayor potencia emisora.

Las conclusiones más relevantes que se dedujeron en este artículo son que dicho sistema funciona bastante bien en veranos cálidos y secos, y que la evaporación que ocurre en el tanque suministrador descubierto, produce un mejor rendimiento del sistema completo, pese a que tanto la eficiencia del radiador como la potencia irradiada sean mayores para el sistema con el tanque cubierto.

2.3.6 Investigación de un sistema de enfriamiento radiante

En este punto se pretenden proyectar las consideraciones más relevantes de la investigación teórica y experimental del comportamiento dinámico de un sistema de enfriamiento radiante que M. A. Al-Nimr junto a sus colaboradores [16], llevaron a cabo en Jordania al final del siglo XX.

El sistema consistía en un tanque de 120 l de agua a enfriar en un circuito cerrado a través de un panel de enfriamiento radiante con cubierta de polietileno. Se ilustra aquí un esquema del mecanismo:

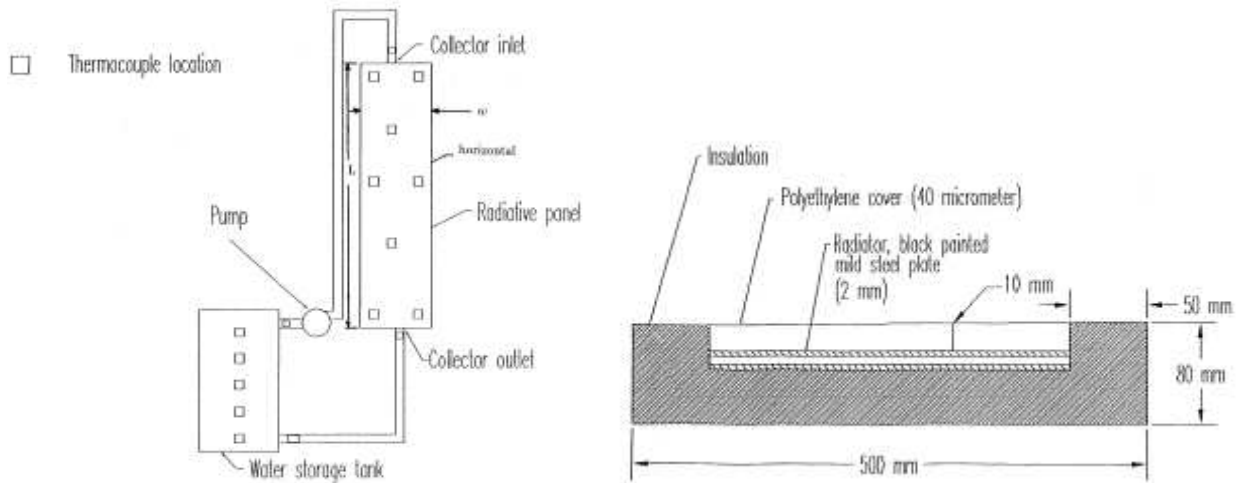


Figura 11. Esquemas del sistema cerrado de enfriamiento y del panel radiante

Diferentes efectos en cuanto al agua de circulación dentro del panel fueron considerados. Dichos efectos son la capacidad térmica (o efecto dinámico), la conducción, la convección y las pérdidas al ambiente.

Antes de comenzar montar el experimento, se realizó un modelo analítico matemático del panel radiante para simular la transición y distribución de la temperatura del fluido dentro del panel. En términos de esta distribución, el rendimiento del sistema de enfriamiento radiante puede ser examinado de antemano.

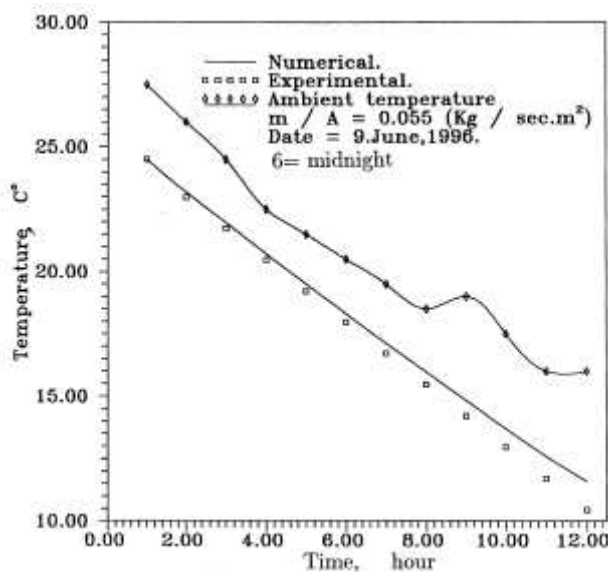
Para el cálculo del enfriamiento acumulado en el tanque de almacenamiento de agua, se consideró que la temperatura de este correspondía a la media las mismas correspondientes a tantas capas como se dividiese el tanque.

Se hicieron dos experimentos. El primero fue hecho para medir el rendimiento instantáneo del panel radiante (sistema abierto) y el segundo para medir el índice de enfriamiento acumulado a largo plazo en el tanque de almacenamiento (sistema cerrado).

Cabe señalar que para hallar la temperatura de cielo se usó la ecuación dada por Duffie y Beckman [16], que relaciona esta con la temperatura ambiente, la temperatura del punto de rocío y la hora con respecto a la media noche. El resultado de la diferencia, según este método, entre la temperatura ambiente y la del cielo corresponde a una media de unos 20 °C.

Tras los ensayos, se pudo certificar que si el caudal de agua crece en el sistema cerrado, la reducción de temperatura del agua del tanque es pequeña para un ciclo completo. Por el contrario, y tras un determinado intervalo de tiempo, el descenso de dicha temperatura es mayor que utilizando caudales más bajos. Esto se debe al incremento en el número de ciclos, y por ende el incremento del número de pasos a través del radiador, en ese mismo intervalo de tiempo. Si bien es cierto, se indica que el efecto del aumento del caudal másico tiene sus límites, y que para un cierto rango del mismo, los efectos se contrarrestan obteniendo resultados prácticamente idénticos.

Para corroborar los resultados de esta investigación, se adjunta la siguiente gráfica, en la que pueden apreciarse el buen ajuste entre las predicciones teóricas dadas por el modelo y los datos experimentales, así como una reducción de unos 15 °C en la temperatura media del tanque de almacenamiento. Esto implicaría que el sistema de enfriamiento emite unos 13 MJ por metro cuadrado y noche.



Gráfica 8. Evolución de la temperatura media del tanque

Consecuentemente, puede confirmarse que el modelo matemático describe bien el comportamiento térmico dinámico del sistema propuesto, que el panel proporciona una aceptable reducción instantánea de temperatura del agua, y que se consigue un notable almacenamiento de fluido altamente enfriado durante la noche.

2.3.7 Enfriamiento pasivo para plantas de potencia en tierras áridas

El presente artículo, elaborado por J. A. Sabbagh y sus colaboradores [10], explora el uso de enfriamiento radiante para plantas de producción de potencia eléctrica y para grandes plantas de refrigeración continentales en áreas áridas. El trabajo hecho consistió en experimentos a pequeña escala, modelos matemáticos, inspección de materiales adecuados y un prototipo. Aquí solamente se presentará este último.

El prototipo experimental consta de un estanque de 10mx25mx1m, cubierto con una lámina de aluminio pintada de blanco, especialmente diseñada, construida y probada. El estanque fue dividido en dos capas. Los ensayos tuvieron lugar en Arabia Saudí entre los meses de enero y junio. Se registraron temperaturas en diferentes secciones y a distintas profundidades, se midió la potencia radiante y se tomaron datos de las condiciones ambientales.

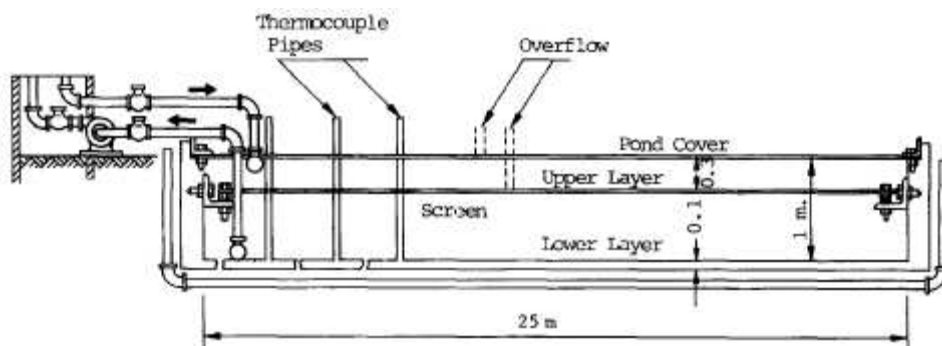


Figura 12. Prototipo del estanque cubierto [10]

Se eligió el aluminio como material para la cubierta opaca, ya que si se le aplicaba una pintura adecuada, representaba, al mismo tiempo, altas conductividad térmica, reflectividad y emisividad, y una muy buena resistencia al clima y los efectos del agua.

En el prototipo, las dos capas estaban separadas por una lámina de plástico. El agua caliente procedente de calentadores de gas, simulando la descarga de la planta de potencia, entra en el estanque por la parte más alta de su capa superior, y el agua fría sale de este por la parte más baja de la capa inferior en el mismo lado y es recirculada a los calentadores. El agua del estrato superior se mezcla con el del inferior infiltrándose a través del final de la pantalla de plástico. Los calentadores aumentan la temperatura de esta agua fría recirculada unos 10 °C de media.

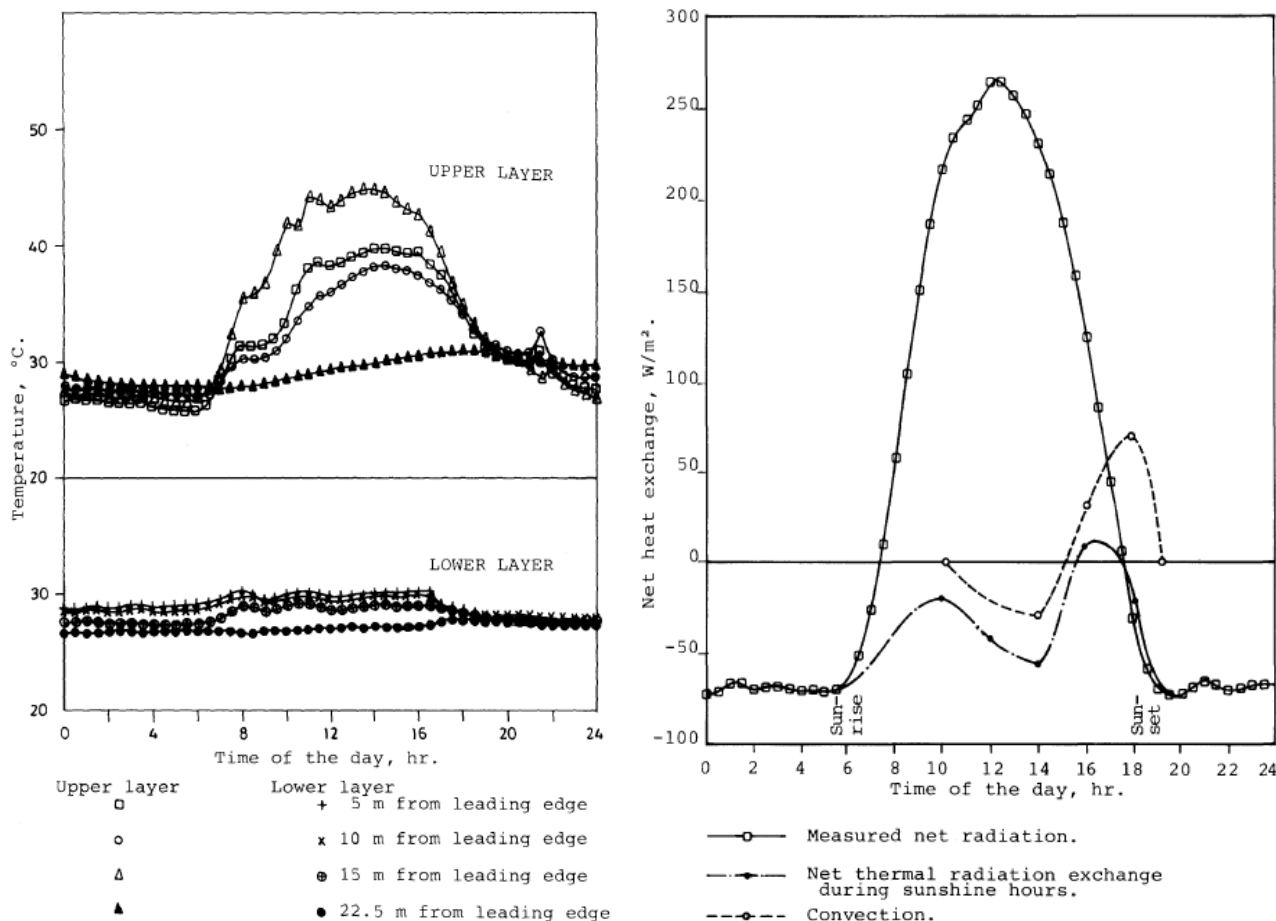
El embalse fue construido sobre una losa única de hormigón y sus paredes fueron hechas de ladrillo macizo. Las paredes y la base fueron enyesadas y posteriormente selladas con epoxi. La estructura de la cubierta, anexionada a un armazón de acero y aluminio, estaba apoyada sobre los bordes del estanque con frisas y sobre pequeños pilotes situados en el centro del embalse, y precintada con silicona.

La temperatura del agua fue medida a la entrada y a la salida del estanque y en diferentes filas del panel a 5, 10, 15, 20 y 22.5 m del borde principal, para ambas capas. Cada fila, a su vez, tenía tres puntos de medida, uno en el centro y los otros dos a 2.5 m de los dos bordes. La radiación fue registrada usando radiómetros netos. El caudal fue medido por un caudalímetro instalado justo después de la impulsión de la bomba que recirculaba el agua. La temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento, y la radiación solar global fueron también tomadas.

Comparando la media de las temperaturas de las dos capas, es claro que la presencia de la fina pantalla de plástico entre los estratos superior e inferior, es efectiva en cuanto a mantener el primero a una alta temperatura, potenciando así la cesión de calor a la atmósfera; y en cuanto a conseguir que el segundo permanezca a baja temperatura. Por tanto, la capa inferior es adecuada para almacenar agua fría.

Viendo las siguientes gráficas, observamos que el estrato superior y la placa de aluminio ceden calor al ambiente durante la noche por convección y radiación. De hecho, se alcanzan valores de radiación al cielo de unos 55 W/m² durante periodos de catorce horas. Adicionalmente, otro de los mecanismos que ayudan a la cesión de calor es el de conducción del agua del estrato inferior al suelo y al ambiente a través del borde principal, la base y las paredes. Sin embargo, la temperatura del agua durante el día

crece en la capa de arriba debido a la radiación solar. No obstante, el calentamiento de esta capa por radiación es parcialmente reducido por el incremento del enfriamiento por convección al ambiente.



Gráfica 9. Temperaturas de las capas en función de su posición y transferencia de calor en el panel en el mes de mayo (para un caudal de 0.0015 m³/s) [10]

Se concluyó que aunque el estrato superior se calienta mucho durante el día, no afecta en demasía a la cesión neta de calor ni contribuía a un sobrecalentamiento excesivo de la capa inferior. De hecho, en la operación normal del estanque de enfriamiento, el agua superior puede ser aislada durante el periodo cálido del día y no debería permitirse su mezcla con el estrato de agua fría almacenada. Este estrato actúa como almacén de frío y sólo se ve ligeramente afectado por las condiciones externas. Esto es gracias a la protección dada por la capa de agua que tiene encima.

Algunos problemas fueron encontrándose a medida que evolucionaban los ensayos realizados. El más serio fue causado por la eventual separación entre la superficie de la cubierta y el agua. Esto causaba una pobre transmisión de calor entre ambos. Dicho efecto fue observado claramente en los resultados de algunos ensayos. Otro fue la disminución de la reflectividad de la placa de aluminio provocada por la acumulación de polvo, que originaba un aumento del calor absorbido por el prototipo durante el día.

Puede concluirse que el resultado global de la investigación experimental fue bastante positivo. Queda demostrada la idoneidad de este tipo de embales o estanques cubiertos como un sistema de cesión de calor en sitios donde no hay disponibilidad de suficiente cantidad de agua para la refrigeración.

2.3.8 Sistema de almacenamiento de frío nocturno con spray

Este subapartado se basa en el trabajo que R. Bourne y C. Carew [13] desempeñaron para la aplicación de un sistema de almacenamiento de agua refrigerada pulverizándola por la noche en las cimas de los edificios, como técnica de disipación de calor.

El artículo describe el análisis energético, el diseño del sistema y del control del mismo, la construcción del dispositivo experimental y su puesta en marcha.

El dispositivo opera un sistema de agua por spray sobre los techos, enfriando el agua por evaporación y radiación al cielo nocturno frío. El agua enfriada vuelve a través del sistema de drenaje instalado en dicho techo a un tanque situado en el subsuelo. Se incluyen además dos bombas. Una circula el agua filtrada del tanque por debajo de los suelos hacia el cabezal oeste que distribuye el agua en forma de spray, aprovechando la masa fría del suelo en antes de llegar a la dispersión. La otra bomba impulsa el agua filtrada del tanque directamente al cabezal este y, si el termostato salta, a los serpentines de enfriamiento, aumentando el enfriamiento pasivo que se entrega desde el tanque de almacenamiento, convirtiéndose en un sistema de aire acondicionado. Puede verse aquí el esquema del dispositivo experimental:

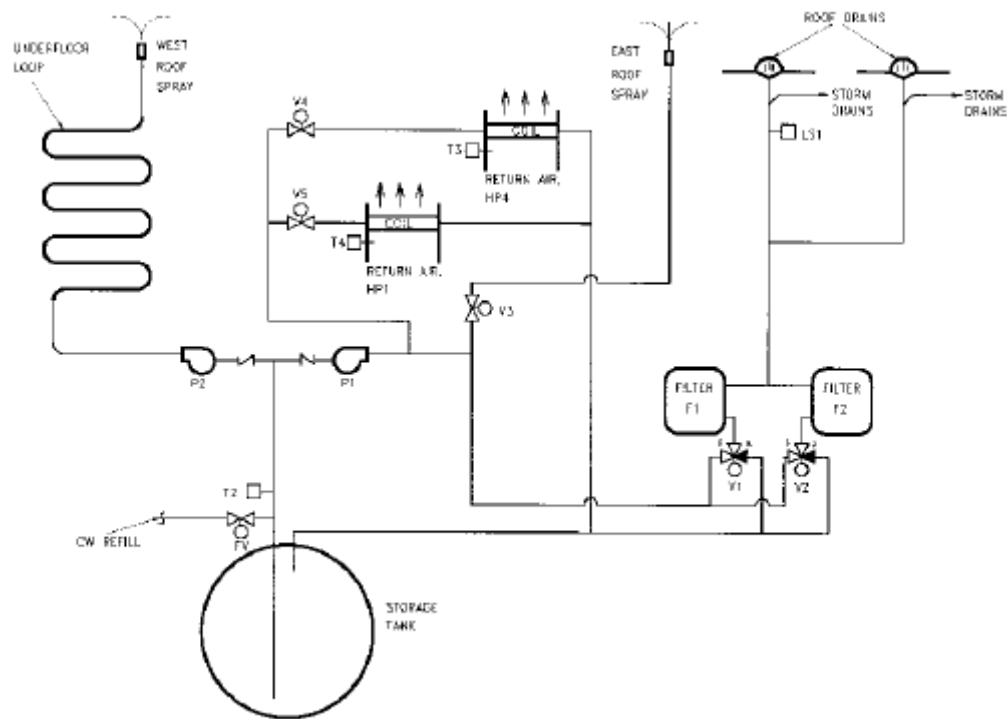


Figura 13: Sistema de agua-spray de enfriamiento nocturno con almacenamiento

El agua-spray es recogido por los drenajes, regresando a través de un par de filtros de arena de baja caída de presión al tanque de almacenamiento. Por otro lado, el flujo que impulsa la bomba del cabezal oeste, pasa a través de un sistema de tuberías de alta densidad de polietileno dispuestas en L bajo la losa del suelo. Una válvula de desvío está incluida en la impulsión de la bomba del cabezal este, con objeto de entregar agua fría a los serpentines de refrigeración de aire para las áreas de oficinas y los vestíbulos.

El sistema posee un microprocesador controlador programado para maximizar la eficiencia y prevenir el sobreenfriamiento. Éste opera ambas bombas en respuesta a la temperatura objetivo del tanque y las condiciones del tiempo. La consigna de esta temperatura objetivo baja cuando las condiciones climáticas son más cálidas. Por la tarde-noche, el algoritmo estima el tiempo requerido de pulverización del agua basado en la diferencia entre la consigna y la temperatura real del tanque.

Tras la recopilación de datos aportados por los ensayos, se concluyó que el sistema este cubre las necesidades de climatización de oficinas situadas en Los Ángeles, quedando demostrada la mejora económica al disminuir los requerimientos de

dimensionado de un sistema de aire acondicionado. Adicionalmente se reporta que, dada la simplicidad constructiva del invento, este puede ser posteriormente incorporado sin problemas a los diseños de proyectos de construcción que previamente no lo hubiesen considerado.

2.3.9 Enfriamiento nocturno como método de conservación

El cambio en la temperatura del agua situada en paneles horizontales expuestos al cielo por la noche fue monitorizado y analizado por G. Mwithiga y A. Kirui [25], con objeto de utilizar la producción de frío proporcionada por estos y aplicarlo como método de conservación de alimentos en la República de Botsuana.

Se construyeron cuatro paneles de enfriamiento de 1 m² y 10 cm de profundidad hechos con láminas metálicas de acero bajo al carbono. Las superficies interiores de dos de los paneles fueron pintadas de blanco y las otras dos de negro. En orden a minimizar el calor transferido por conducción, se usaron tablas de madera contrachapada rellenas de serrín como material aislante. Los paneles fueron situados en superficies horizontales usando un dispositivo de nivelación para asegurar que estas fueran perfectamente perpendiculares al eje vertical de un péndulo gravitatorio. Se tuvo especial cuidado al elegir el emplazamiento de tal manera que no hubiese vegetación ni edificios altos que pudieran perjudicar al intercambio radiante con el cielo.

Se tomaron medidas de la temperatura del bulbo seco y de la superficie del agua del panel usando termopares “tipo k” conectados a un sistema de adquisición de datos. Además, también se grabaron en éste la humedad relativa media durante la noche, observando y notificando las condiciones de cielo cubierto. Cada mañana al acabar el experimento, se medía la masa de agua en panel para saber la cantidad de la misma que se había perdido por evaporación.

El efecto de variar la cantidad de agua en los paneles fue estudiado para distintas profundidades (de 1 a 3 mm en intervalos de 0.5 mm), mientras que las consecuencias de las diferentes pigmentaciones en las superficies del dispositivo se examinaron al situar dos paneles adyacentes de diferente color. Vemos aquí un ejemplo del dispositivo:

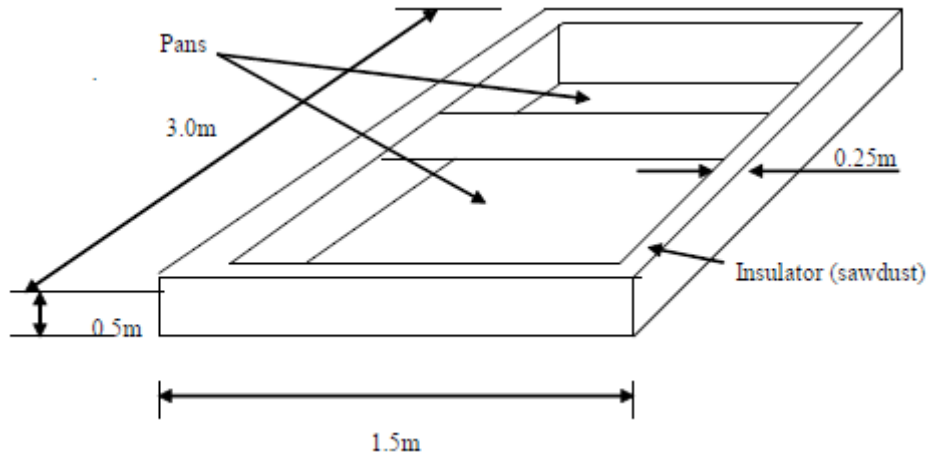
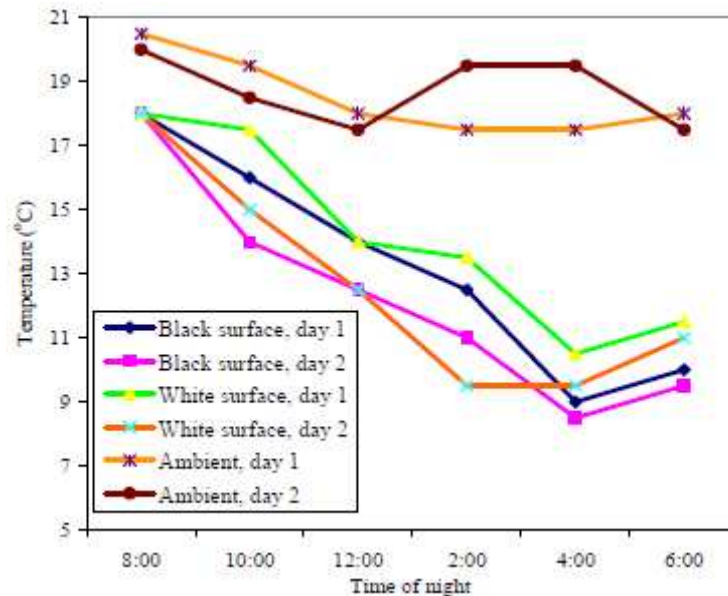


Figura 14. Dos paneles adyacentes usados para el enfriamiento nocturno [25]

En cuanto a los cambios de temperatura durante la noche, puede confirmarse que mientras la temperatura ambiente sufría un descenso de unos 3 °C, el agua experimentaba una bajada de unos 9 °C para cada panel, estando la humedad relativa entre el 58% y 65%. Véase en la siguiente gráfica:



Gráfica 10. Temperaturas ambiente y del agua superficial en dos noches distintas [25]

Se comprobó que el panel con superficies pintadas de negro enfría más que el que las tiene pintado de blanco. También se observa que la mínima temperatura del agua

de la superficie del panel coincide con el momento de mínima temperatura ambiente nocturna. Para apreciar estos resultados se adjunta la siguiente gráfica correspondiente a dos noches ensayadas. Cabe destacar que el periodo de 2:00 a 4:00 de la segunda noche corresponde a un aumento considerable de la presencia de nubes, provocando esto la subida de la temperatura ambiente en este intervalo.

Por otra parte, se discute el potencial de almacenamiento de carga fría. Aquí, dicha carga se define como el calor que tendría que absorber el agua enfriada para que su temperatura alcanzara la del bulbo seco. Esta cantidad de carga sería también igual al calor que extraería el agua de un producto almacenado sin exceder la más baja temperatura de bulbo seco durante la noche, si el agua fuera usada como refrigerante en un medio adiabático perfecto. Para conocer los valores que cuantifican el potencial antes mencionado, se anexa la siguiente tabla para varias profundidades de agua:

Tabla 2. Diferencia de temperaturas entre el ambiente y la superficie del agua [25]

Average Temperature Difference (black pan)					
TIME	1000cc	1500cc	2000cc	2500cc	3000cc
8:00 PM	2.24	3.48	3.52	3.47	2.37
10:00 PM	4.02	3.25	4.14	3.733	2.53
12:00 PM	4.52	4.26	5.25	5.23	2.65
2:00 AM	6.75	4.23	6.03	6.253	4.25
4:00 AM	9.75	7.244	6.75	5.17	5.51
6:00 AM	8.03	5.76	5.73	5.09	4.85
Average Temperature Difference (white pan)					
8:00 PM	2.24	3.453	3.45	3.52	2.12
10:00 PM	2.875	2.253	3.31	2.03	1.74
12:00 PM	4.51	3.03	3.24	3.48	2.24
2:00 AM	6.37	5.12	4.26	5.52	2.74
4:00 AM	8.5	5.54	5.53	4.53	4.53
6:00 AM	6.53	4.753	4.74	4.49	4.06

Viendo esta tabla, está claro que aunque las capas delgadas poseen mayores saltos de temperatura, la carga fría o potencial crece con el incremento de la cantidad de agua por unidad de área de superficie de panel. Esto es debido a que la energía almacenada es directamente proporcional a la masa del agua. Los resultados van de 40.8 a 69.0 kJ/m² para el panel oscuro y de 35.5 a 56.4 kJ/m² para el blanco, para profundidades desde 1 mm a 3 mm respectivamente. Bajo las mismas condiciones, cuando la profundidad de agua es de 1 mm, el panel negro almacena un 14.9% más de carga fría que el blanco. Si la profundidad aumenta a 3 mm, dicha diferencia llega a ser

del 22.3%. Por consiguiente, queda patente la supremacía del panel pintado de negro sobre el de pigmentación blanca.

El índice de respiración de un alimento perecedero está en el rango 5-70 MJ por tonelada y día [25]. Esto sería equivalente a una producción de calor entre 0.06-0.81 W/kg de producto almacenado a 20 °C [25]. Asumiendo que cada panel tiene un potencial de 60 kJ/m² a aprovechar cada noche para mantener la temperatura del producto extrayendo su calor de respiración en un periodo de 24 horas, entonces cada panel podría mantener a ó por debajo de la mínima temperatura del bulbo seco durante la noche a un rango de 0.86-12 kg de producto hortícola. Dicha reducción de la temperatura del producto doblaría su tiempo de vida con respecto a si fuera almacenado a temperatura ambiente.

El presente trabajo demuestra que la radiación nocturna al cielo tiene el potencial suficiente para bajar fuertemente la temperatura del agua con respecto a la temperatura ambiente nocturna a través de una técnica simple. Colocando la carga fría y el producto fresco en un espacio de almacenamiento aislado durante el día, puede incrementarse considerablemente la vida de dicho producto. Esta tecnología tiene la ventaja de poder ser fácilmente adaptada en la mayoría de lugares áridos donde no haya fuentes alternativas de energía, como es el caso de este país africano.

2.4 SÍNTESIS

Resumiendo lo hasta ahora redactado, empezamos indicando la importancia que los sistemas de enfriamiento del condensador tienen en el diseño y funcionamiento de las plantas de producción de potencia eléctrica con ciclos de vapor. Seguidamente se han definido los sistemas más comúnmente utilizados, exponiendo sus principales desventajas y proponiendo una serie de técnicas disipativas de calor basadas en el enfriamiento pasivo. Posteriormente se ha hecho una diferenciación característica de los artículos considerados para finalmente explicar los resultados y aplicaciones de aquellos que, apoyados en dispositivos experimentales, guarden alguna relación con este proyecto o bien sirvan al fundamento teórico del mismo.

Tras todo este análisis podemos afirmar inequívocamente que el fenómeno de enfriamiento nocturno tiene, aparte de un gran margen de mejora, un alto potencial; y que es aplicable de entre otros, a refrigeración de edificios, a climatización, a conservación de alimentos y por supuesto a sistemas de refrigeración en plantas termosolares.

Por otro lado, queda patente que pese a que estos estudios giran en torno a un mismo fenómeno, existen muy diferentes maneras de cómo y dónde aplicarlo. En esta línea, además, podemos afirmar la ausencia de algunos conceptos que podríamos considerar de cierta importancia. Un ejemplo de esto es que la mayoría de los trabajos desatienden el papel que podría jugar la conducción térmica del fluido de trabajo a través de los distintos paneles radiantes. Este mecanismo, tal y como se verá a posteriori, ha sido fundamental en uno de los dispositivos planteados, usados y ensayados en este proyecto.

Como conclusiones preliminares de este trabajo se puede adelantar que si bien el fenómeno del enfriamiento radiante nocturno es conocido desde hace mucho tiempo, la aparición de nuevos materiales y diseños, así como el encarecimiento de los recursos energéticos convencionales y la necesidad de afectar menos al ambiente, hace que su aprovechamiento sea de interés actual. Por otra parte, las características climáticas y geográficas de muchas zonas del territorio nacional son altamente favorables para la aplicación del enfriamiento nocturno.

Si bien es cierto, el propósito fundamental de este proyecto será el de verificar el potencial y la posible aplicación de los dispositivos experimentales ensayados y basados en el fenómeno de enfriamiento nocturno, como sistema o parte del sistema de refrigeración del condensador de una planta termosolar de producción de electricidad.