



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE MEDIOS DE ENFRIAMIENTO ADIABÁTICO DE TIPO RELLENO RÍGIDO

Autor: Dña. Mercedes Simón Caicoya
Tutora: Dña. Ana Tejero González
Cotutor: D. Manuel Andrés Chicote

Valladolid, febrero, 2023



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE MEDIOS DE ENFRIAMIENTO ADIABÁTICO DE TIPO RELLENO RÍGIDO

Autor: Dña. Mercedes Simón Caicoya
Tutora: Dña. Ana Tejero González
Cotutor: D. Manuel Andrés Chicote

Valladolid, febrero, 2023

Resumen

La refrigeración de los edificios se consigue mediante el uso de equipos de aire acondicionado. Estos aparatos accionados mecánicamente proporcionan confort térmico deteriorando el medio ambiente con un mayor consumo de energía. Para paliar la degradación del medio ambiente, se hace imprescindible disponer de sistemas de refrigeración de edificios eficientes desde el punto de vista energético y que tengan el menor impacto ambiental posible (EERR). La refrigeración evaporativa, una técnica típica de refrigeración pasiva, podría satisfacer la demanda energética y los problemas climáticos globales. Este método posee una alta eficiencia energética ya que consume muy poca energía. En la refrigeración evaporativa directa convencional, el enfriamiento sensible del aire se obtiene mediante la circulación continua de agua sobre el relleno. Hoy en día podemos encontrar muchos estudios sobre paneles de refrigeración evaporativa, pero no existe una metodología uniforme para las pruebas experimentales y muchos factores están menos estudiados. El objetivo es diseñar y construir una instalación experimental versátil que permita la caracterización de los paneles bajo diferentes condiciones de funcionamiento: flujo de aire (velocidad), humedad relativa, temperatura, espesor del panel, material del panel y sistema de distribución de agua. El banco de pruebas permitirá el uso de diferentes distribuidores de agua, y cualquier tipo de material de almohadilla con tres espesores diferentes.

Palabras clave: Instalación experimental, enfriamiento evaporativo directo, eficiencia energética, espesor del relleno, material del relleno

Abstract

The cooling of buildings is achieved through the use of air conditioning equipment. These mechanically driven devices provide thermal comfort while degrading the environment with increased energy consumption. To mitigate environmental degradation, energy-efficient building cooling systems with the lowest possible environmental impact (EERR) are essential. Evaporative cooling, a typical passive cooling technique, could meet the energy demand and global climate problems. This method is highly energy efficient as it consumes very little energy. In conventional direct evaporative cooling, sensible air cooling is achieved by continuous circulation of water over the filling. Today we can find many studies on evaporative cooling pads, but there is no uniform methodology for experimental testing and many factors are less well studied. The objective is to design and build a versatile experimental setup that allows the characterisation of the pad under different operating conditions: airflow (velocity), relative humidity, temperature, pad thickness, pad material and water distribution system. The test rig will allow the use of different water distributors, and any type of pad material with three different thicknesses.

Keywords: Instalación experimental, enfriamiento evaporativo directo, espesor del panel, material del panel, sistema de distribución de agua.

Agradecimientos

Gracias a quienes han sido el motor de este trabajo. Mi tutora, Ana Tejero, quien, aparte de darme la oportunidad de participar en este proyecto tan amplio e interesante, me ha guiado y apoyado con mucha paciencia en todo su desarrollo.

Por supuesto, a Asmae Boubkari, por animarme y aportarme tanto entusiasmo en todos estos meses de trabajo.

A Erik A. Sánchez, por ayudarme en el diseño y construcción del banco, así como por su implicación e interés en mi aprendizaje y a Eloy, una pieza fundamental, que gracias a su dedicación en la enseñanza durante el grado ha sabido transmitirme la pasión por esta rama de la ingeniería y me ha aportado su conocimiento y atención durante todo este proceso.

A toda mi familia: a mi padre, quien es un ejemplo a seguir para mí; a mi madre, por su apoyo incondicional y su toque de buen humor. Y a mi melliza Lola, cuya compañía infinita en la vida ha hecho que esté donde estoy.

A mis amigos, Sofía en especial, por su grandísimo apoyo motivacional. Y en general, a todas mis buenas amistades, por empujarme a seguir y a la vez amenizarme el proceso de elaboración de este Trabajo de Fin de Máster.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Agradecimientos | 3 |
| Resumen | 3 |
| ÍNDICE..... | 3 |
| CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Contexto, problemática energética actual. | 1 |
| 1.2 Fundamentos del enfriamiento evaporativo | 3 |
| 1.3 Ventajas e inconvenientes del enfriamiento evaporativo..... | 5 |
| 1.4 Objetivos | 6 |
| CAPÍTULO II- METODOLOGÍA | 7 |
| 2.1 Diseño y construcción del banco de ensayos | 7 |
| 2.1.1 Principios de funcionamiento del banco de ensayos y componentes necesarios..... | 7 |
| 2.1.2 Diseño del banco de ensayos | 8 |
| 2.1.3 Especificaciones de los materiales..... | 12 |
| 2.1.4 Especificaciones de la bomba | 13 |
| 2.1.5 UTA | 14 |
| 2.1.6 Diseño de las piezas | 21 |
| 2.2 Desarrollo de los ensayos. caracterización de los rellenos de celulosa en el periodo transitorio | 24 |
| 2.2.1 Propiedades del aire y parámetros de estudio..... | 24 |
| 2.2.2 Descripción de los elementos de medición utilizados..... | 26 |
| 2.2.3 Desarrollo de los ensayos. Estudio experimental | 29 |

| | |
|--|----|
| 2.2.4 Problemas encontrados y soluciones propuestas..... | 33 |
| CAPÍTULO III- RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 35 |
| 3.1 Diferencia de temperaturas | 36 |
| 3.1.1 Análisis de la estratificación | 38 |
| 3.2 Eficiencia de saturación | 41 |
| 3.3 Capacidad de enfriamiento..... | 49 |
| 3.4 COP de frío..... | 51 |
| 3.5 Recapitulación y análisis | 53 |
| 3.5.1 Situaciones significativas:..... | 55 |
| CAPÍTULO IV- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS..... | 61 |
| Bibliografía | 63 |
| | |
| ANEXOS | |

Nomenclatura

Tabla 1: Notación

| | | |
|------------------------------------|--|---|
| C_L | Calor latente de vaporización del agua | kJ/kg |
| C_p | Calor específico | $\text{kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$ |
| ϕ | Grado de saturación | $^0/1$ |
| h | entalpía específica | $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{as}}$ |
| H | Humedad absoluta | $\text{kg}_v/\text{m}^3_{\text{ah}}$ |
| HR o ϕ | Humedad Relativa | % |
| M | Masa | kg |
| P | Presión | Pa |
| R_g | Constante específica de gas ideal | $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ |
| T | Temperatura | $^\circ\text{C}$ |
| T_{BH} | Temperatura de bulbo húmedo | $^\circ\text{C}$ |
| T_r | Temperatura de rocío | $^\circ\text{C}$ |
| $T^* \text{ o } T_{\text{sat ad}}$ | Temperatura saturación adiabática | $^\circ\text{C}$ |
| x | Humedad específica | $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{as}}$ |
| ve | Volumen específico | $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{as}}$ |

Tabla 2: Subíndices

| | |
|-----|--|
| as | Condiciones del aire a la salida de un proceso |
| ah | Aire seco |
| sat | Aire húmedo |
| v | Saturación |

CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto, problemática energética actual.

Actualmente existe una clara necesidad de descarbonizar el sector de la energía, numerosos programas y ayudas se presentan sobre esta cuestión a nivel europeo[1] en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia [2]; y nacional, gestionado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

El Pacto Verde europeo garantiza que “hayan dejado de producirse emisiones netas de gases efecto invernadero en 2050” (GHG Protocol) [3]y que, para 2030, se hayan reducido un 55% con respecto a los niveles de 1990; sin embargo, si se observa la figura 1, se comprueba cómo aún nos encontramos a años luz de cumplir los objetivos consagrados en la Ley Europea del Clima.

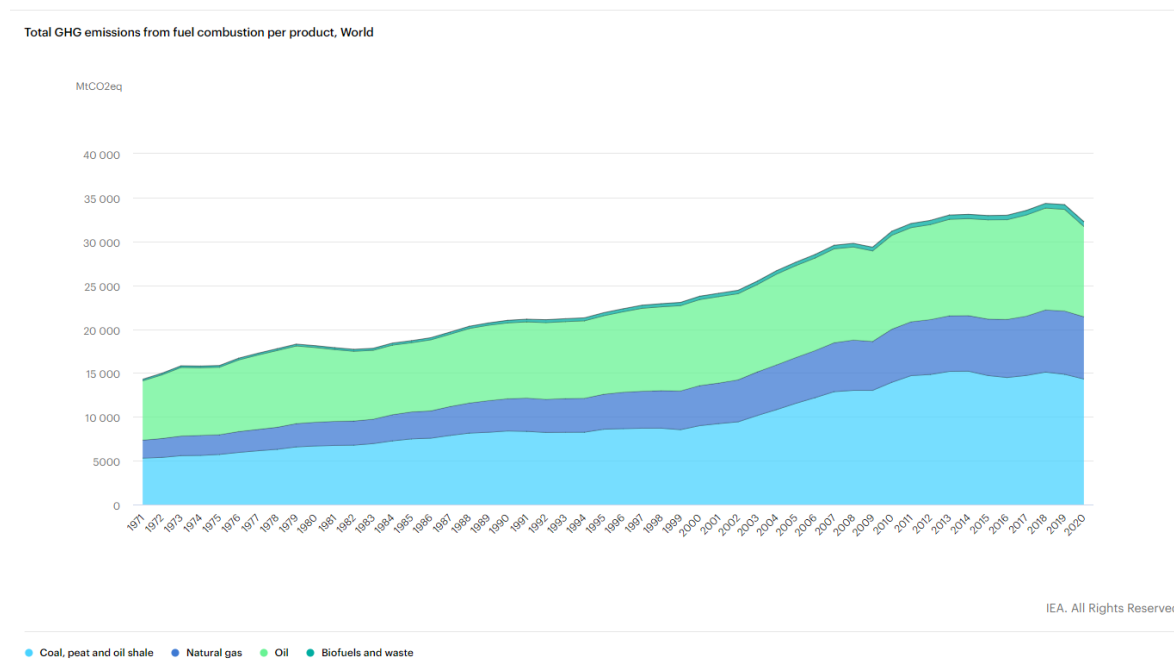


Figura 1: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por producto a nivel mundial [4]

Con el objetivo de acelerar la transición energética a nivel global, se dispone de directivas sobre Eficiencia Energética en la edificación a nivel europeo [5] y nacional[6][7][8], para el sector residencial y no residencial.

En la industria de la edificación se encuentran catalogados diferentes consumos e incluso tienen distintas clasificaciones según el tipo de edificación, lugar de residencia o industria de servicios relacionada. En la segunda categoría, las diferencias más importantes son debido a la calefacción y refrigeración, iluminación, producción de agua caliente, equipos de trabajo, ascensores, etc. De todos los sectores de consumo, domina el sector de calefacción y refrigeración, y se estima que su consumo representa el 80% del consumo relacionado con los edificios, por lo que la prioridad de estos servicios en la descarbonización de los edificios es clara [9][10][11] según estas cifras, el principal problema es que la mayor parte de la energía que se produce en los edificios no procede de fuentes renovables.

La mejora de la eficiencia energética de un edificio debe tender a reducir su consumo de energía, comenzando por reducir la demanda de energía y continuando con la mejora del rendimiento del edificio y el uso de energía gratuita o eficiente. Por ello, se considera que a través de este mecanismo se puede lograr una reducción del 20% con respecto a la situación actual [12]. Existen distintos métodos de reducción del consumo energético en edificios. Estos se pueden agrupar en los tres bloques que se muestran en la figura 2.

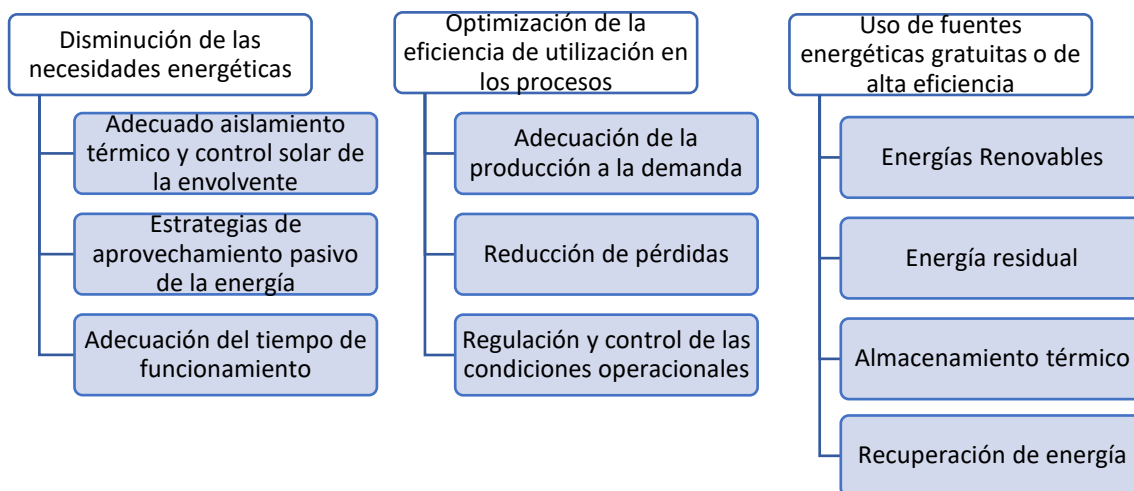


Figura 2: Estrategias de mejora de la eficiencia energética de los edificios [13]

Los sistemas de climatización presentan la mitad [14] del consumo total de energía de los edificios en los países desarrollados, lo que demuestra la urgencia de optimizar ese consumo. Proporcionar a la comunidad científica una colección actualizada de investigaciones sobre refrigeración es fundamental para mitigar el cambio climático. Por tanto, este tema de investigación es tanto una

oportunidad para que los científicos presenten sus propuestas innovadoras, como una respuesta necesaria para proteger nuestro planeta sin dejar de satisfacer una de las necesidades humanas básicas: la necesidad de refrigeración.

1.2 Fundamentos del enfriamiento evaporativo

Entre las técnicas para reducir el consumo de energía de los sistemas de aire acondicionado, se distinguen los sistemas de enfriamiento gratuito (freecooling), los sistemas de recuperación de energía residual y los sistemas de enfriamiento evaporativo, que son tecnologías de bajo consumo que utilizan fuentes de energía gratuitas[12].

Gracias al uso de aire exterior, el sistema de enfriamiento gratuito reduce la energía necesaria para la aclimatación del suministro de ventilación de la habitación. Las aplicaciones más inmediatas incluyen la introducción de aire exterior no acondicionado en la estancia para superar las cargas térmicas y, por lo tanto, mejorar la calidad del aire interior (IAQ) debido al aumento del flujo de ventilación.

El acondicionamiento del aire consiste en el control de la temperatura, la humedad, la limpieza y la distribución del aire en un espacio. Puesto que el presente trabajo trata el estudio de un banco de ensayos de un enfriador evaporativo, en lo que sigue, remitiré mis explicaciones, ejemplos y resultados al dicho método de acondicionamiento.

El enfriamiento evaporativo del aire es un fenómeno natural que se produce cuando el agua se evapora en su interior, absorbiendo el calor latente de vaporización y produciendo una reducción del calor sensible del aire. Esto puede potenciarse mediante un mayor contacto entre el aire y el agua, que puede llevarse a cabo humedeciendo superficies porosas o rociando agua.

Existen dos formas de enfriar evaporativamente: enfriamiento evaporativo directo, o, del inglés, *Direct Evaporative Cooling* (DEC), donde se enfría y se humidifica simultáneamente; el indirecto, *Indirect Evaporative Cooling* (IEC), donde el aire que se va a enfriar se mantiene separado del proceso de evaporación, por lo que no se humedece mientras se enfría. Esta técnica se utiliza mucho en espacios exteriores [15] pero también en grandes espacios en los que el aumento de la humedad relativa tiene un efecto limitado, como en la industria [16], invernaderos [17] y la agricultura intensiva[18].

Aunque el DEC tiene muchas utilidades, ha recibido especial atención en aplicaciones de acondicionamiento de humedad en edificios debido a su bajo consumo de energía en comparación con otros sistemas convencionales. Presenta destacables ventajas en su concepción, operación y mantenimiento, combinado con bajo costo e impacto ambiental.

Para una correcta evaluación de la aplicación de DEC a partir de superficies mojadas, es necesario caracterizar en detalle el comportamiento de los diferentes rellenos disponibles, ya sean nuevos diseños y prototipos o rellenos comerciales. En el presente trabajo se analizan los principales factores de influencia y los parámetros clave de funcionamiento, una vez identificados, se diseña y construye un banco de pruebas para implementar cualquier tipo de relleno de enfriamiento evaporativo en cuanto a material y características geométricas, así como diferentes sistemas de distribución de agua.

El enfriamiento evaporativo provoca que el aire húmedo pase de estar a la temperatura de bulbo seco a la temperatura de bulbo húmedo a medida que se va saturando, todo esto provocado por el intercambio de calor y masa. El aire puede humedecerse bien mediante una superficie húmeda, bien rociando agua al aire. Puede utilizarse en casi todo tipo de climas; no obstante, para el DEC, la efectividad de enfriamiento estará limitada por a la temperatura de bulbo húmedo del aire. Dado que esta temperatura no suele superar los 25.6 °C [19], este sistema de enfriamiento suele ser económicamente rentable en lugares como industrias agrícolas.

Para el enfriamiento directo, se ha de emplear medios porosos humedecidos, llamados rellenos. La máxima reducción de temperatura seca que se puede obtener es la diferencia entre la temperatura de seca de entrada y la correspondiente a la de bulbo húmedo. [20]

Si hallamos la relación entre la diferencia de temperaturas obtenida y la máxima que podría obtenerse, estamos hallando la eficiencia de saturación. Como ha de suponerse, si la temperatura a la salida corresponde con la de bulbo húmedo, esta será del 100%, se detallará más adelante.

Con todo ello, se muestra que la clave para un enfriamiento evaporativo eficiente es garantizar la saturación de todos los paneles de refrigeración durante el funcionamiento y dimensionar y diseñar el ventilador y el motor del sistema para que proporcionen el caudal de aire adecuado para el espacio.

El enfriamiento evaporativo es la solución perfecta cuando se trata de enfriar edificios de gran tamaño, debido a los reducidos costes de funcionamiento y al elevado caudal de aire. De hecho, es la solución más adecuada cuando el aire acondicionado tradicional no es una opción.

Gran cantidad de empresas en Europa confían actualmente en el enfriamiento evaporativo: instalaciones de impresión, industrias de fabricación electrónica, líneas de montaje y salas de exposición de automóviles, cerámica, industrias alimentarias, almacenes.

1.3 Ventajas e inconvenientes del enfriamiento evaporativo

En consonancia con lo expresado anteriormente, este tipo de sistemas permite tener un bajo consumo de operación, pues solo se tiene una bomba y un ventilador como elementos consumidores. Además, sus costes de mantenimiento e instalación también son bajos [19]. Puesto que no utilizan refrigerantes, se tratan de equipos de enfriamiento que respetan el medioambiente.

La calidad del ambiente interior, *Indoor Environmental Air Quality* (IEQ), en los edificios tiene un gran impacto en la salud de los ocupantes, el confort y el rendimiento laboral. La mala calidad del aire interior (CAI) puede provocar graves problemas de salud, como la legionelosis, el cáncer de pulmón por exposición al radón, las infecciones transmitidas por el aire y el síndrome respiratorio agudo grave. Los ocupantes de los edificios suelen manifestar malestar y síntomas de salud relacionados con el edificio, y a veces desarrollan enfermedades relacionadas con el mismo. El exceso de humedad en los edificios es responsable de una serie de problemas como el moho, los ácaros del polvo y las bacterias; y la exposición a ambientes húmedos se asocia a problemas respiratorios, incluidos los ataques de asma. Por otro lado, los edificios con una buena calidad ambiental interior contribuyen a la salud y la productividad de los usuarios del edificio y aumentan su rendimiento laboral o de aprendizaje. La importancia y los beneficios no relacionados con la energía de una elevada calidad del ambiente interior y el confort en los edificios han sido analizados por varios estudios y defendidos por diversas partes interesadas a nivel de la UE.

La legionella o legionelosis se trata de una bacteria que puede colonizar y proliferar en los sistemas de agua del entorno construido y puede propagarse mediante la generación de aerosoles. Si es inhalada por una persona susceptible, puede provocar infecciones respiratorias como la legionelosis (LD) o la fiebre de Pontiac, generalmente más leve. Los sistemas de refrigeración por evaporación, incluidas las torres de refrigeración, utilizadas en procesos industriales para disipar el calor excesivo, son propensos a la contaminación por Legionella. Desde estos sistemas es posible que los aerosoles

contaminados se dispersen por una amplia zona, exponiendo potencialmente a los trabajadores in situ, a los lugares de trabajo vecinos o al público en general. Por ejemplo, esto dio lugar a un examen de los registros de inspecciones de salud y seguridad que reveló que, en un periodo de cinco años, se habían tomado 321 medidas coercitivas contra fallos en el control de la legionela, de las cuales el 31% se atribuían a las torres de refrigeración. [21]

1.4 Objetivos

En el presente trabajo se busca:

- Diseñar y construir un banco de ensayos de un enfriador evaporativo. El objetivo que se persigue es que se pueda utilizar para analizar distintas composiciones de materiales del relleno, grosores, condiciones exteriores y el riesgo de arrastre de gotas, entre otros, pudiendo controlar los factores de funcionamiento.
- Caracterizar el relleno de celulosa durante el periodo transitorio.

Los estudios existentes proporcionan un gran número de resultados derivados de la caracterización de diferentes rellenos DEC en donde se analizan distintos parámetros como la eficiencia y la capacidad de enfriamiento durante el periodo de funcionamiento; no obstante, no muestran ni definen el comportamiento de estos rellenos en el funcionamiento transitorio.

CAPÍTULO II- METODOLOGÍA

Es conocido que existen varios factores que afectan notablemente al funcionamiento de los paneles evaporativos. Por ejemplo, se acepta que los climas cálidos y secos son las condiciones más favorables [22]. Sin embargo, las condiciones psicrométricas del aire suelen medirse en los ensayos, pero no se controlan. La mayoría de las investigaciones se centran en el efecto de la temperatura de bulbo seco, pero no en la humedad del aire, por el contrario, otras muchas miden y controlan el caudal de aire o la velocidad del aire suministrado al relleno, relacionándolo con la eficiencia de saturación, la pérdida de presión y el consumo de agua. En cuanto al caudal de agua, su efecto sobre la pérdida de presión y la eficiencia de saturación es insignificante siempre que sea suficiente para mantener el relleno completamente húmedo. Por último, el material del relleno, su configuración, su espesor y otras características geométricas también serán determinantes para el funcionamiento del sistema [19]

2.1 Diseño y construcción del banco de ensayos

El objetivo global de este trabajo es el diseño de un equipo experimental que permita la caracterización de los rellenos bajo diferentes condiciones controladas de operación: flujo de aire (velocidad); condiciones psicrométricas del aire (temperatura de bulbo seco y humedad relativa); espesor del relleno; material del relleno; sistema de distribución de agua.

Con todo, el objetivo principal del presente trabajo, sin embargo, compete solamente la caracterización del relleno de celulosa controlando la velocidad del flujo de aire

2.1.1 Principios de funcionamiento del banco de ensayos y componentes necesarios

Un banco de ensayos para la caracterización de paneles de refrigeración evaporativa debe permitir que circule y se distribuya sobre el panel un determinado caudal de agua, mientras que el aire es impulsado en sentido transversal. Para ello, es necesario un depósito de agua, cuyo nivel se suministra desde la red. Cuando el sistema entra en funcionamiento, una bomba de recirculación suministra agua a un distribuidor superior. Desde allí, el agua fluye hacia abajo a través del relleno. El agua es parcialmente absorbida por este y la que es restante fluye hacia el depósito inferior. A medida que el aire fluye a través del relleno, se humedece y enfría debido a la evaporación parcial del agua contenida en el material poroso del relleno.

Así pues, los componentes básicos son: un depósito de agua inferior, una bomba de agua conectada con tuberías, un distribuidor superior, una cavidad/carcasa para el relleno y las conexiones de aire.

Por otro lado, la finalidad de un equipo como este es la de obtener el mayor rendimiento. Este viene determinado, entre otros, por la velocidad del flujo de aire a través del relleno, la capacidad de absorción de este y la superficie del relleno. La variación de estos parámetros generará cambios en el rendimiento. El agua de suministro presente en los municipios posee un determinado porcentaje de sales (cal) disueltas, cuya cantidad será distinta para cada sitio. Puesto que estas sales no se evaporan junto con el agua que pasa al seno del aire, la concentración de estas será cada vez mayor (al tratarse de un circuito cerrado). Para evitar que esto ocurra y dañe los materiales, es necesario realizar renovaciones del agua de circuito cada cierto tiempo. Existen dispositivos de medida que pueden implantarse regulan las concentraciones de minerales en el agua.

2.1.2 Diseño del banco de ensayos

El diseño del banco se ha basado en uno ya existente de la casa Munters, el GLASdek, figura 4.

No obstante, el obtenido tiene ciertas simplificaciones, pues no posee válvulas de control ni de drenaje, por ejemplo. En nuestro caso, el drenaje es sustituido por un recambio completo del agua del depósito.

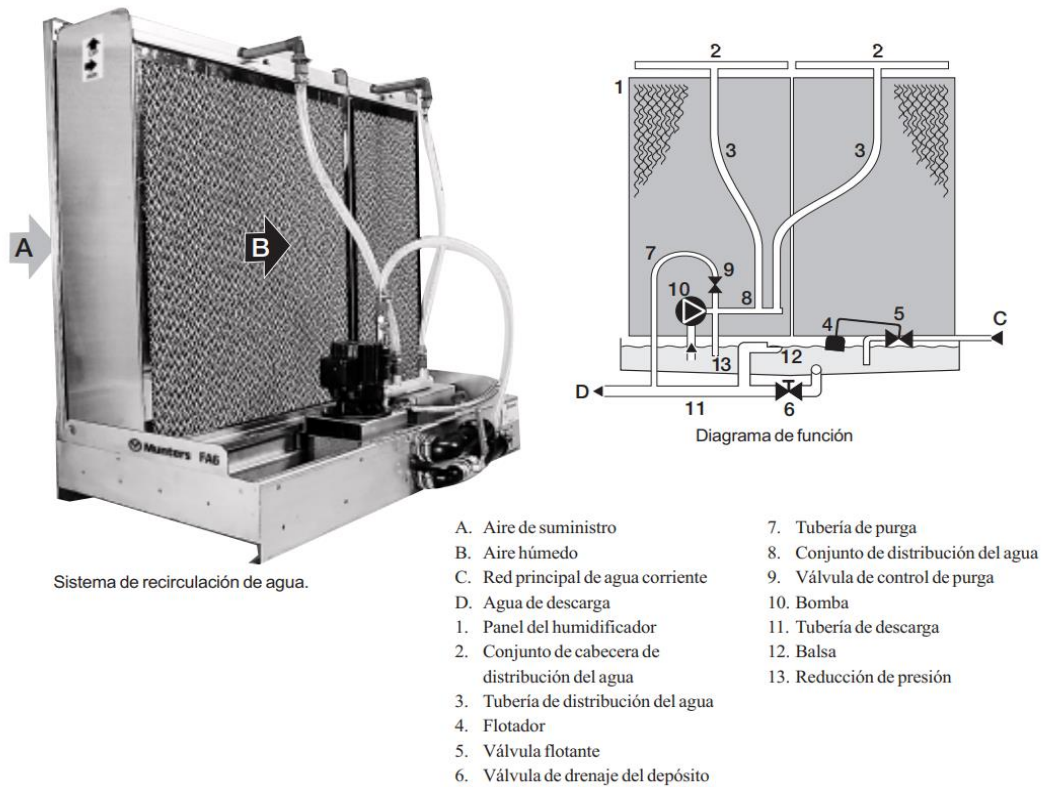


Figura 3: Enfriador evaporativo GLASdek [23]

Uno de los criterios que se ha tenido en cuenta para el diseño del banco de ensayos ha sido la funcionalidad.

Se dispusieron de los siguientes datos:

- Para determinar las dimensiones de la carcasa y las conexiones de aire: altura y anchura de los rellenos, así como los espesores a estudiar.
- El volumen necesario para el depósito de agua, en función de los caudales de agua a caracterizar y del volumen de agua absorbida por las almohadillas.
- La potencia y el caudal de la bomba
- Los tipos de distribuidores de agua que deben caracterizarse, para determinar la separación entre los rellenos y las tapas para la instalación superior.

Los rellenos objeto de ensayo tendrán una altura de 825mm y una longitud de 622mm, y podrán ser de tres espesores distintos: 50/100/200 mm

El banco de ensayos está diseñado para permitir una fácil sustitución de los rellenos probados. Las dimensiones del depósito donde alberga el agua de los rellenos se calculan a partir de la medición de la cantidad de agua absorbida por ellos. Para ello, se consideraron como referencia los rellenos de celulosa debido a su alta porosidad. La masa media de agua absorbida por un relleno de celulosa de 825x622x100 mm en cinco pruebas de 3,95 kg, con una desviación típica de 0,06 kg.

La bomba de agua se eligió en función de los siguientes caudales a probar:

- 6,21 l/min para 1m de altura de relleno y 100mm de grosor
- 9,9 l/min para un relleno de 1m de altura y 150 mm de grosor.

Para el diseño, se utilizó el software Fusión 360. La figura 5 muestra el despiece del diseño para los tres posibles grosores del relleno de celulosa, con la correspondiente estructura exteriores para ajustar las tapas que sustentan los distribuidores de agua.

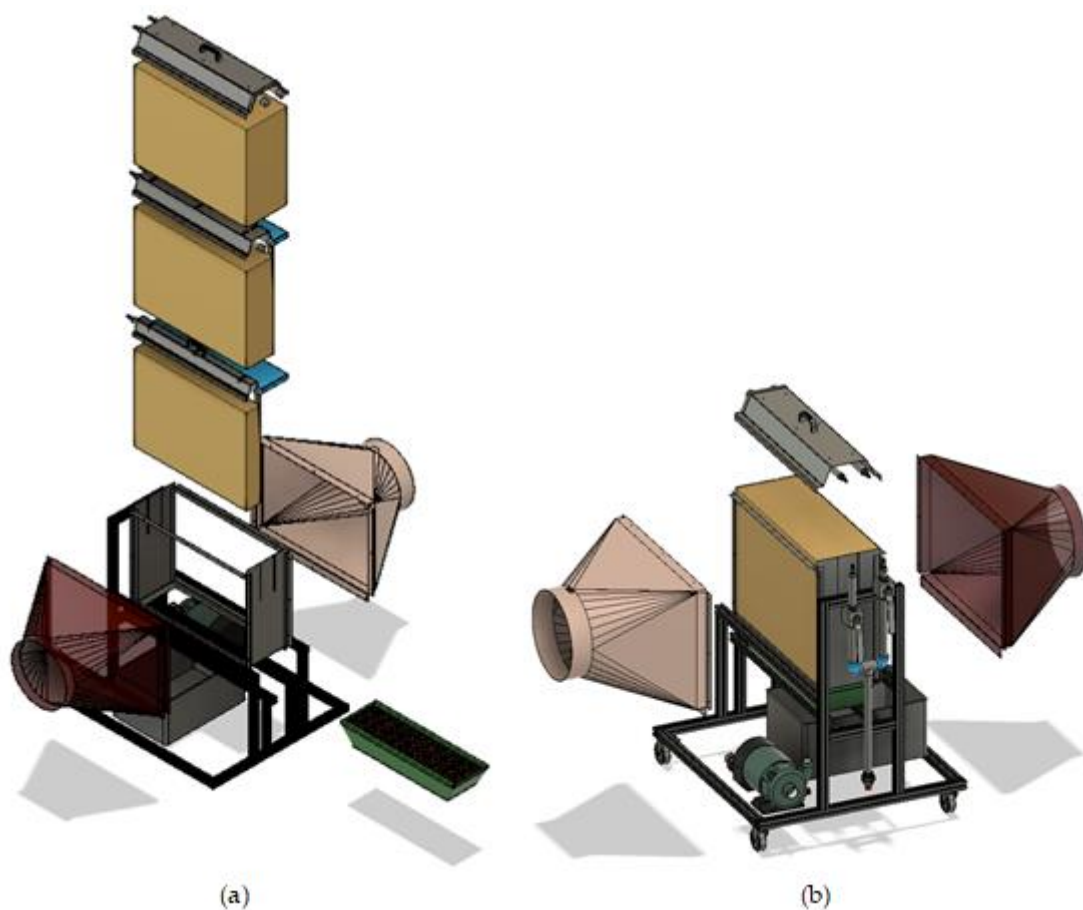


Figura 4: Despiece del banco de ensayos (a) con los tres posibles grosores de celulosa y (b) un relleno de 300 mm de espesor.

Seguidamente, la figura 6 muestra el banco de ensayos construido, equipado con la estructura superior diseñada para la caracterización de rellenos de 100 mm de espesor.



Figura 5: Vista del banco de pruebas desde ambos lados.

Por último, se utiliza una unidad de tratamiento de aire (UTA) para reproducir la velocidad del aire, la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa deseadas, permitiendo realizar los ensayos en condiciones controladas. Cabe recordar que, puesto que en el presente estudio las condiciones de temperatura y humedad no son controladas, este equipo solo servirá para regular el caudal.

En cuanto a los equipos de medida, se seleccionaron aquellos que permitieron registrar las variables necesarias para el cálculo de los parámetros de funcionamiento objeto: pérdida de carga, eficiencia de saturación y capacidad de refrigeración, entre otros.

Las dimensiones del banco estuvieron condicionadas a la toma de aire proveniente de la UTA; es decir, se diseñó la tobera de admisión de forma que pudiese acoplarse la UTA y, por mayor simplicidad se diseñó idénticamente a la de impulsión

En lo que respecta a la estructura-soporte, esta debió diseñarse para que fuese móvil y así se pudiese desplazar con facilidad por el laboratorio.

Dado que una de las finalidades del enfriador en cuestión es que se pueda utilizar con diferentes grosores y tipos de relleno, otro de los requerimientos para su diseño fue que una persona pudiese realizar los cambios ella misma. Para ello, se tuvo muy en cuenta la ergonomía del soporte y de las chapas, en términos geométricos como de peso de los materiales.

Asimismo, teniendo en cuenta que el banco precisa de un abastecimiento eléctrico e hidráulico, estos se tuvieron en cuenta de forma que las tomas no se encontrasen muy alejadas cuando el banco estuviese en funcionamiento.

Puesto que una buena parte del instrumento ha de estar en contacto, o bien con agua directamente, o con aire húmedo, ciertos materiales debieron de seleccionarse debida a su característica de resistencia a la corrosión (encareciendo el proyecto); sin embargo, para los demás, se buscó un compromiso entre resistencia, peso y costo.

A continuación, se detallan los elementos principales necesarios para el proyecto y la manera en la que se llevaron a la práctica los requisitos que se acaban de exponer:

2.1.3 Especificaciones de los materiales

- La estructura, los perfiles del panel, la carcasa de la bomba, el filtro de la bomba, las cabeceras de distribución del agua y la balsa inferior están fabricadas con el acero inoxidable, EN 1.4301.
- La parte superior del sistema de distribución de agua tiene una tubería de polietileno.
- Las mangueras del sistema de distribución del agua son de plástico flexible mallado con conexiones PVC.
- Tanto la bomba de circulación como su carcasa son de plástico acetálico (POM).
- La válvula de flujo constante está fabricada en bronce
- La tubería de drenaje está fabricada en polietileno.

Los elementos que componen el cuerpo del evaporador fueron construidos, en su mayoría, de acero AISI 304. Se trata de un acero ferroso de cromo y níquel con una buena resistencia a la corrosión. Sin embargo, las toberas de entrada y de salida y el recoge gotas, por tratarse de piezas que estarán en contacto casi permanente con el agua, se fabricaron de acero galvanizado. Este material está recubierto de capas de zinc que favorecen a prevenir la oxidación, haciéndolo más duradero y resistente; no obstante, su costo es mayor.

2.1.4 Especificaciones de la bomba

Se trata de una bomba para piscina cuyas especificaciones son las que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Características de la bomba

| | |
|------------------------------------|-----------|
| Potencia consumida | 0,16W |
| Voltaje | 1x230v |
| H ($Q = 4 \text{ m}^3/\text{h}$) | 10 m.c.a. |
| H ($Q = 6 \text{ m}^3/\text{h}$) | 8 m.c.a. |
| Presión máxima | 0,8 bar |
| Ø Impulsión: Rp 1½" | PVC Ø50 |
| Ø Aspiración: Rp 1½" | PVC Ø50 |

La selección de esta se basó en el tamaño y el precio, así como la altura impulsada.

La figura 6 muestra una imagen de la bomba obtenida del catálogo del fabricante [24]



Figura 6: Bomba hidráulica

2.1.5 UTA

Una Unidad de Tratamiento del Aire o UTA es incorporada al proyecto con el fin de acondicionar el aire a las condiciones que necesarias para la experimentación y, así, realizar distintos ensayos para distintas temperaturas, humedades y caudales de impulsión.

Se eligió una UTA de forma que en invierno pudiese operar para cualesquiera que sean las condiciones exteriores e interiores; no obstante, en verano, el equipo está limitado al contenido de humedad del aire. Esto se debe a que no es conveniente tener que deshumidificar el aire caliente ya que supone un consumo energético excesivo.

Se trata de un equipo de gran tamaño que, en este caso particular, consta de los siguientes módulos principales o secciones dispuestos en serie:

- Entrada de aire exterior: la UTA está conectada a una canalización que se conecta con el exterior. Esta entrada de aire dispone de un filtro a mayores puesto que el aire puede entrar con partículas (hojas, piedras...) de un tamaño considerablemente grande y resulta más sencillo limpiar ese filtro.
- Filtro: elemento barrera que garantiza una determinada pulcritud del aire gracias a un fieltro fino que para las partículas arrastradas por el aire. Un sensor controla la presión del aire antes y después del filtro. Cuando esta difiere notablemente de un punto a otro, significa que el nivel de obstrucción del filtro es alto por lo que hay que limpiarlo o reemplazarlo por otro limpio. La limpieza puede realizarse con agua o aire a presión.

En la figura 7, se muestra la sección de la UTA donde se sitúa este elemento.



Figura 7: Filtro (en blanco) de la UTA

- Ventilador: dispone de un motor eléctrico que lo acciona mediante poleas. Su velocidad está controlada electrónicamente, puesto que de ella depende el caudal introducido. Su objetivo es generar una depresión con el fin de que el aire entre desde el exterior. El consumo del aparato depende, principalmente, del caudal máximo que se requiera para el uso de la UTA; no obstante, habrá que tener en cuenta que si, por ejemplo, uno de los dos filtros resulta estar obstruido, este ventilador requerirá aportar mayor potencia para un mismo caudal. Ello queda reflejado en la hoja de especificaciones técnicas del fabricante. [25]

En nuestro caso, el consumo del ventilador será el correspondiente a la pérdida de carga que genere el evaporativo.



Figura 8: Ventilador de impulsión

- Baterías de calentamiento y enfriamiento: dispuestas en serie tras el ventilador, calientan o enfrían el aire en función de la consigna. Se trata de dispositivos intercambiadores de calor agua-aire aleteados dentro de los cuales se dispone una tubería de cobre con toma exterior de agua. Ambas baterías, como puede verse en la figura 9a, están selladas en su perímetro para intentar lograr que el factor de by-pass sea el menor posible. Una válvula de tres vías figura 9b permite obtener la temperatura que se desea.



(a)



(b)

Figura 9: Batería de calentamiento (a) y circuito de agua para la batería de enfriamiento (b)

- Humidificador de vapor: este módulo dispone de un mecanismo de pulverización de vapor de agua cuya finalidad es aumentar la humedad relativa del aire. Uno de los principales problemas que dispone esta sección son las obstrucciones provocadas por la cal del agua.
- Resistencia eléctrica de post-calentamiento: elemento que calienta el aire mediante resistencias eléctricas.



Figura 10: Resistencia eléctrica de post-calentamiento

El plano de la UTA de la figura 11 se encuentra en el anexo IV.

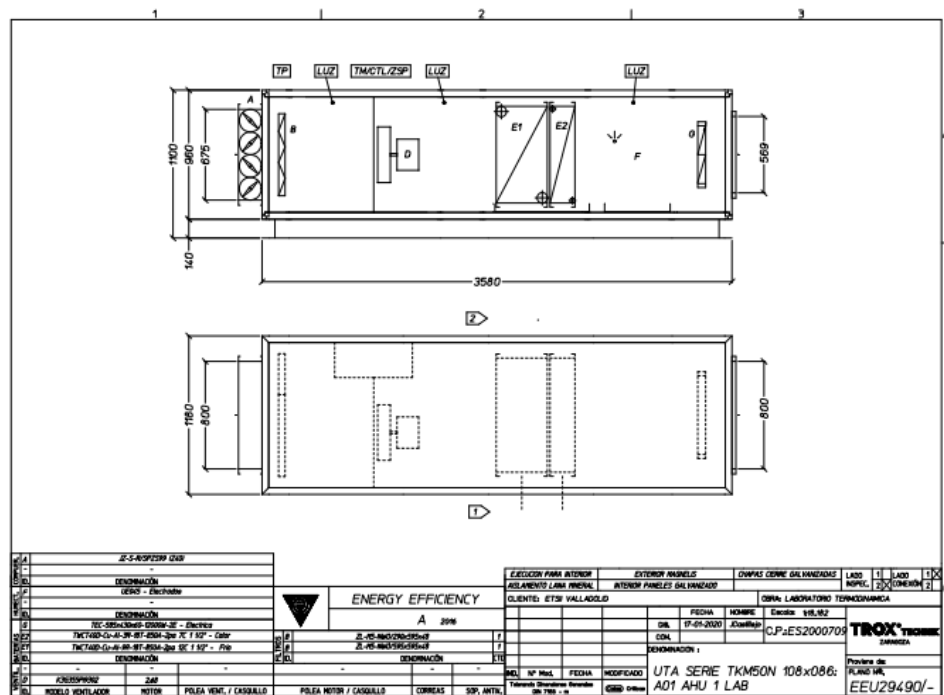


Figura 11: Plano de la UTA proporcionado por el fabricante [26]

La entrada de aire se encuentra a la izquierda, a continuación, se disponen en orden las secciones detalladas previamente. Puede apreciarse en el plano la existencia de tres puntos de luz: entre el filtro y el ventilador, entre el ventilador y las baterías, y entre las baterías y la resistencia. Su finalidad es el poder operar en el interior, para el mantenimiento de los elementos, por ejemplo.

Del mismo modo, en el cajetín del plano se detallan las especificaciones de la UTA, como son el fabricante y el modelo del ventilador.

La UTA se dispone en el laboratorio con respecto al banco de ensayos como se muestra en la figura 12. En un primer plano se encuentra el enfriador evaporativo y a continuación la UTA.



Figura 12: Posición de las sondas en la UTA y en el equipo

Un lucernario similar al visible en dicha figura 13 es el que se muestra en la figura 14, de donde se obtiene la toma de aire.



Figura 13: Perspectiva del conjunto evaporativo y UTA



Figura 14: Toma de aire de la UTA al exterior

Existiendo distintos métodos para medir el caudal que atraviesa la UTA, el que va a atravesar el evaporador, el elegido para nuestra aplicación es mediante una tobera situada prácticamente a la entrada de la UTA.

El principio teórico que acompaña a esta forma de medir el caudal es la caída de presión debido a una obstrucción del flujo. Para ello, dos manómetros miden la presión en dos puntos: uno en la entrada de la tobera, figura 15a, y, otro, en la garganta, figura 15b. Mediante fórmulas analíticas, otro dispositivo obtiene la variable de interés: el flujo volumétrico, en este caso que nos concierne.



(a)

(b)

Figura 15: Posición de los manómetros en la tobera

2.1.6 Diseño de las piezas

Acorde con lo mencionado anteriormente, el diseño de banco se realizó mediante el programa *SolidWorks*. Se trata de un software CAD para modelado mecánico en 2D y en 3D.

Para ello, se diseñó cada pieza por separado de forma que pudiesen posteriormente acoplarse entre sí.

Una vez obtenido el conjunto que se muestra en la figura 16, se realizaron los planos con el programa *Catia*. La figura 17 muestra el plano del conjunto; el correspondiente a escala, junto con el plano de cada pieza individual, se encuentran en el anexo IV.

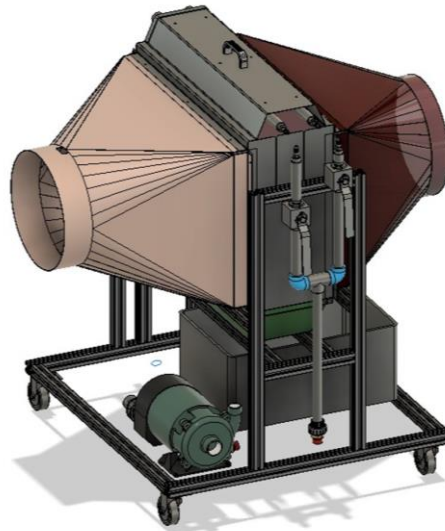
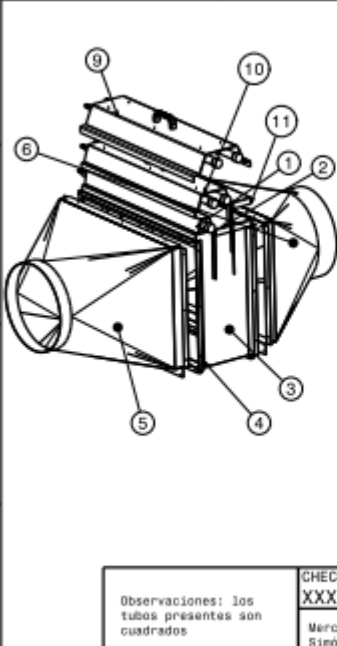


Figura 16: Formato 3D del banco de ensayos con SolidWorks



| Nº | Designación | Unidades | Material |
|----|------------------------------|----------|------------------|
| 1 | Tapa 100 | 1 | AINSI 304 |
| 2 | Chapa tapa 100 | 1 | AINSI 304 |
| 3 | Bandeja DR | 1 | AINSI 304 |
| 4 | Perfiles de bandeja DR | 1 | AINSI 304 |
| | LF 30X30X596 | 4 | AINSI 304 |
| | LF 30X30X828 | 2 | AINSI 304 |
| | TUBO 20X20X825 | 2 | AINSI 304 |
| 5 | TOLVA COAXIAL ENTRADA | 1 | GALVANIZADO |
| 6 | TOLVA COAXIAL SALIDA | 1 | GALVANIZADO |
| 7 | RECOGEGOTAS | 1 | AINSI 304 |
| 8 | TUBO 20X20X825 | 2 | AINSI 304 |
| | LF 30X30X219 | 2 | AINSI 304 |
| 9 | Tapa 300 | 1 | AINSI 304 |
| 10 | Tapa 200 | 1 | AINSI 304 |
| 11 | Chapa tapa 200 | 1 | AINSI 304 |

| | | | | | |
|--|--------------------------|--------------------|--------------|---------------------------------|--------------|
| Observaciones: los tubos presentes son cuadrados | CHECKED BY XXX | DATE 24/02/2022 | SIZE A4 | DRAWING TITLE Conjunto cajón | REV X |
| | Mercedes Simón Calvo | DATE 24/02/2022 | SCALE 1:1 | WEIGHT(kg) XXX | SHEET 1/1 |

Figura 17: Plano de conjunto del evaporador

La fabricación de las piezas fue encargada a la empresa FRIHER. Se trata de una empresa situada en Valladolid, en el polígono de San Cristóbal, cuya especialidad, entre otras es la carpintería metálica. Se enviaron los planos y se dieron ciertas indicaciones, como el tipo de soldadura a efectuar (por puntos).

El evaporador se dispone sobre una estructura metálica donde también se apoya la bomba y el depósito de agua. Para la construcción de esta estructura se encargaron las barras de metal. Puesto que se disponía de las herramientas suficientes, se construyó en el laboratorio y se economizó parte del presupuesto del proyecto, figura 18.



Figura 18: Construcción del soporte del banco de ensayos

Las directrices y especificaciones para el diseño de la estructura fueron su adaptabilidad a las dimensiones del evaporador, la necesidad de una geometría simple y la disposición de ruedas en el soporte para atenerse al objetivo global de la movilidad, entre otros

Para ello, se realizó en perfilera de aluminio con el fin de que fuese rígida, estable y resistente.

2.2 Desarrollo de los ensayos. Caracterización de los rellenos de celulosa en el periodo transitorio

2.2.1 Propiedades del aire y parámetros de estudio

- Aire húmedo

En aire húmedo está compuesto por gases (oxígeno, nitrógeno...) y vapor de agua. Por simplicidad y dado que la proporción de gases es generalmente la misma, puede considerarse que el aire húmedo es una mezcla de aire y vapor de agua.

- Temperatura seca

Se trata de la propiedad termodinámica que registraríamos si colocásemos un termómetro apantallado en el seno de aire húmedo.

- Temperatura de saturación adiabática:

Aquella temperatura que obtendríamos al llevar a saturación el aire de manera adiabática.

El proceso que sería necesario realizar para llegar a este valor es el de hacer pasar el aire por una cortina de agua, como se muestra en la figura 19.

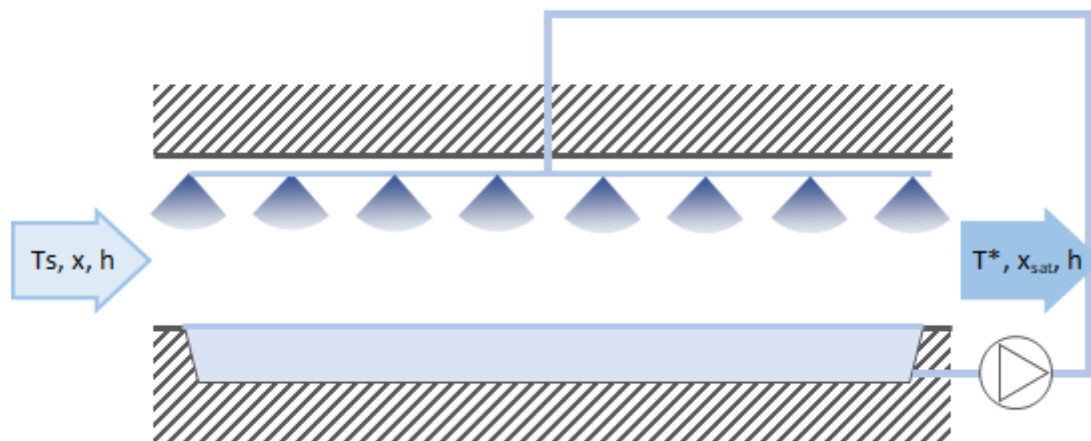


Figura 19: Proceso de saturación adiabática ideal [27]

En nuestro caso, el valor fue calculado por iteración mediante el modelado con una macro creada en Excel.

- Humedad absoluta (H_a)

Cantidad de masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire seco.

- Humedad relativa

Relaciona la presión parcial del vapor de agua con la que a la que estaría si el aire se encontrara saturado de humedad.

$$HR = \frac{P_v}{P_{v\text{sat}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

- Humedad específica

Relaciona la masa de vapor de agua frente a la masa del aire seco.

$$x = \frac{M_v}{M_{as}} \left[\frac{kg_v}{kg_{as}} \right] \quad (2)$$

- Entalpía específica

Cantidad de energía que hay que aportar a una unidad de masa que se encuentra a unas condiciones para pasar a otras cualesquiera. En donde se considera el aporte del aire seco y el vapor de agua, dado que se trata de una mezcla perfecta.

$$h = Cp_{as} \cdot T_s + (Cp_v \cdot T_s + C_L) \cdot x \quad \left[\frac{kJ}{kg_{as}} \right] \quad (3)$$

- Volumen específico (v_e): se determina como el volumen que ocupa el aire en cuestión por unidad de masa de aire seco.

$$v_e = \frac{V_T}{M_{as}} \left[\frac{m^3}{kg_{as}} \right] \quad (4)$$

$$v_e = \frac{R_{as} \cdot T}{(P_T - P_v)} \left[\frac{m^3}{kg_{as}} \right] \quad (5)$$

- Eficiencia de saturación

Se trata del valor que determina el rendimiento.

$$\varepsilon = \frac{T^a_{seca\ exterior} - T^a_{salida}}{T^a_{seca\ exterior} - T^a_{saturación\ adiabática\ exterior}} \times 100 \quad (6)$$

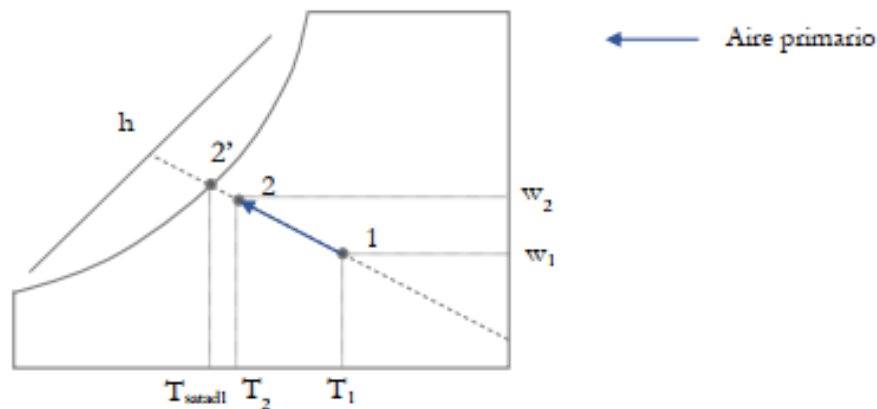


Figura 20: Evolución psicrométrica del aire a su paso por un sistema de enfriamiento adiabático [28]

2.2.2 Descripción de los elementos de medición utilizados

Para el análisis de los ensayos que se realizaron, se hizo uso de distintos utensilios de medición.

- Sondas o data loggers: dispositivos que miden y registran la temperatura y la humedad relativa en espacios cerrados. Poseen una memoria de gran capacidad y de un tiempo de reacción rápido, así como una buena precisión en las medidas. Ello hace que sean idóneos para nuestra aplicación. Su fabricante, *Testo*, proporciona un software, *Testo-Soft Com Basic*, permite descargar en diferentes formatos (Excel, por ejemplo) los datos registrados.



Figura 21: Data logger- sondas utilizadas

El instrumento dispone, por lo tanto, de un sensor de humedad capacitivo externo, situado en el extremo da la vaina. El sensor de temperatura es un NTC. Los datos técnicos se detallan en la tabla 4.

Tabla 4: Detalles técnicos de los data loggers [29]

| NTC | |
|--|---|
| Rango | -20 hasta +55 °C |
| Exactitud | ±0,4 °C (-20 hasta +55 °C) ±1 Dígito |
| Resolución | 0,1 °C |
| Humedad capacitivo | |
| Rango | 0 hasta 100 %HR* |
| Exactitud | ±2 %HR (2 hasta 98 %HR) at +25 °C ±0,03 %HR/K ±1 Dígito < ±1 %HR / deriva anual AT +25 °C |
| Resolución | 0,1 %HR |
| * Inadecuado para atmósferas con condensación. | |
| Punto de rocío (calculado) | |
| Rango | -40 hasta +50 °Ctd |
| Exactitud | +0,03 %HR/K ±1 Dígito |

Previo a su utilización, las sondas habían sido calibradas mediante un horno [28].

- Cámara termográfica: se trata de una cámara inteligente que es capaz de registrar la temperatura con alta precisión. A través de una pantalla, se muestra el registro con un código de colores que permite diferenciar las distintas temperaturas. Puede verse en la figura 22.

Este instrumento fue utilizado para observar la capacidad humectación del relleno.



Figura 22: Cámara termográfica

2.2.3 Desarrollo de los ensayos. Estudio experimental

Para la realización de los ensayos, se siguieron metódicamente los siguientes pasos:

1. Disposición de las sondas: estas fueron situadas según lo indicado en la figura 12 a lo largo del recorrido del flujo del aire por la UTA y la enfriadora. Puesto que se trata de instrumentos con un grado de precisión alto, en los puntos donde más interesa la toma de datos, entrada y salida del evaporador, se dispuso de dos sondas a diferente altura para analizar la estratificación; este fenómeno se verá con más detalle en el capítulo de análisis de resultados. Se configuraron las sondas para que la toma de datos fuese cada 10 segundos.
2. Purga de la bomba
3. Arranque de la UTA: se configura el caudal y, seguidamente, se pone en marcha el ventilador. En el momento en el que se logra el régimen estacionario del dispositivo, se pasa al punto 4.

4. Arranque de la bomba.
5. Descarga de los ficheros de datos de las sondas. Estos datos se descargaron en Excel. Si bien, por lo general, solo interesó analizar el periodo de ensayo, en ocasiones se dejó las sondas midiendo durante periodos largos de tiempo para analizar situaciones en las que llovía, por ejemplo.

5.1 Se obtienen los valores de humedad relativa y de temperatura seca para cada sonda. Se organizan en ficheros conjuntos para cada periodo de toma de medidas que, como se ha dicho, puede coincidir con el de varios periodos de ensayo.

5.2 Aunque el proyecto se inició teniendo las sondas calibradas, por obtener la mayor precisión en los resultados, se utilizaron las rectas de regresión correspondientes a cada una de ellas y se recalcularon las humedades y las temperaturas.

5.3 A continuación, se realizaron los cálculos de humedad específica, temperatura de saturación adiabática y entalpía específica.

5.4 Por último, se generaron ficheros para cada ensayo particular. En él se realizaron los cálculos y las gráficas de diferencia de temperaturas, estratificación, eficiencia de saturación, capacidad de enfriamiento y COP de frío, cuyos resultados se analizan en el siguiente capítulo.

Primeras tomas

Para comprobar el funcionamiento del equipo de acuerdo con las expectativas, fue menester realizar ciertas pruebas. Se comprobó, en una primera instancia, la estanqueidad del equipo para constatar la ausencia de fugas.

Para ello, se analizó el recorrido del flujo del aire, por un lado, y el recorrido del flujo de agua, por otro. En lo que al aire respecta, una diferencia de caudal en la salida del evaporador significaría una posible fuga, lo cual comprobó.

En el caso del agua, bastó con poner en funcionamiento la bomba para comprobar, como se ve en la figura 23 que había fugas. Para solucionarlo, se optó por realizar ciertos cambios en las tuberías y por ajustar con mayor precisión la caída del agua al recogerlas.



Figura 23: Fuga en el equipo al arrancar la bomba

Asimismo, se comprobó el buen funcionamiento y la utilidad de cara al proyecto de los aparatos de medida disponibles, de los que se utilizaron los que se detallan anteriormente en el apartado 2.2 de este capítulo.

El comienzo de los ensayos se dio el 18 de mayo de 2022, día en que se arrancó el equipo por primera vez para realizar las comprobaciones anteriormente expuestas.

Se fueron recogiendo datos de diferentes ensayos realizados entre mayo, junio y principios de julio. Se procuró tener una situación distinta para cada ensayo recogido.

Se realizaron un total de 11 ensayos y fueron analizados completamente 6, pues son los más representativos, y el séptimo parcialmente. La tabla 5 recoge las condiciones en los diferentes ensayos. La particularidad, que se verá en más detalle en el próximo capítulo, que posee el séptimo ensayo es que, durante su transcurso, comenzó a llover.

Tabla 5: Estados de los ensayos

| | | Condiciones iniciales | | | | Condiciones medias de funcionamiento | | | | |
|--------|---------------------|------------------------|----|------------------------|----|--------------------------------------|----|----------|----|------------------|
| Ensayo | Hora | Condiciones interiores | | Condiciones exteriores | | Interior/impulsión | | Exterior | | Caudal impulsado |
| | | T | HR | T | HR | T | HR | T | HR | |
| | h | °C | % | °C | % | °C | % | °C | % | (l/s) |
| 1 | 10:13- 11:17 | 24 | 46 | 22,6 | 48 | 17,4 | 99 | 25 | 40 | 1390 |
| 2 | 11:50- 12:50 | 27,7 | 35 | 26,7 | 35 | 19 | 87 | 28, 5 | 33 | 1000 |
| 3 | 17:47- 18:57 | 32,6 | 25 | 32 | 24 | 19,7 | 83 | 31, 9 | 24 | 1000 |
| 4 | 19h45 -21:30 | 23,5 | 38 | 24,8 | 35 | 15,8 | 86 | 24 | 32 | 1400 |
| 5 | 12h56 - 13h55 | 25,7 | 34 | 24 | 36 | 16,7 | 97 | 25 | 34 | 1000 |
| 6 | 17h06 - 18h17 | 31 | 18 | 29 | 18 | 17,4 | 88 | 29, 3 | 18 | 1400 |

Las condiciones interiores anteriormente expuestas se midieron con la sonda situada en el interior de la UTA

2.2.4 Problemas encontrados y soluciones propuestas

A lo largo de la realización de los ensayos y de la toma de datos surgieron distintas dificultades o hechos inesperados. Uno de ellos fue la fuga de agua, expuesta anteriormente. Dado que fue necesario reemplazar ciertas piezas, el tiempo que transcurrió entre tanto fue preciso el estar pendiente constantemente de rellenar con agua el depósito de la bomba.

Otra cuestión que hizo falta tratar fue que, en ocasiones, hubo sondas que no registraron datos o que, como se verá en el siguiente capítulo y en las gráficas recogidas en anexos, hay ciertos datos que no atienden a la lógica, pues se desvían demasiado sin explicación física aparente.

Dado que no se sabía exactamente cómo iba a responder el sistema, la mayoría de las veces se dejó las sondas recogiendo datos durante horas. De ello resultó obtener tamaños de ficheros Excel del orden de 20.000 kB, engorrosos de tratar. Este hecho ralentizó considerablemente el análisis de resultados. Para facilitar la faena, se optó por seleccionar únicamente los periodos objeto de análisis y dividirlos en distintos ficheros.

CAPÍTULO III- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos fueron realizados en diferentes momentos de días distintos.

Cada ensayo se divide en tres periodos:

- Transitorio de inicio: desde que se arranca la bomba y el ventilador (ambos) hasta que comienza el periodo de funcionamiento. Este quedará determinado por el valor de la eficiencia de saturación, se explica con más detalle en el primer ensayo.
- Funcionamiento: aquel donde puede considerarse que el equipo está operando dentro de unos valores de eficiencia razonablemente altos con respecto al valor medio.
- Transitorio fin: comienza en el momento en que se apaga la bomba y finaliza en el momento en que la temperatura de impulsión toma el mismo valor que el de la temperatura exterior. Para determinar el final, se analizó el error relativo entre ambas temperaturas.

El periodo transitorio se trata de aquel en el que las variables toman distintos valores hasta que se estabilizan durante un tiempo determinado, a partir del cual comienza el periodo estacionario. En nuestro caso, hay dos periodos transitorios: al arrancar el equipo y al pararlo.

La extensión de este periodo queda condicionada por:

- Las condiciones exteriores e interiores
- El tipo de relleno
- El grosor del relleno
- El caudal de aire impulsado
- La masa de agua absorbida por el relleno
- La temperatura del agua
- El caudal de agua aportado por la bomba

Se emplearán los resultados del primer ensayo a modo de ejemplo para mostrar los cálculos de los tiempos de los periodos expuestos. Los ensayos a partir del primero se comentarán si existe alguna particularidad y sus gráficas se adjuntarán en anexos.

De cada uno se recogieron los valores de temperatura seca y la humedad relativa, a partir de los cuales se calcularon los demás, como se verá con más detalle en los siguientes puntos.

En la figura 24 se representan la humedad relativa y la temperatura durante el ensayo en función de la hora. Se muestra dicho gráfico a título de ejemplo, a fin de que sirva para tener una idea más clara y global del ensayo cuando se aborde la lectura de los puntos que siguen. Cabe observar cómo, a medida que avanza el ensayo, la humedad relativa del exterior disminuye a la vez que la temperatura seca aumenta. Se analiza con detalle más adelante.

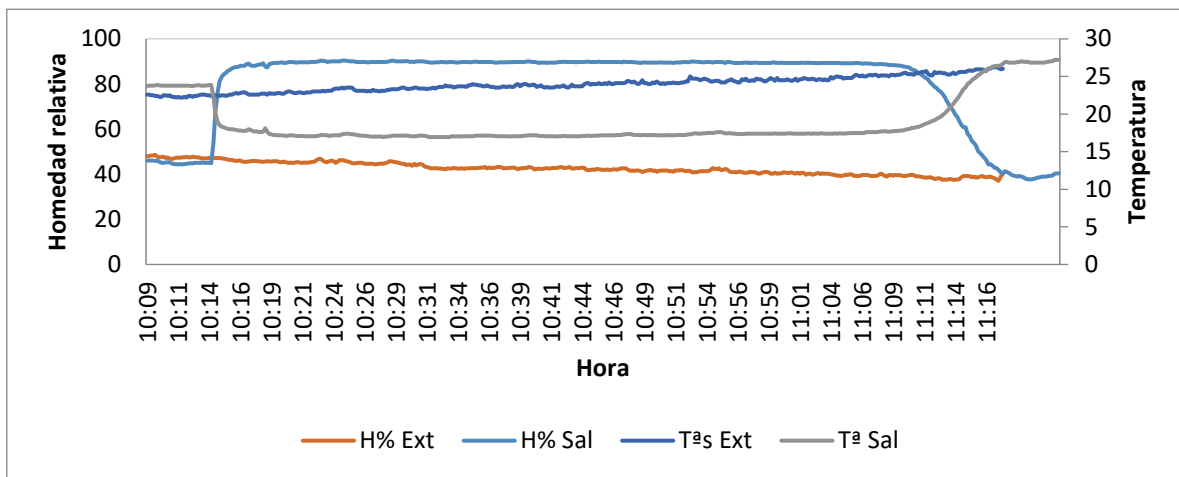


Figura 24: Humedad relativa y temperatura seca

3.1 Diferencia de temperaturas

La diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida se calcula según la ecuación (7).

$$\Delta T^a = T^a_{\text{entrada}} - T^a_{\text{salida}} \quad (7)$$

La figura 25 recoge los valores de la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida durante todo el ensayo en función de la hora. Dado que el ensayo ocurre durante un periodo de tiempo de aproximadamente una hora en un momento del día en donde la temperatura seca exterior aumenta considerablemente, esta diferencia de temperaturas se muestra con pendiente positiva.

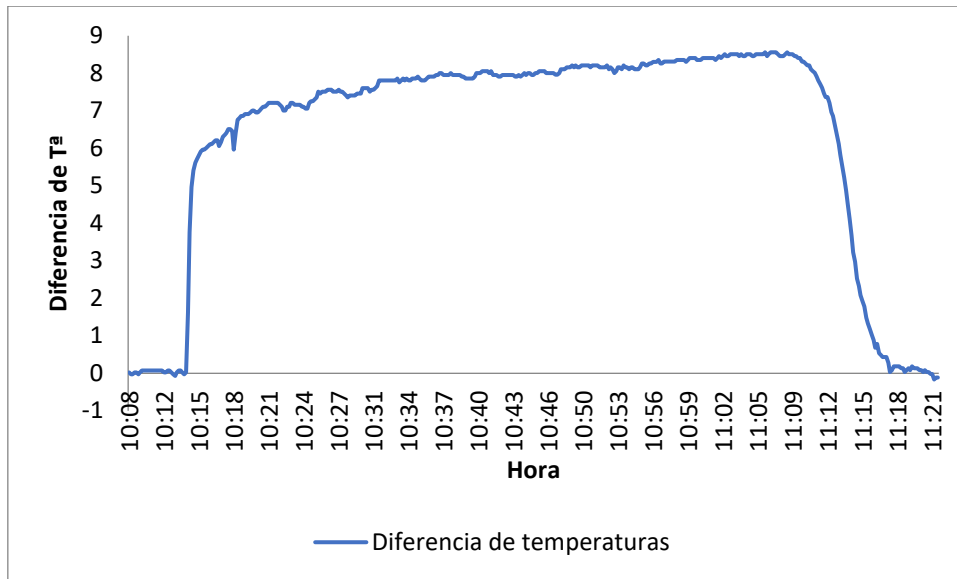


Figura 25: Diferencia de temperaturas

En la siguiente gráfica, la figura 26, queda representada la diferencia de temperaturas durante el periodo de funcionamiento y la temperatura exterior. Asimismo, se muestra la recta de regresión de los puntos:

$$y = 0,285x + 10,265 \quad (8)$$

El 0,285 representa la pendiente de la recta tendencia, de donde interpretamos que la función es levemente creciente.

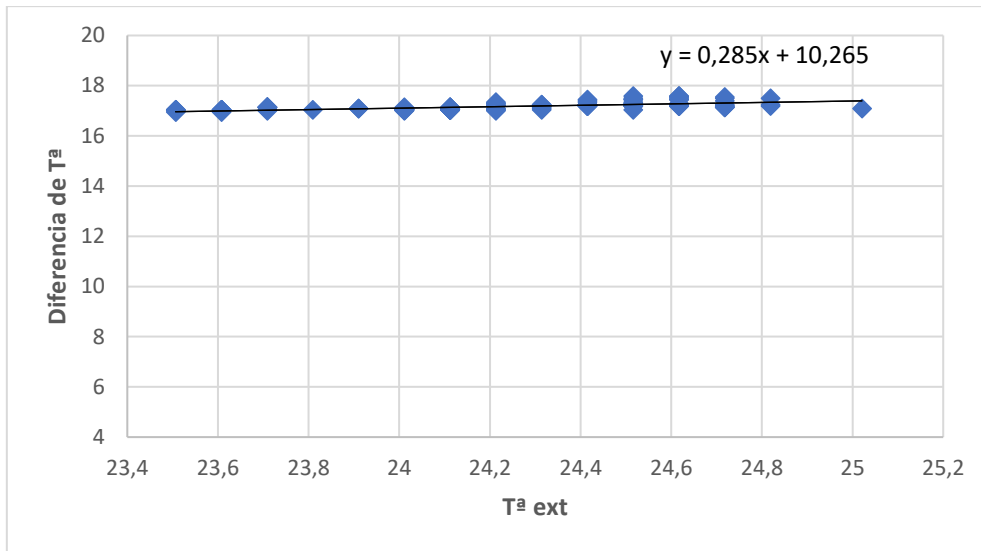


Figura 26: Diferencia de temperaturas durante el funcionamiento

Puesto que, a medida en que la temperatura de salida se aproxima al valor de la de salida significa que el ensayo está terminando, se planteó utilizar el cálculo del error relativo para determinar el final del periodo de funcionamiento. De esta forma, se estableció en Excel una condición tal que, en el momento en que este valor fuese inferior al 3%, el periodo de funcionamiento habría finalizado.

$$Error_{relativo} = \frac{T^a_{exterior} - T^a_{salida}}{T^a_{exterior}} \quad (9)$$

Para este primer ensayo, el valor corresponde con las 11:10 am. Si se comprueba en la figura 1, se aprecia que el criterio aplicado no es descabellado.

3.1.1 Análisis de la estratificación

La entrada y la salida del evaporador poseen un área considerablemente grande como para que dé pie a cuestionarse si existe estratificación; es decir, diferencia en la medición entre un punto u otro. Por ello, en la figura 27 se muestran las mediciones correspondientes a la entrada y a la salida del evaporador en dos puntos distintos de cada sección.

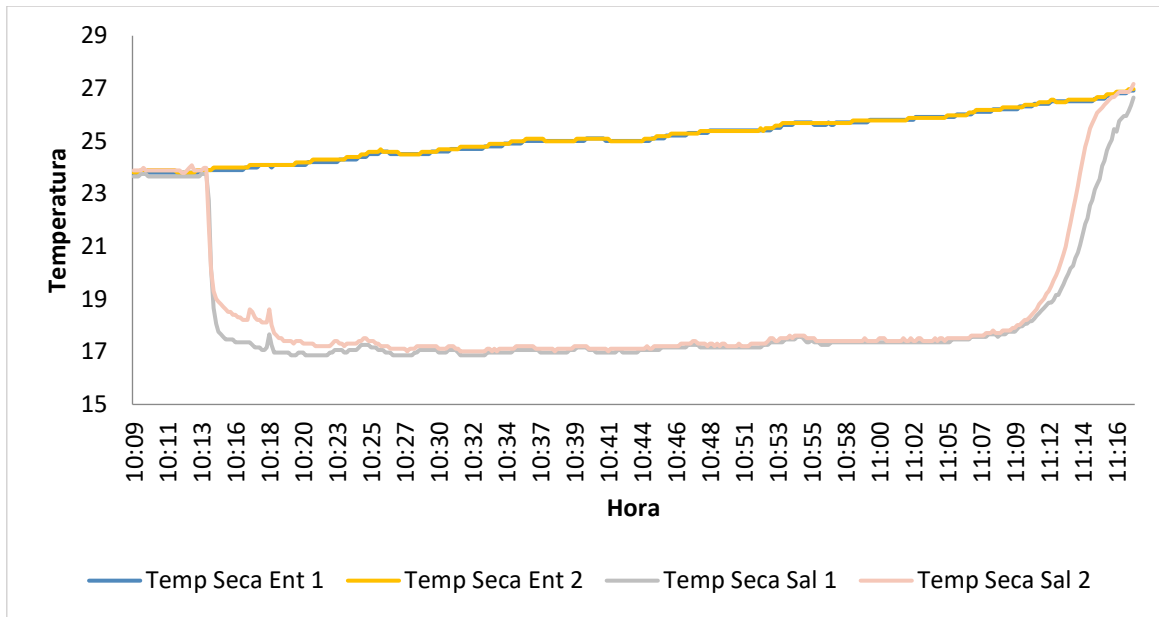


Figura 27: Análisis de la estratificación

La figura 28 muestra la posición de las sondas a la salida; la posición de estas a la entrada es simétrica.



Figura 28: Posición de las sondas a la salida del evaporador

Gráficamente, se aprecia que a la entrada las mediciones difieren de forma despreciable; sin embargo, en la salida se aprecia una mayor variación. La sonda S3 corresponde con aquella situada

en el centro, cuya temperatura y humedad medidas son la número 2; la S2 es la situada en la periferia y sus medidas son la número 1.

Observando con detenimiento, la temperatura seca de la salida 1 se enfría más rápidamente que la 2 y, a su vez, tiene una “recuperación” más lenta. Puesto que se trata de la sonda de la periferia, el aire caliente de entrada le afecta en menor medida que a aquella situada en el centro.

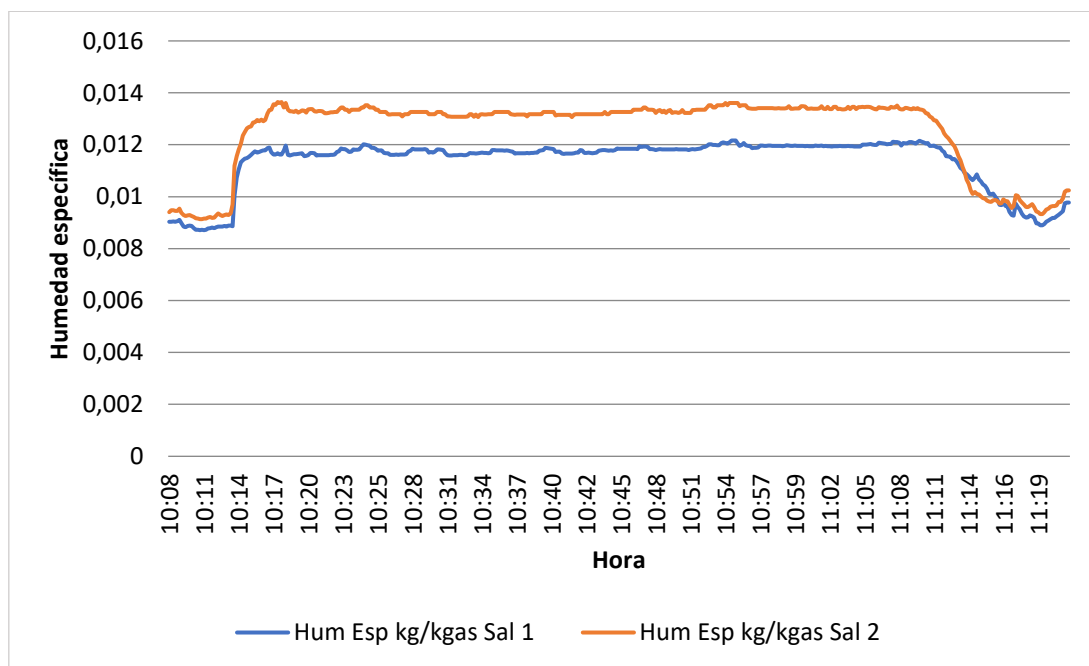


Figura 29: Humedades específicas a la salida

Asimismo, con la figura 29 también se puede ver lo que se viene diciendo: la humedad específica a la salida 2 ha de ser mayor que la número 1, pues, dado que el agua cae desde la parte superior, el centro se humedece antes.

Si se analiza la situación numéricamente durante el periodo de funcionamiento, se puede hallar media de la diferencia de temperaturas entre las sondas a la entrada y a la salida, así como su desviación típica. Los datos se recogen en la tabla 6.

Tabla 6 Análisis de la estratificación en periodo de funcionamiento

| Diferencia de T ^a | Media | Desviación típica |
|------------------------------|------------|-------------------|
| Entrada | 0,01997101 | 0,05146552 |
| Salida | 0,32941941 | 0,52201484 |

Como ya se había visto en el análisis gráfico, las variaciones a la entrada son despreciables y queda corroborado en los cálculos mostrados en la tabla 6: se han obtenido, para la entrada, una media y una desviación típica del orden de magnitud de la centésima.

En lo que respecta a la salida, la variación es mayor. Si bien podría considerarse despreciable, para una mayor rigurosidad, se calcularon tanto para la entrada como para la salida los valores medios de todos los puntos. Por ello, en lo que sigue, cualquier variable tratada será, en realidad, el valor medio de las dos sondas.

3.2 Eficiencia de saturación

La eficiencia a saturación se define como la capacidad del aire para saturarse de vapor. Se trata de la medida más representativa para analizar la capacidad de la máquina. Observando la ecuación (10), puede deducirse que, cuanto más cercana se encuentre la temperatura de salida a la correspondiente a saturación, mayor será la eficiencia. Desde un punto de vista más detallado, la explicación de ello se debe a que, cuanto más se acerque a la temperatura de saturación adiabática, la temperatura de bulbo seco correspondiente será menor.

$$\varepsilon = \frac{T^a_{seca\ exterior} - T^a_{salida}}{T^a_{seca\ exterior} - T^a_{saturación\ adiabática\ exterior}} \times 100 \quad (10)$$

Por otro lado, el tiempo de paso del flujo de aire por el relleno húmedo provocará que este se humedezca más o menos; asimismo, la humedad relativa que posea a la entrada determinará

también la capacidad de absorber más o menos agua; finalmente, su temperatura también será un valor influyente, pues está directamente relacionada con la humedad relativa que, a su vez, determinan la capacidad de absorción de agua que el aire posee. Es por ello por lo que se puede decir que la eficiencia a saturación depende del caudal (directamente relacionado con la velocidad), la temperatura y la humedad relativa.

A continuación, se muestran en las figuras 30, 31 y 32, la dependencia de la eficiencia en función de la temperatura seca exterior, la humedad relativa exterior y la depresión de bulbo húmedo (DBH), respectivamente.

La DBH queda definida como la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo para unas determinadas condiciones, puede considerarse como una medida de “potencia” del sistema; y le sigue la ecuación (11):

$$DBH = T^a_{seca\ exterior} - T^a_{entrasaturación\ adiabática\ exterior} \quad (11)$$



Figura 30: Eficiencia a saturación en función de la temperatura exterior

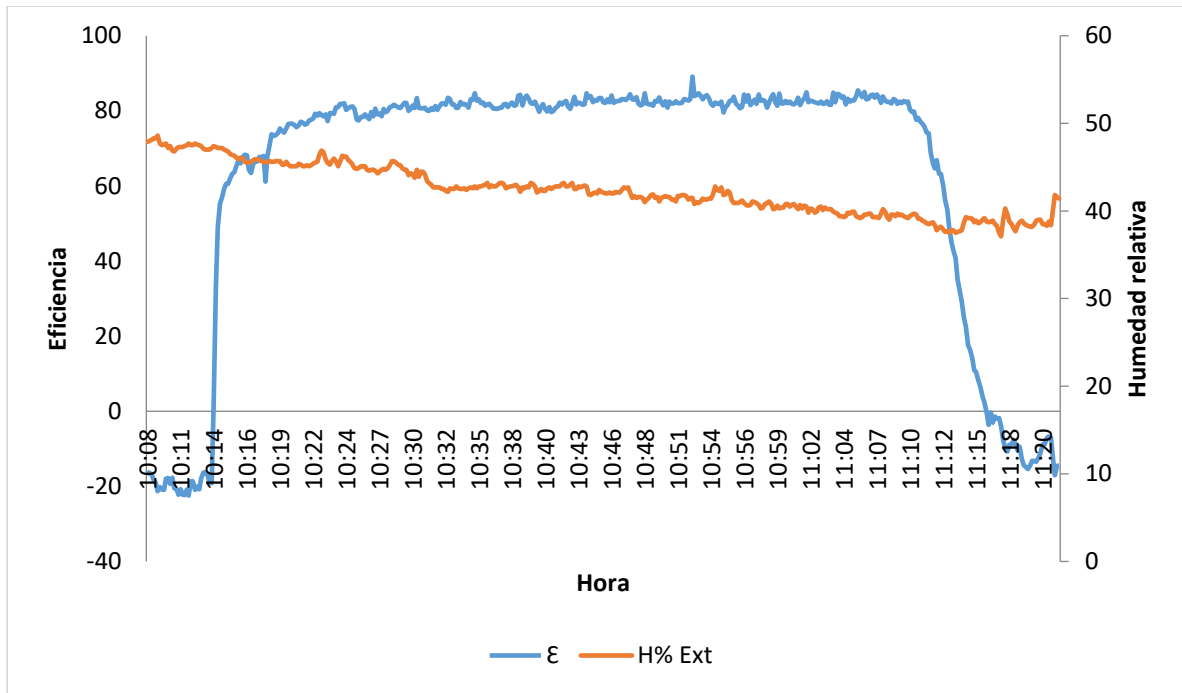


Figura 31: Eficiencia a saturación en función de la humedad relativa exterior

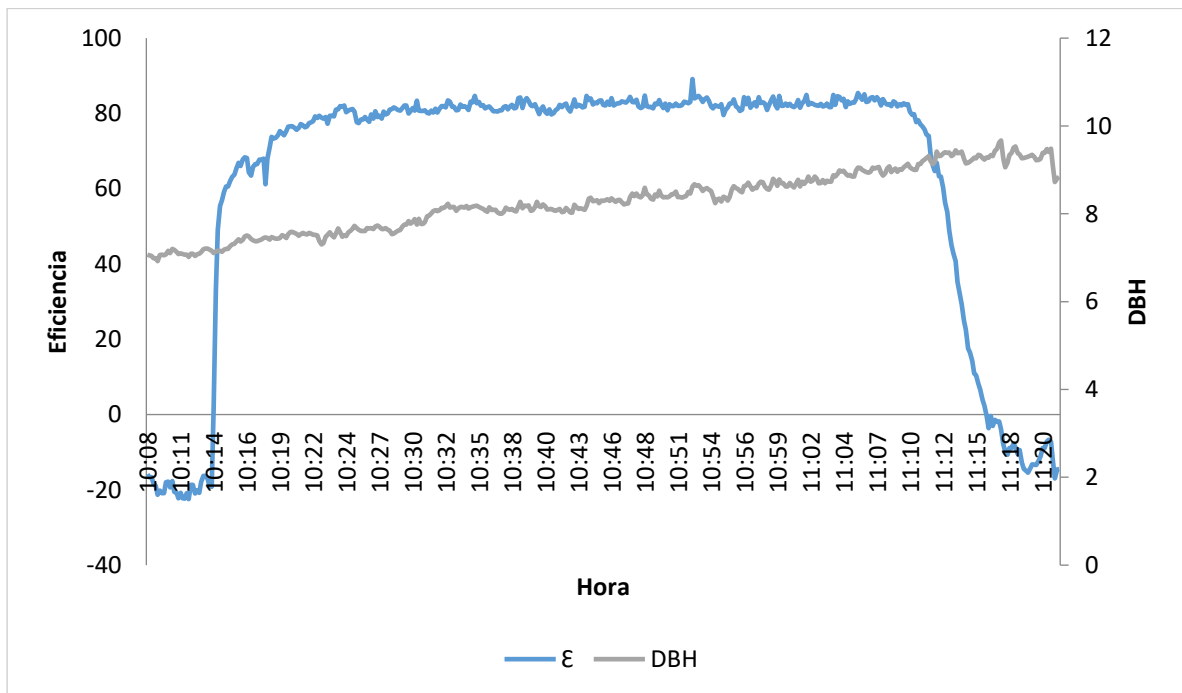


Figura 32: Eficiencia a saturación en función de la depresión de bulbo húmedo

Observando las tres gráficas previas, puede verse que, para cualquiera de las tres variables analizadas, ante un cambio notable en ellas, la eficiencia permanece inapreciablemente variable. La explicación de este hecho es sencilla: si la temperatura exterior aumenta, la diferencia de temperaturas y la DBH también lo harán, pues la temperatura de impulsión se mantiene constante en 16-18°C. Con ello, tanto el numerador como el denominador de la eficiencia de saturación están variando de tal forma que una variación se compensa con la otra provocando, así, que el valor de la eficiencia se mantenga cuasi-estable independientemente de las condiciones exteriores. Puede comprobarse en el apartado II de los anexos que este hecho se repite para todos los ensayos.

Otro detalle que quizás pueda llamar la atención al lector es el valor negativo que toma esta variable al inicio y al final del ensayo. Simplemente es debido a que el interior se encuentra a mayor temperatura que el exterior. En la tabla 7 puede apreciarse cómo la temperatura de la sonda situada en la UTA (en equilibrio con el interior de la estancia al inicio) es mayor que la exterior.

Tabla 7: Datos de la sonda exterior y dentro de la UTA

| Hora | T^a seca exterior (°C) | T^a seca UTA (°C) |
|-------------|---|------------------------------------|
| 10:08:50 | 22,6 | 23,8 |

Si recogemos los datos de todas las eficiencias para cada uno de los siete ensayos, cuyos caudales de aire se muestran en la tabla 8, y los representamos en función del caudal, nos queda:

Tabla 8: Datos recopilados de la eficiencia de saturación de los ensayos

| ENSAYO | $\bar{\epsilon}$ | $\bar{\sigma}$ | Q l/s |
|---------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------|
| 1 | 82,1 | 1,465751645 | 1390 |
| 2 | 83,5 | 1,759856039 | 1400 |

| | | | |
|---|------|-------------|------|
| 3 | 85,3 | 0,822180252 | 1400 |
| 4 | 80,8 | 0,808954256 | 1000 |
| 5 | 87,3 | 1,943933547 | 1000 |
| 6 | 81,0 | 1,071902697 | 1000 |

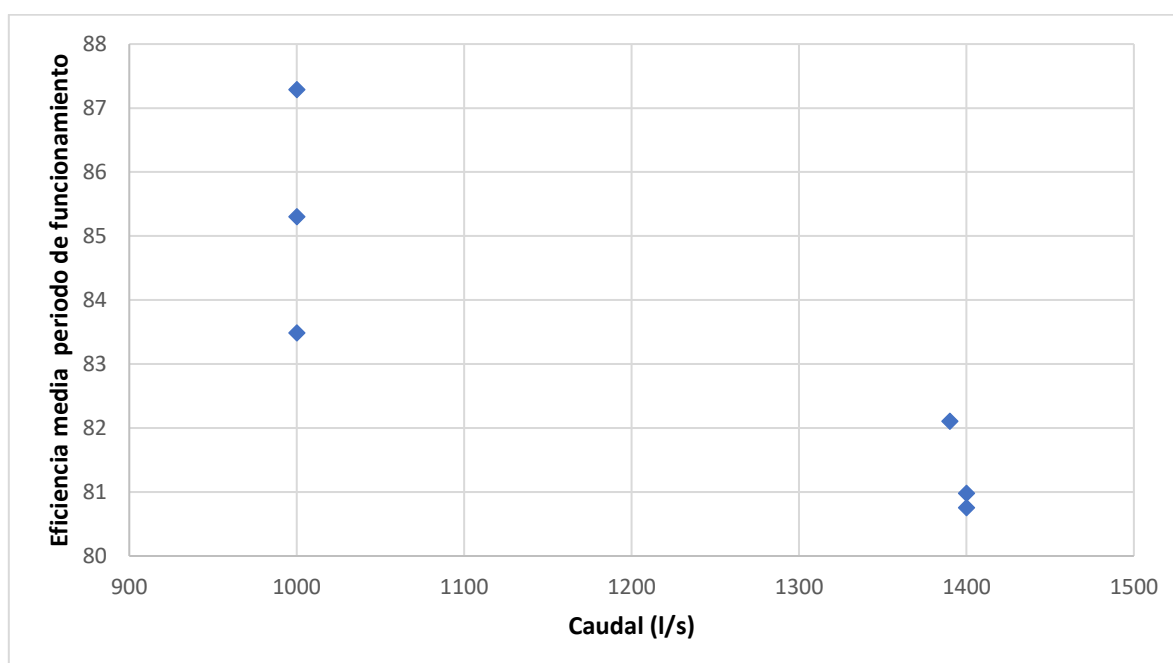


Figura 33: Eficiencia media de cada periodo de funcionamiento en función del caudal

La figura 33 muestra los valores medios de la eficiencia para cada ensayo en función de la temperatura exterior.

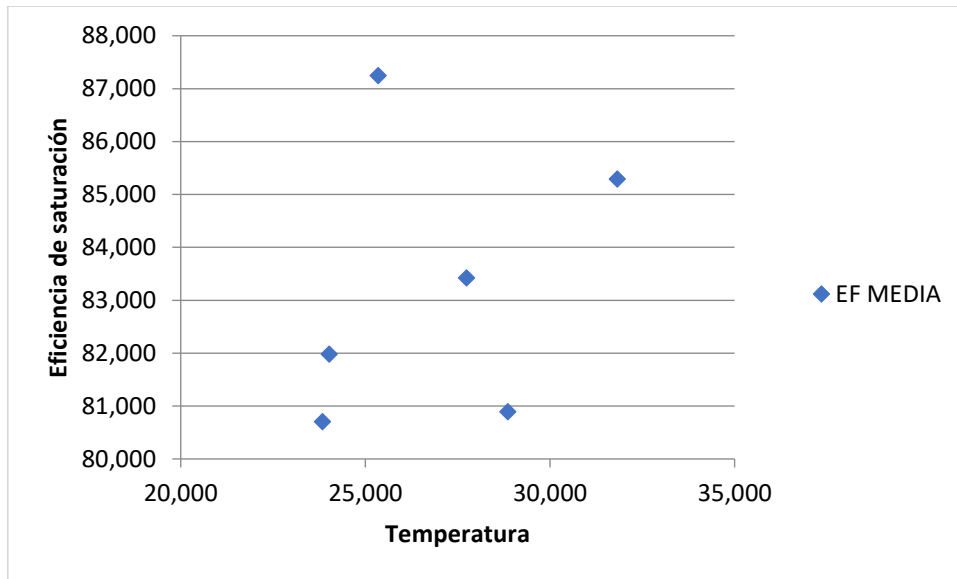


Figura 34 Eficiencia media de cada ensayo en función de a temperatura media exterior

Puede apreciarse en la figura 34 cómo la variación del caudal afecta muy notablemente al valor de la eficiencia. Como ya se comenzaba a deducir en el inicio del capítulo, a mayor caudal, mayor será la velocidad del flujo que atraviesa la celulosa húmeda. Si la velocidad es muy alta, el tiempo de permanencia del aire atravesando la zona húmeda, será bajo y provocará que el aire se humedezca menos. Con ello, la eficiencia será menor.

Por otro lado, en la figura 35 se observa que el valor de la eficiencia no llega en ningún momento a ser completamente estable, de ahí que hablemos de *periodo de funcionamiento*.

El periodo transitorio del inicio comienza cuando la eficiencia de saturación comienza a ser positiva.

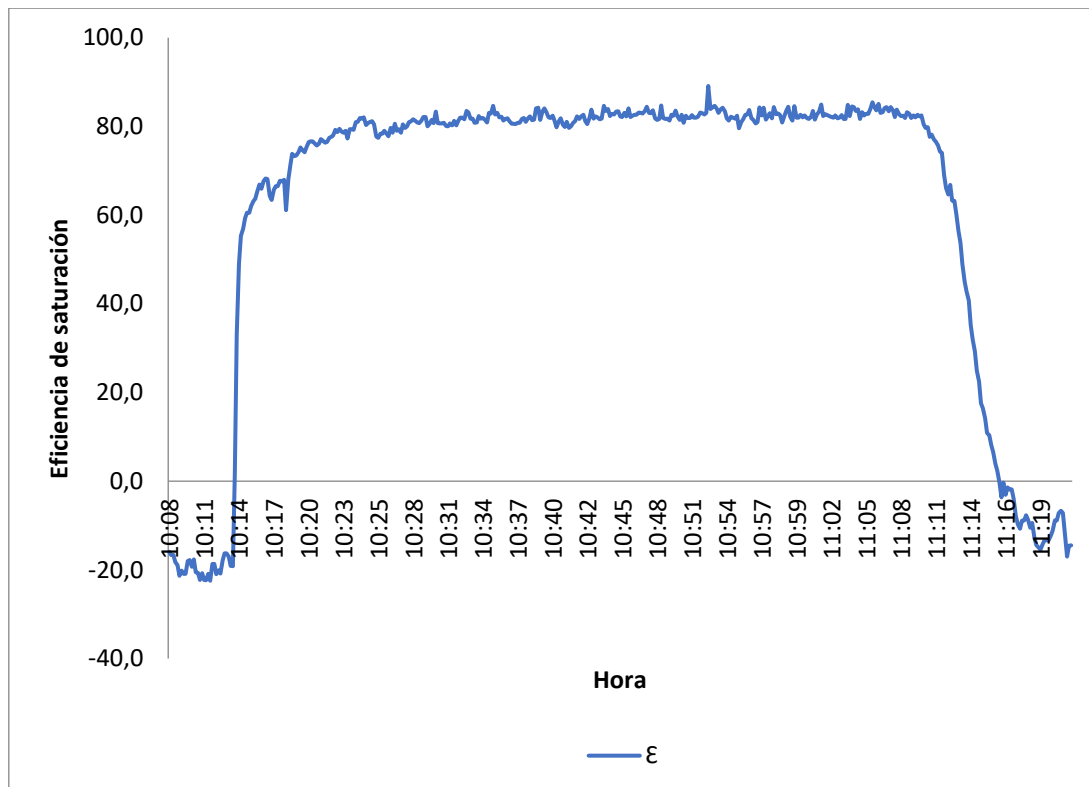


Figura 35: Eficiencia de saturación en función del tiempo

En vista a los resultados obtenidos, se observa que el sistema de enfriamiento evaporativo directo con relleno de celulosa responde de manera positiva cuanto mayor es la temperatura exterior, lo que se traduce en un aumento de la eficiencia cuanto más extremas son las condiciones exteriores (en refrigeración).

Por otro lado, para hallar el punto de inicio del periodo de funcionamiento, se consideraron dos posibilidades:

- Mediante la moda: puesto que es el valor que más se repite, se podría considerar que se trata del valor de referencia durante el periodo de funcionamiento. Para ello, se calculó la moda de la eficiencia de saturación de todos los valores de ensayo. Con este valor y la función buscar, se estableció el inicio y el fin del periodo para el primer valor de la moda y el último, correspondientemente. Los resultados de este método se muestran en la tabla 9.

Tabla 9: Datos para el cálculo del periodo de funcionamiento mediante la moda

| Método 1 | ε funcionamiento |
|-------------------|------------------------------|
| Media | 82,10 |
| Máximo | 89,12 |
| Desviación típica | 1,465751645 |
| Moda | 81,73500 |
| Hora de inicio | 10:24:10 |

- Acotando un periodo de funcionamiento: para ello, se consideró un periodo entre las 10:30 y las 11:08, en donde, mirando la figura 10, se sabía seguro que la maquina estaba a régimen. Se halló el promedio de los valores de la eficiencia en ese rango y se estableció que se resaltasen las celdas de la eficiencia durante el ensayo que fuesen mayor o igual a este valor. Con ello, se determinó la hora de comienzo del periodo de funcionamiento como aquella a partir de la cual había dos celdas consecutivas de la eficiencia resaltadas, dando lugar a los datos que se recogen en la tabla 10, en donde cabe destacar que el valor de la hora final del periodo ya se estableció mediante otro método.

Tabla 10: Datos para el cálculo del periodo de funcionamiento mediante el método 2.

| | | | |
|-------------------|---------------------|--------------------------------|------------|
| Método 2 | Periodo considerado | Condición $\epsilon \geq 82,4$ | |
| Media | 82,4 | | 82,1027043 |
| Desviación típica | 1,279298812 | | |
| Horario | 10:30:00-11:08 | 10:33:00 | 11:10:00 |

Finalmente, se consideró más apropiado el segundo método, pues es más conservador y riguroso, ya que el valor que más se repite no es necesariamente el más representativo del periodo, sino que, al fluctuar tanto, es simplemente por el que más pasa.

Para el resto de los ensayos, se aplicó del mismo modo ambos métodos y se comprobó la fiabilidad del escogido.

3.3 Capacidad de enfriamiento

La capacidad de enfriamiento, *Cooling Capacity* (CC), se trata de un valor que nos indica la potencia obtenida al depender del flujo másico y la diferencia de temperaturas, como puede verse en la ecuación (12)

$$CC = \dot{m} C_{p_v}(T^a_{salida} - T^a_{entrada}) \quad (12)$$

En donde $C_{p_v}=1,9 \text{ kJ}/(\text{kg}_v \cdot ^\circ\text{C})$ valor según Lazzarin, es el calor específico del vapor; \dot{m} es el flujo másico obtenido a través de la ecuación 13:

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_e} \quad (13)$$

La figura 36 muestra la evolución de la capacidad de enfriamiento para el primer ensayo en función de la temperatura exterior.

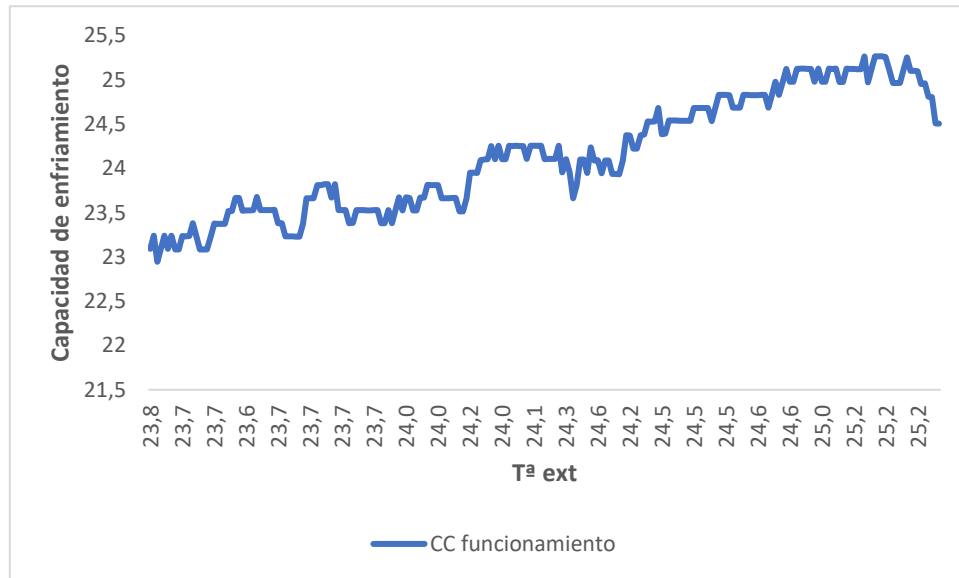


Figura 36: Capacidad de enfriamiento en función de la temperatura exterior

Se aprecia una dependencia directa con el aumento de temperatura exterior, pues, como ya se vio, esto provoca un aumento de la diferencia de temperaturas.

Puesto que este parámetro también depende de la masa de aire, directamente relacionado con el caudal, la figura 37 muestra una gráfica del valor de la capacidad de enfriamiento media para cada ensayo en función del caudal.

Tabla 11 Análisis de la capacidad de enfriamiento

| ENSAYO | CC med | σ | Q l/s |
|--------|--------|----------|-------|
| 1 | 24,1 | 0,591 | 1390 |
| 2 | 21,4 | 0,537 | 1000 |
| 3 | 37,4 | 0,997 | 1000 |

| | | | |
|---|------|-------|------|
| 4 | 20,6 | 0,436 | 1400 |
| 5 | 21,5 | 1,241 | 1000 |
| 6 | 28,6 | 0,365 | 1400 |

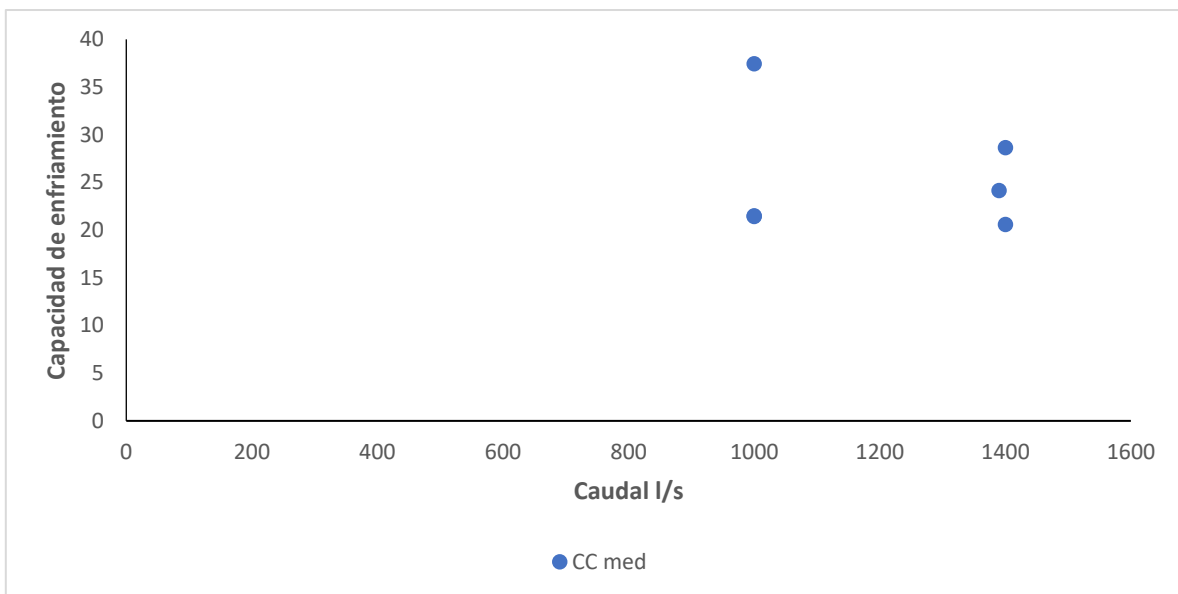


Figura 37: Capacidad de enfriamiento media para los seis ensayos

3.4 COP de frío

Otro método para analizar la eficiencia energética del enfriador evaporativo es mediante el COP de frío (*Coefficient Of Performance*). En este análisis se hablará de COP de frío o de refrigeración, pudiéndose encontrar en otras literaturas como EER (*Energy Efficiency Ratio*), ambos igual de válidos.

Es una medida del rendimiento del equipo en donde se mide la capacidad de producción de frío (dado que tratamos un enfriamiento evaporativo directo, también de humidificación del aire) con respecto a la potencia consumida en el proceso. El consumo asociado al evaporador es el proveniente de la bomba, que impulsa el agua desde el depósito hasta la parte superior del relleno;

y el ventilador que, en nuestro caso, es el situado en la UTA, que impulsa al aire a atravesar el relleno. Ambos parámetros son proporcionales al caudal que impulsan y a la pérdida de carga que sufre el flujo a su paso.

Como ya se ha visto que se trata de un proceso adiabático, existen tres maneras de analizar el poder de enfriamiento del aire:

- Considerando solamente la diferencia de entalpía del aire

$$E_{\text{útil}} = \dot{m}_{as}(h_{\text{salida}} - h_{\text{entrada}}) \quad (14)$$

Obtendríamos un valor cercano a cero pues, como se ha dicho, se trata de un proceso cuasi-adiabático (idealmente adiabático y obtendríamos cero).

- Mediante la diferencia de humedad específica, considerando la humidificación del aire.

$$E_{\text{útil}} = \dot{m}_{as}C_{p\text{aire}}(T_{\text{aire}_e} - T_{\text{aire}_s}) + \dot{m}_{as}C_L(w_e - w_s) \quad (15)$$

- Contemplando la diferencia de temperaturas; es decir, el enfriamiento sensible, pues la finalidad del equipo es provocar un cambio de temperatura en el aire.

$$E_{\text{útil}} = E_{\text{enfriamiento}} = \dot{m}_{as} \cdot C_{p\text{aire}} \cdot (T_{\text{aire}_e} - T_{\text{aire}_s}) \quad (16)$$

Se considera esta opción ya que nuestro fin es enfriar el aire. Puesto que se trata de un proceso adiabático, los cálculos han realizados según la ecuación (17)

$$E_{\text{enfriamiento}} = \dot{m}_{as}C_{p\text{aire}}(T_{\text{aire}_e} - T_{\text{aire}_s}) = \dot{m}_{as}C_L(w_e - w_s) \quad (17)$$

El COP, a diferencia de la capacidad de enfriamiento, atiende, como ya se ha mencionado, al consumo de la bomba y del ventilador. Los valores tomados a continuación son estimados, con base en ensayos realizados con otros equipos evaporativos semejantes.

$$W_{\text{bomba}} = 0,1 \text{ kW}$$

$$W_{\text{ventilador}} = 0,35$$

No se puede considerar los consumos aportados por el fabricante puesto que el equipo se encuentra sobredimensionado. Es decir, el consumo real asociado al caso que nos compete es aquel debido a la pérdida de carga que supone el evaporador; asociado a la altura (considerando pérdidas del circuito), para la bomba; y al espesor del relleno, para el ventilador.

Los resultados obtenidos para el primer ensayo se muestran en la figura 38.

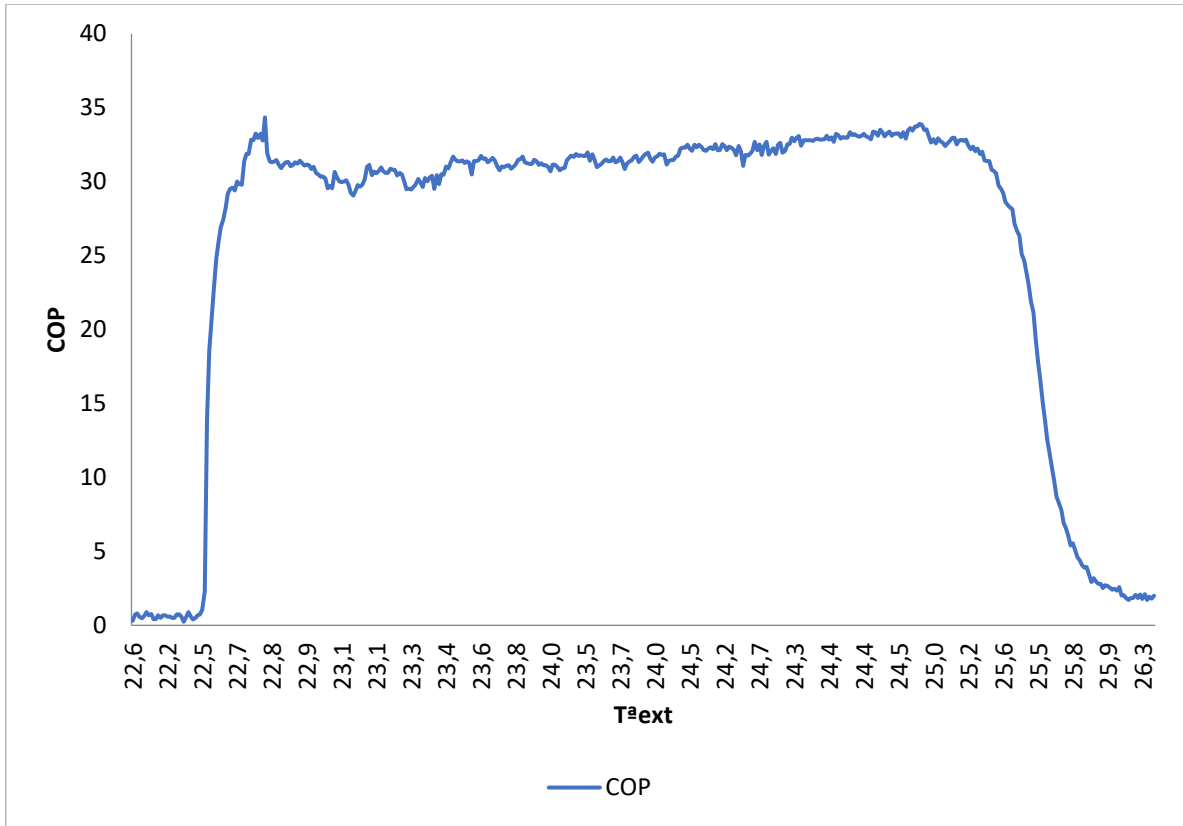


Figura 38: COP de frío en función de la temperatura exterior

3.5 Recapitulación y análisis

En la tabla 12 se recogen los resultados principales de los ensayos realizados, en donde la eficiencia, la capacidad de enfriamiento y el COP son el promedio durante el periodo de funcionamiento.

Tabla 12 Resultados de los ensayos

| Ensayo | Transitorio inicio (min) | Funcionamiento (min) | Transitorio final (min) | $\bar{\epsilon}$ (%) | \overline{CC} (kW) | \overline{COP} |
|--------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| 1 | 20 | 37 | 5 | 82,1 | 51 | 31,4 |

| | | | | | | |
|---|----|----|-----|------|------|------|
| 2 | 8 | 34 | 4 | 83,5 | 20,8 | 22,4 |
| 3 | 6 | 53 | 6 | 85,3 | 37,5 | 32,7 |
| 4 | 11 | 36 | 10* | 80,8 | 20,6 | 37,4 |
| 5 | 10 | 45 | 6 | 87,3 | 21,5 | 26,3 |
| 6 | 7 | 50 | 10 | 81 | 28,6 | 50,2 |

El análisis de los tiempos transitorios se mueve en un mismo rango de magnitud para todos los ensayos; no obstante, se puede ver que el transitorio inicial para el primer ensayo es más alto que para los demás. Esto se debe a que, como se muestra en la figura 39, existe un cambio considerablemente brusco de temperatura en poco tiempo al inicio del ensayo.

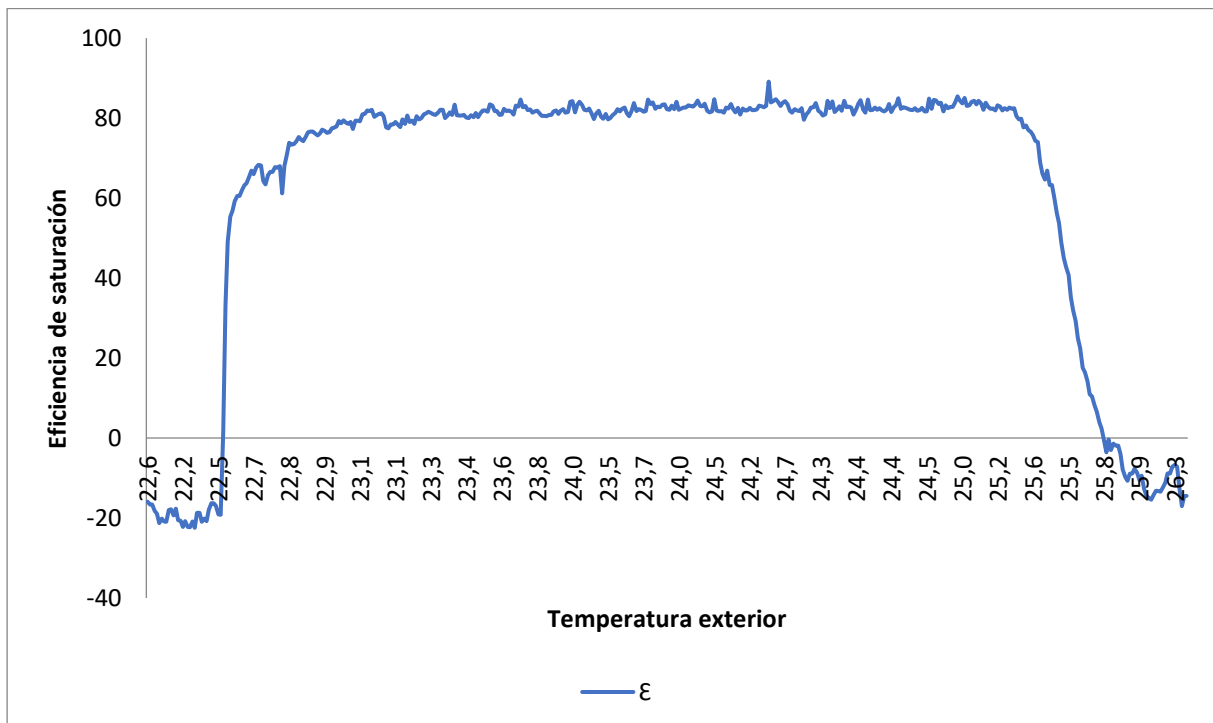


Figura 39 Eficiencia de saturación en función de la temperatura exterior para el primer ensayo

La variación del caudal influencia en dicho valor de forma que, a mayor caudal, menor es la eficiencia, pues el periodo transcurrido por el fluido en el seno del relleno es menor, lo que hace que se sature menos de vapor. Si los requerimientos de flujo de aire fuesen mayores porque, por ejemplo, la estancia a acondicionar así lo exigiese, se podría contrarrestar este fenómeno aumentando el grosor del relleno para mantener valores de eficiencia óptimos[30].

Si se compara este sistema con un Split para edificios (niveles altos de capacidad de enfriamiento) de la marca Fujitsu [31], se observa cómo el COP es del orden de 10 veces inferior al obtenido en este trabajo.

3.5.1 Situaciones significativas:

El 20 de mayo se realizaron tres ensayos a lo largo de todo el día. La particularidad de este día fue que se tuvieron distintas condiciones en menos de 24h.

Se registraron los valores de temperatura y humedad a lo largo de 12h, entre las 10 am y las 10 pm, que se reflejan en las figuras 40 y 41 respectivamente. Los dos primeros periodos significativos corresponden a dos periodos de ensayo. Por el contrario, entre las 13:19h y las 17:19h, se observa un descenso de las temperaturas y un aumento de las humedades. Este fenómeno se debe a que hubo una tormenta, en donde se ve que el enfriamiento evaporativo se debió al agua de la lluvia. A continuación, el siguiente periodo destacable se debe a otro ensayo realizado. Finalmente, se observa que, nuevamente, a partir de las 20:11h ocurre una tormenta.

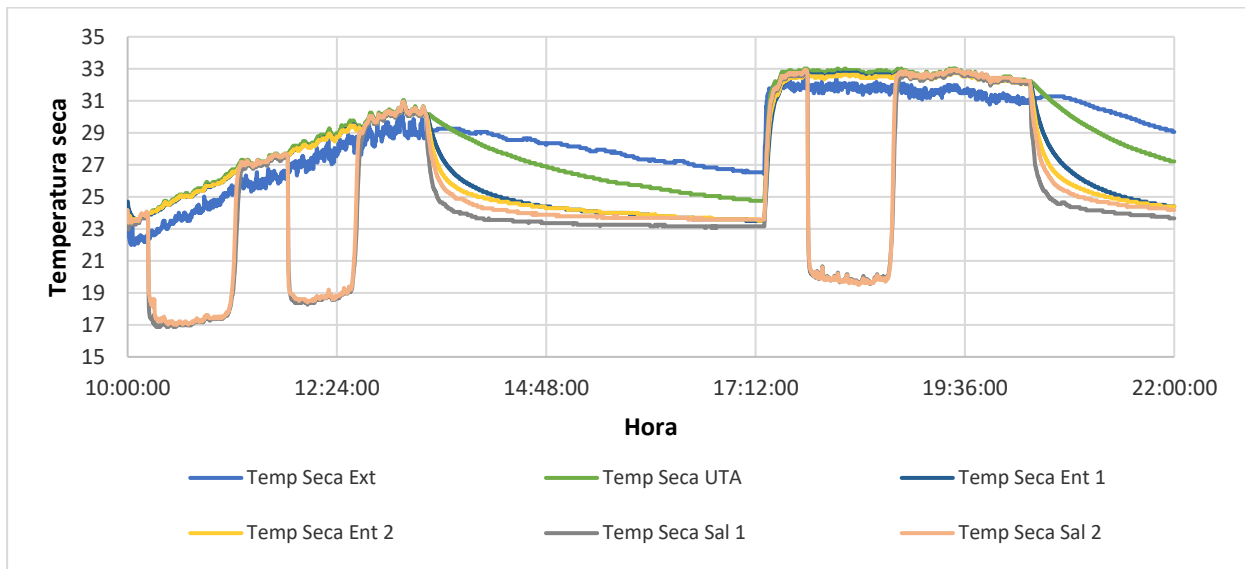


Figura 40: Evolución de la temperatura seca a lo largo de tres periodos de ensayo el 20 de mayo

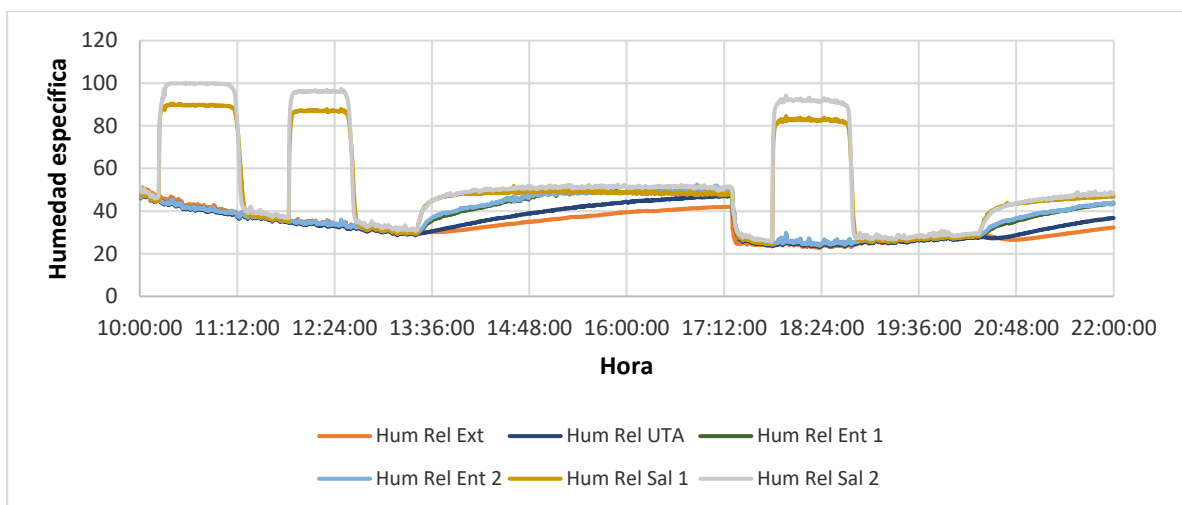


Figura 41: Evolución de la humedad relativa a largo de tres periodos de ensayo el 20 de mayo

Otro caso distinto es el que se representa en la figura 42 para la tarde del 26 de mayo.

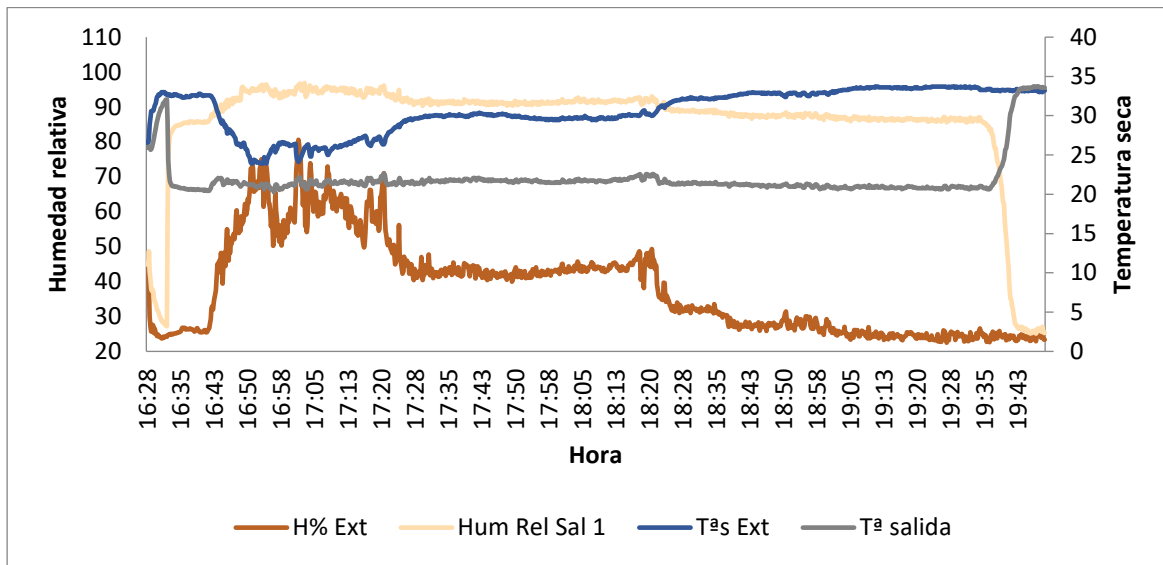


Figura 42: Evolución de la temperatura seca y de la humedad relativa. Tarde del 26 de mayo

Al inicio, se comienza la toma de datos realizando un ensayo según el procedimiento estándar definido en el capítulo anterior. Cabe destacar que, como se muestra en la tabla 13, el arranque de la bomba se da con 3 minutos de retraso, hecho que se observa gráficamente en las curvas de la temperatura y humedad de salida. Dado que a continuación comienza a llover, al igual que ocurrió anteriormente, la humedad relativa exterior aumenta considerablemente y la temperatura seca exterior, disminuye. Para analizar el comportamiento del equipo con el ventilador funcionando, se paró la bomba en el periodo en el que se dio lugar la tormenta. Se observa que la temperatura de salida permanece prácticamente invariable pues, la variación de la humedad no es del todo significativa y, en cambio, es muy próxima a saturación. Por ello, la eficiencia a saturación a lo largo de todo el periodo de recogida de datos varía tan solo en torno a valores muy cercanos, como se observa en la figura 43.

Tabla 13: Periodos representativos a lo largo de la toma de datos de la tarde del 26 de mayo

| | |
|-------|-------------------------------------|
| 16:28 | Arranque del ventilador |
| 16:31 | Arranque de la bomba |
| 16:45 | Empieza a llover |
| 16:50 | Parada de la bomba |
| 17:20 | Termina de llover |
| 17:50 | Relleno agua y arranque de la bomba |
| 18:40 | Relleno agua |
| 19:35 | Parada bomba |
| 19:45 | Apagado ventilador |

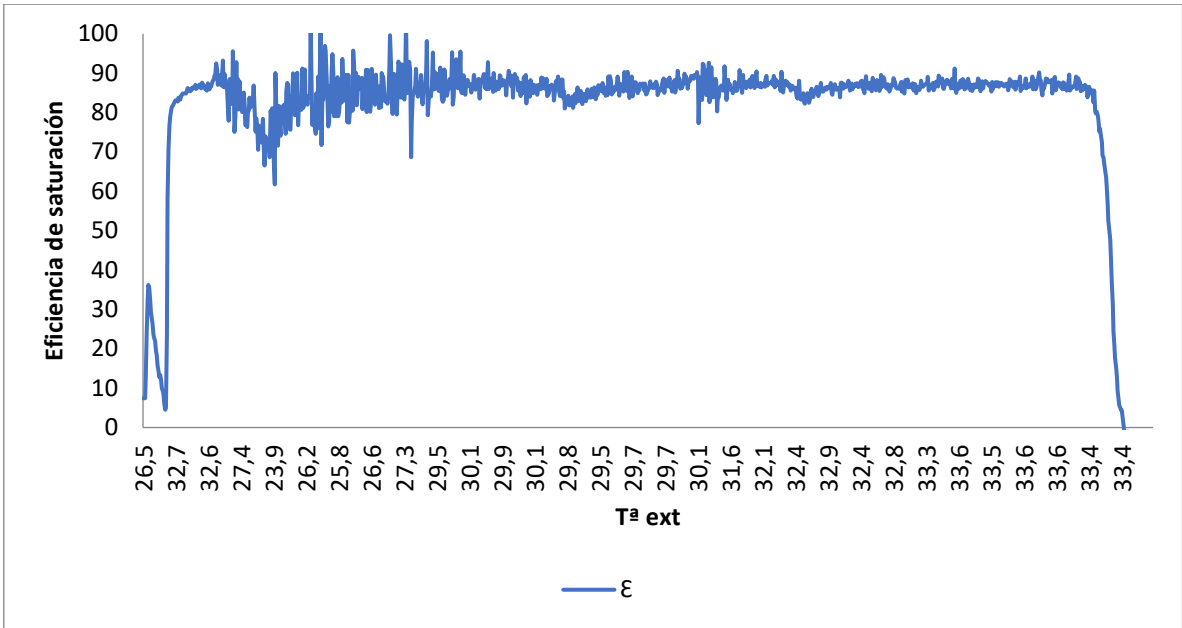


Figura 43: Eficiencia de saturación durante la toma de datos de la tarde del 26 de mayo

CAPÍTULO IV- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Las conclusiones que pueden obtenerse al final del estudio realizado son las siguientes:

- En presente estudio se diseñó un banco de pruebas que permite realizar una caracterización completa de cualquier tipo de relleno en cuanto a composición del material y espesor, así como de diferentes sistemas de distribución de agua, con control del caudal de aire y agua suministrados, y de las condiciones psicrométricas del aire.
- Del análisis del periodo transitorio se obtiene que el sistema es capaz de entrar en régimen de funcionamiento en tiempos inferiores a los 10 minutos. Asimismo, se alcanza el 50% del valor promedio durante el funcionamiento de la eficiencia de saturación y del COP antes de los primeros 5 minutos. Además, durante el funcionamiento, ninguna eficiencia ha sido inferior al 80% y los COPs han sido siempre superiores a 20, llegando a superar el 50. Ambos valores son superiores a los correspondientes en equipos de enfriamiento de aire convencionales.

Con ello, el presente trabajo deja constancia con base experimental de la idoneidad de este tipo de tecnología con un consumo energético reducido.

El análisis que se ha realizado de los periodos de ensayo, del transitorio en particular, sirve, por ejemplo, como guía a las empresas instaladoras que busquen instalar esta clase de tecnología de climatización. Con los datos obtenidos, el ventilador que requiera la instalación puede ser dimensionado y puesto en marcha con la automatización ajustada a la potencia que han de transmitir. Conociendo el comportamiento durante el periodo transitorio, se facilitará también la elección del ventilador que se necesite frente a otras alternativas, como la pulverización o inyección de vapor, pues se conoce el tiempo que requiere el relleno para secarse del todo gracias al ventilador. Del mismo modo, este estudio proporciona una guía de cara a cumplir con las normas de mantenimiento de la legionella.

Ante la presente necesidad de descarbonización energética global y de reducción de impacto medioambiental, el enfriador evaporativo presenta numerosas ventajas. Si bien lo primero queda demostrado con los altos valores del COP, lo segundo se logra puesto que este tipo de tecnología puede fabricarse con materiales respetuosos con el medioambiente y, además, no utilizan refrigerantes.

El proyecto da pie a numerosos estudios futuros que cierren la caracterización completa de los rellenos de sistemas de evaporación directa. En ellos, se podrá:

- Estudiar de la calidad del agua y el caudal de agua evaporado
- Analizar el riesgo de arrastre de gotas
- Analizar la vida útil del equipo. Observando la vida útil del relleno y todos los materiales, con especial atención a aquellos que se encuentran en contacto con el agua, desde un punto de vista económico y medioambiental, por ejemplo.
- Estudio del grosor en diferentes materiales. A pesar de que existen estudios ya realizados [32], [33] como se viene diciendo, se busca obtener una caracterización tal que la velocidad, la humedad y la temperatura hayan sido valores controlados al mismo tiempo, tanto en transitorio como durante el funcionamiento.

Bibliografía

- 1 Inarquia. (n.d.). *Programas y Fondos Europeos para Ayudas a la Eficiencia Energética*. Retrieved February 20, 2023, from <https://inarquia.es/programas-europeos-ayudas-eficiencia-energetica/>
- 2 IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. (2021). *PARA ENERGÍAS RENOVABLES EN AUTOCONSUMO, ALMACENAMIENTO, Y TÉRMICAS SECTOR RESIDENCIAL (RD 477/2021. PRTR)*. <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-energias-renovables-en-autoconsumo-almacenamiento-y-termicas-sector>
- 3 Comisión europea. (2019). *Un Pacto Verde Europeo*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es
- 4 IEA. (n.d.). *IEA – International Energy Agency*. <https://www.iea.org/>. Retrieved October 15, 2022, from <https://www.iea.org/>
- 5 Gobierno de España. (2019). *Código Técnico de la Edificación*.
- 6 Gobierno de España. (2013). *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (versión consolidada RD 1027/2007)*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-4572>
- 7 Gobierno de España. (2021). *Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-9176>
- 8 Comisión Europea. (2020, January). *Energy*. https://energy.ec.europa.eu/index_en
- 9 Comisión europea. (2019). *Un Pacto Verde Europeo*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es
- 10 European Technology and Innovation Platform on Renewable Heating and Cooling. (2020). *2050 vision for 100% renewable heating & cooling in Europe*. <https://www.buildup.eu/en/practices/publications/2050-vision-100-renewable-heating-cooling-europe>
- 11 Comisión Europea. (2020, January). *Energy poverty*. https://energy.ec.europa.eu/index_en

- 12 [Tejero González, A. (2012). *Reducción del consumo energético y emisiones de anhídrido carbónico en edificios combinando enfriamiento evaporativo, enfriamiento gratuito y recuperación de energía en sistemas todo aire*. doi.org/10.35376/10324/980
- 13 Rey Martínez, F. J. (2000). *Recuperación de energía en sistemas de climatización*. ATECYR.
- 14 Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007
- 15 Ulpiani, G. (2019). Water mist spray for outdoor cooling: A systematic review of technologies, methods and impacts. *Applied Energy*, 254, 113647. doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113647
- 16 Xuan, Y. M., Xiao, F., Niu, X. F., Huang, X., & Wang, S. W. (2012). Research and application of evaporative cooling in China: A review (I) – Research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3535–3546. doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.052
- 17 Ghani, S., Bakochristou, F., ElBialy, E. M. A. A., Gamaledin, S. M. A., Rashwan, M. M., Abdelhalim, A. M., & Ismail, S. M. (2019). *Design Challenges of Agricultural Greenhouses in Hot and Arid Environments*. 12, 48–70.
- 18 Al Assaad, D. K., Orabi, M. S., Ghaddar, N. K., Ghali, K. F., Salam, D. A., Ouahrani, D., Farran, M. T., & Habib, R. R. (2021). A sustainable localised air distribution system for enhancing thermal environment and indoor air quality of poultry house for semiarid region. *Biosystems Engineering*, 203, 70–92. doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.01.002
- 19 Tejero-González, A., & Franco-Salas, A. (2021). Optimal Operation of Evaporative Cooling Pads: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 151.
- 20 Watt, J. R., & Koral, R. L. (1986). *Evaporative air conditioning handbook*. Chapman and Hall.
- 21 Crook, B., Willerton, L., Smith, D., Wilson, L., Poran, V., Helps, J., & McDermott, P. (2020). Legionella risk in evaporative cooling systems and underlying causes of associated breaches in health and safety compliance. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 224, 113425. doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113425
- 22 Kumar, S., Singh, J., Siyag, J., & Rambhatla, S. (2020). Potential Alternative Materials used in Evaporative Coolers for Sustainable Energy Applications: A Review. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 28(04), 2030006. doi.org/10.1142/S2010132520300062

- 23 MUNTERS. (2021). *Munters FA6 Evaporative humidifier and cooler for optimal performance*.
https://www.munters.com/globalassets/inriver/resources/10569_Munters_FA6_Data_Brochure_en.pdf
- 24 Mano a Mano. (n.d.). *Mano a Mano*. Mini Bomba de Agua Sumergible Con Motor Sin Escobillas. Retrieved January 11, 2022, from <https://www.manomano.es/p/mini-bomba-de-agua-sumergible-con-motor-sin-escobillasdc-12v-lift-5m-800l-h-13674335>
- 25 ebmpapst. (2015, October 1). *EC centrifugal module - RadiPac*.
<https://www.ebmpapst.es/es/>
- 26 Trox. (n.d.). *TROX technik*. Retrieved November 12, 2022, from <https://www.trox.es/productos-c9bb7ba0a6956fa0>
- 27 ASHRAE. (2019). *Fundamentals: Vol. chapter 1*.
- 28 Tejero, A., Esquivias Fernández, P. M., Rey Martínez, F. J., San José Alonso, J. F., Rey Hernández, J. M., & Velasco Gómez, E. (2021). *Tecnologías de enfriamiento evaporativo: hacia una climatización descarbonizada y eficiente*. CSIC.
- 29 Testo. (n.d.). *Testo*. Data Logger Testo 175 H1 - Registrador de Humedad y Temperatura. Retrieved February 11, 2022, from <https://www.testo.com/es-ES/data-logger-testo-175-h1/p/0572-1754>
- 30 Tejero-González, A., Andrés-Chicote, M., García-Ibáñez, P., Velasco-Gómez, E., & Rey-Martínez, F. J. (2016). Assessing the applicability of passive cooling and heating techniques through climate factors: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *65*, 727–742. doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.077
- 31 Toshiba. (n.d.). *Toshiba*. Mini-VRF · Aire Acondicionado Multisplit 8x1 - 10x1. Retrieved December 22, 2022, from https://www.toshiba-aire.es/mini-vrf-8x1-10x1#/60-vrf_mini-mcy_mhp0406ht_ej
- 32 Tejero, A., Esquivias Fernández, P. M., Rey Martínez, F. J., San José Alonso, J. F., Rey Hernández, J. M., & Velasco Gómez, E. (2021). *Tecnologías de enfriamiento evaporativo: hacia una climatización descarbonizada y eficiente*. CSIC.
- 33 Gunhan, T., Demir, V., & Yagcioglu, A. K. (2007). Evaluation of the Suitability of Some Local Materials as Cooling Pads. *Biosystems Engineering*, *96*(3), 369–377.
doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.12.001
- 34 Yan, M., He, S., Li, N., Huang, X., Gao, M., Xu, M., Miao, J., Lu, Y., Hooman, K., Che, J., Geng, Z., & Zhang, S. (2021). Experimental investigation on a novel arrangement of

wet medium for evaporative cooling of air. *International Journal of Refrigeration*, 124, 64–74. doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2020.12.014

- 35 He, S., Guan, Z., Gurgenci, H., Hooman, K., Lu, Y., & Alkhedhair, A. M. (2014). Experimental study of film media used for evaporative pre-cooling of air. *Energy Conversion and Management*, 87, 874–884. doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2014.07.084

ANEXOS

ANEXO I. Construcción del banco de ensayos

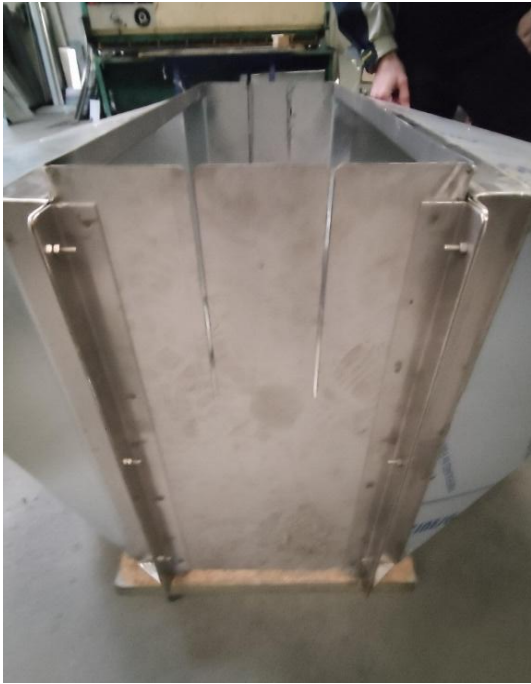


Figura 4: perspectiva lateral del evaporador sin las tapas



Figura 3: Perspectiva superior del evaporador sin las tapas



Figura 1: Cajón recoge-gotas



Figura 2: evaporador sin el soporte-estructura

ANEXO II. Gráficos de ensayos

II.I Curvas de la evolución de la humedad y de la temperatura seca

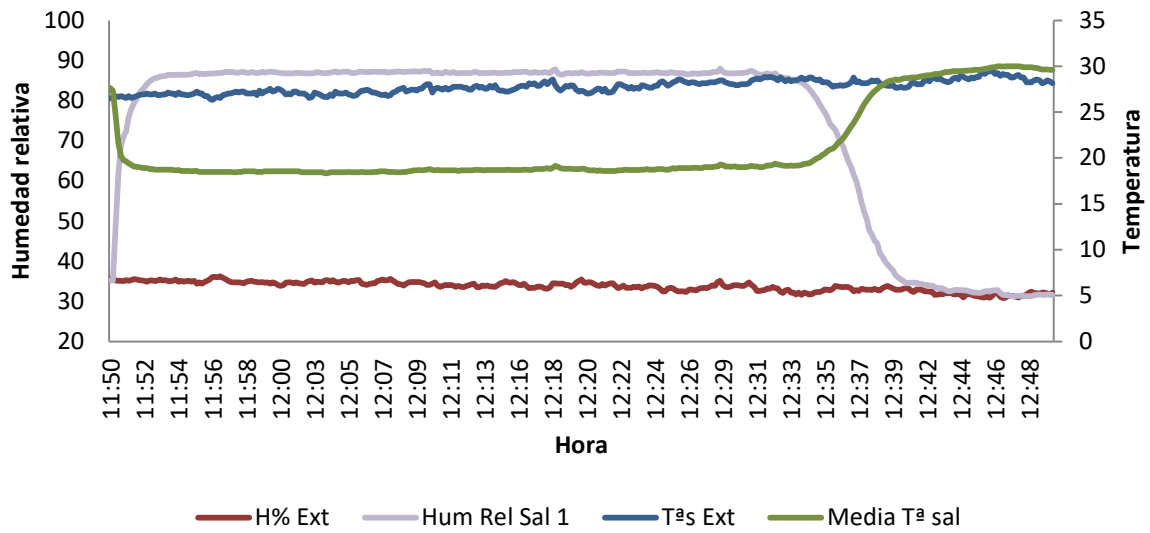


Figura 5: Humedad y temperatura. Segundo ensayo

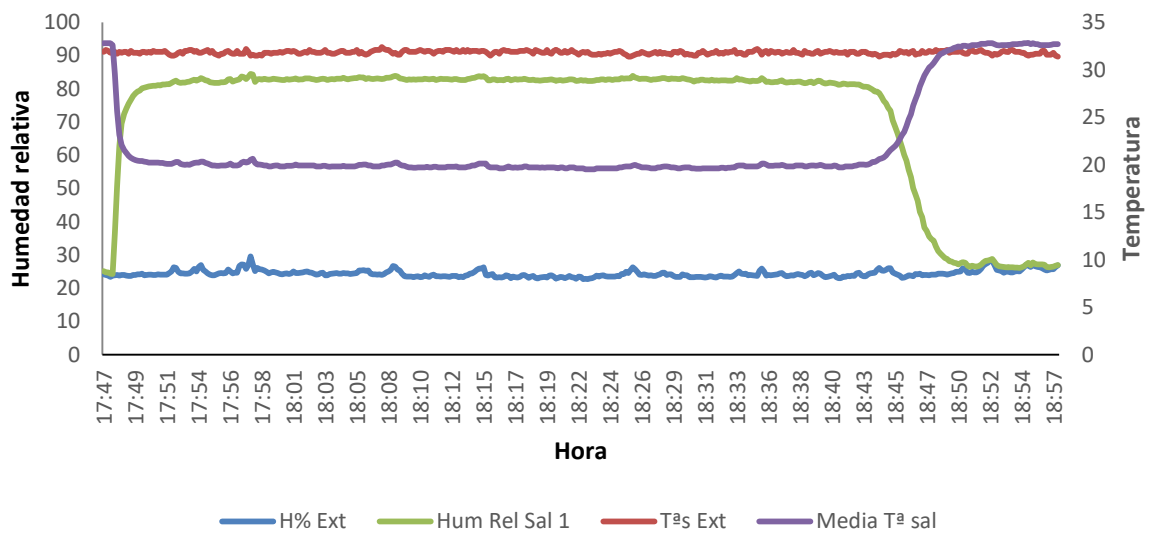


Figura 6: Humedad y temperatura. Tercer ensayo

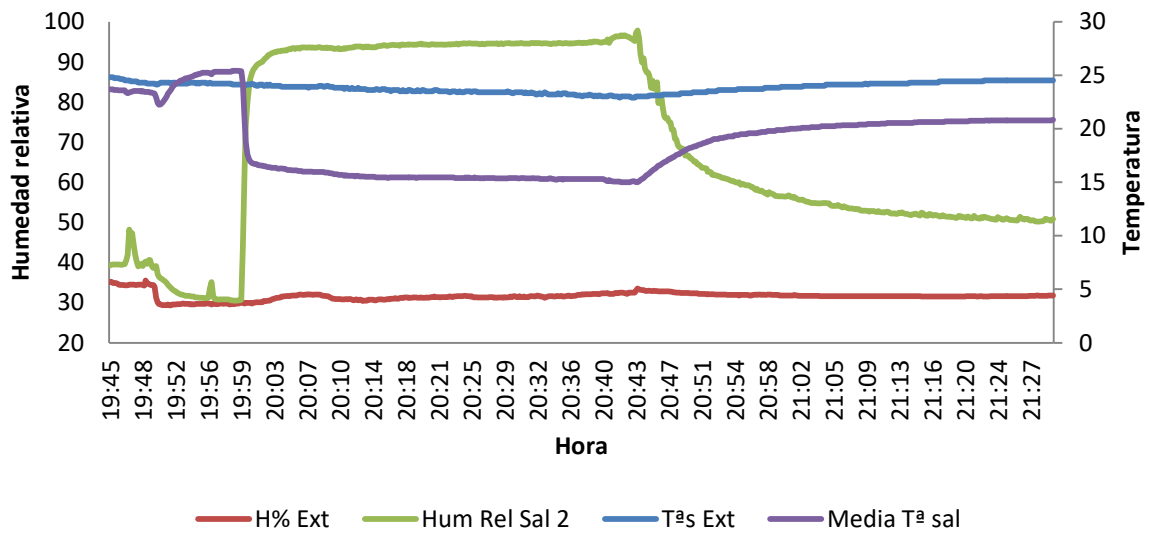


Figura 7: Humedad y temperatura. Cuarto ensayo

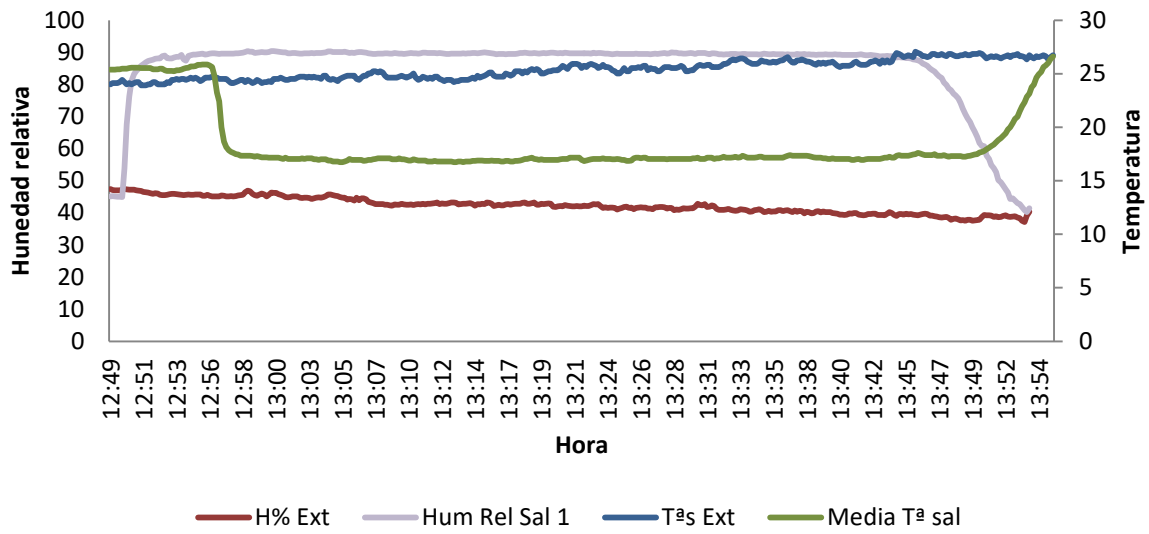


Figura 8: Humedad y temperatura. Quinto ensayo

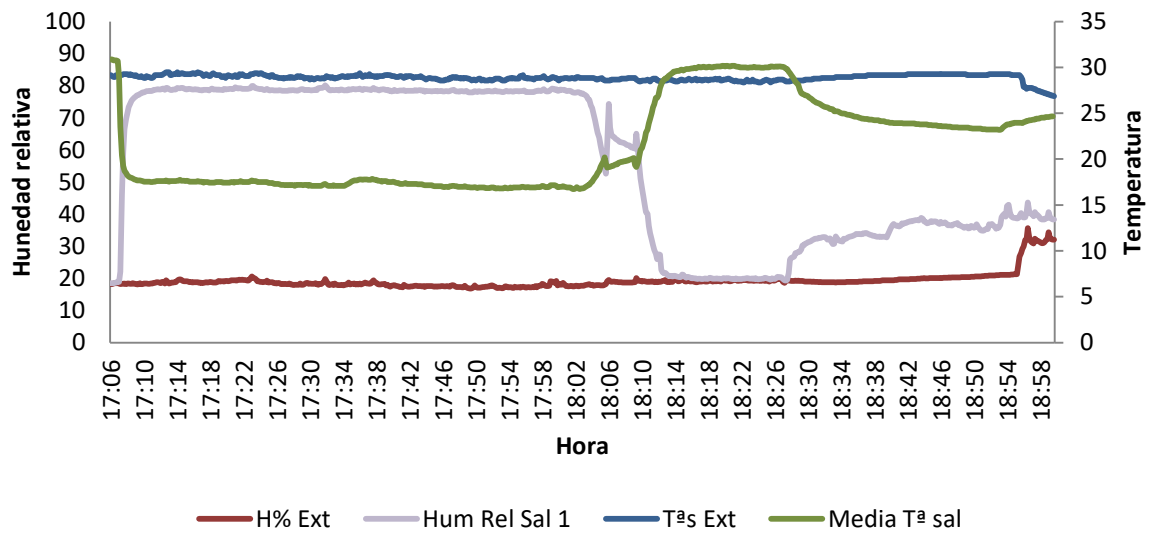


Figura 9: Humedad y temperatura. Sexto ensayo

II.II Análisis de la estratificación

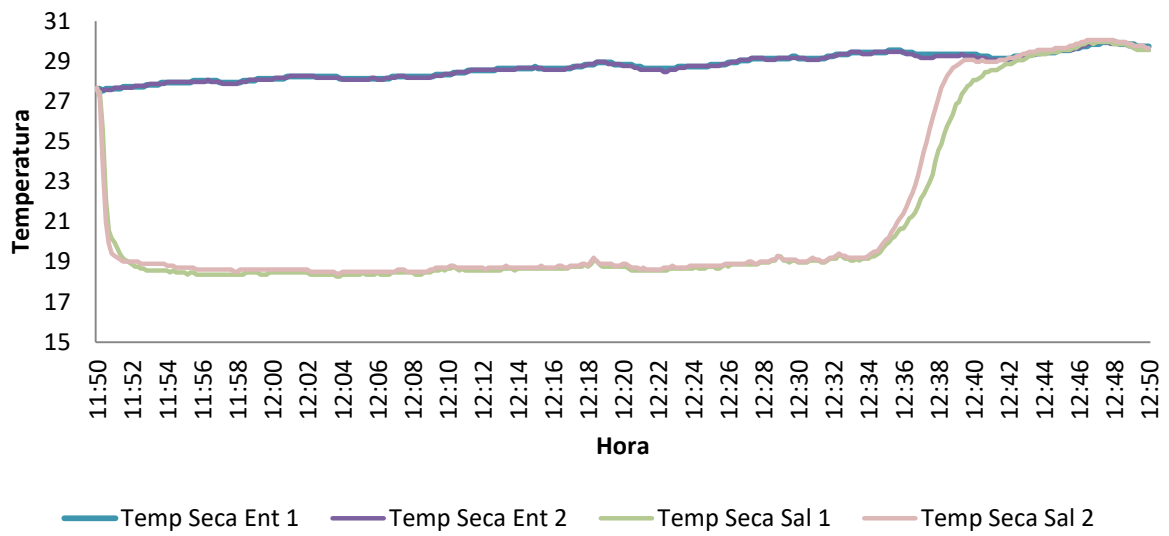


Figura 10: Estratificación. Segundo ensayo

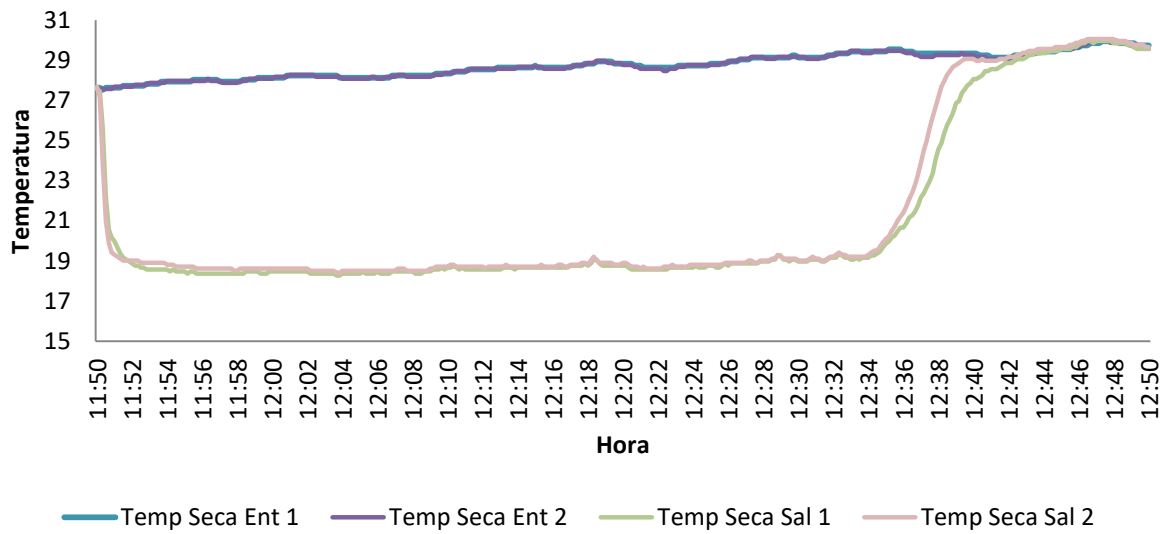


Figura 11: Estratificación. Tercer ensayo

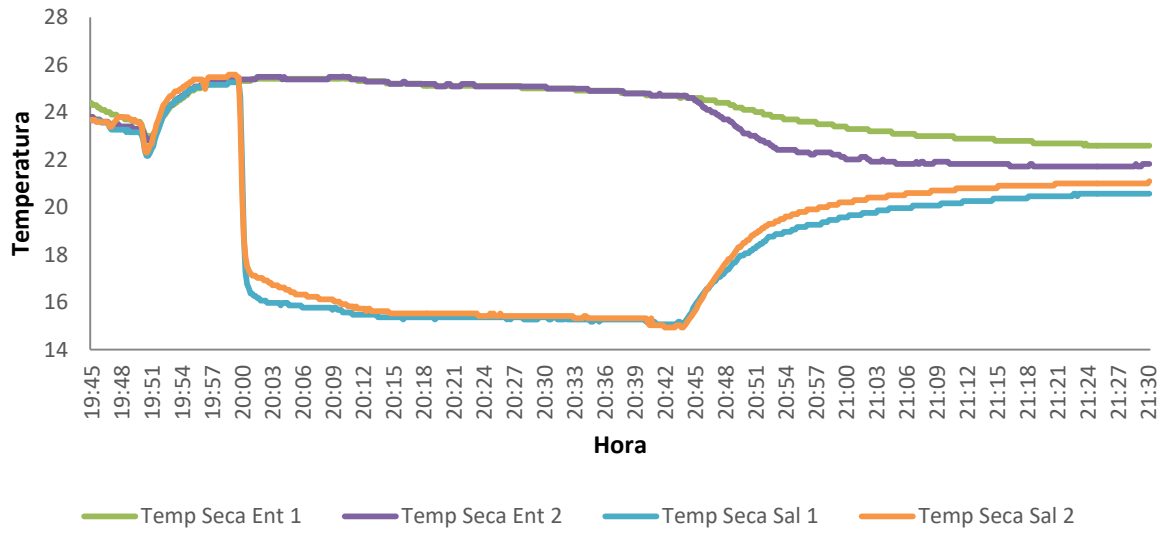


Figura 12: Estratificación. Cuarto ensayo

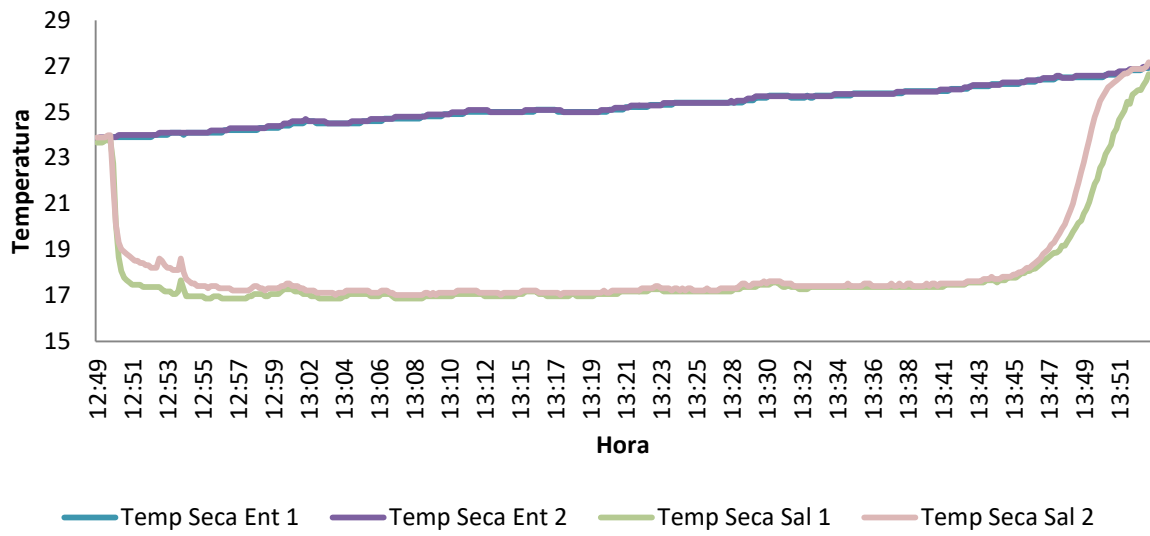


Figura 13: Estratificación. Quinto ensayo

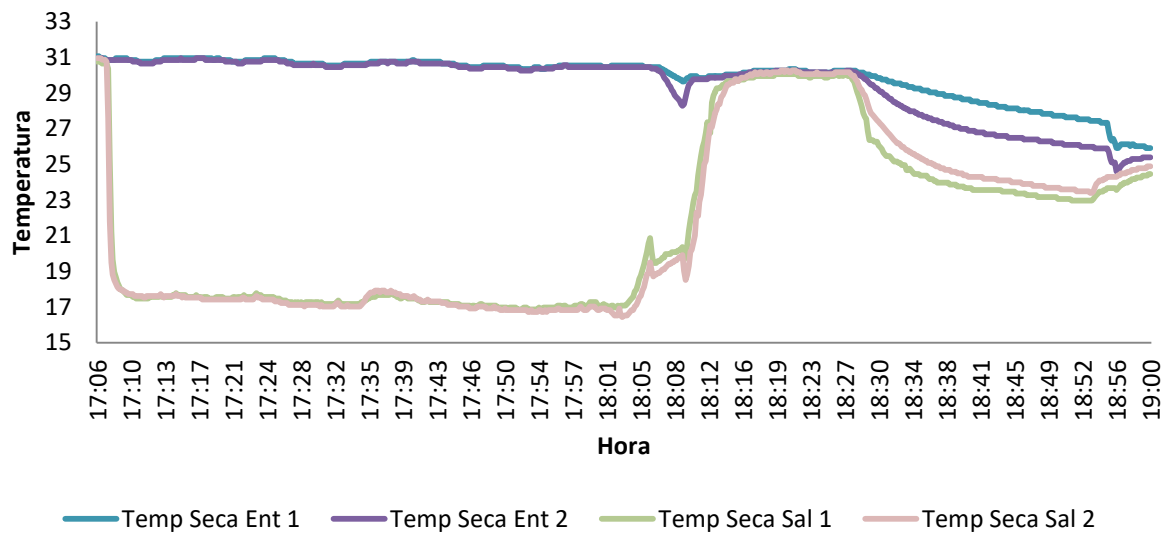


Figura 14: Estratificación. Sexto ensayo

II.III Diferencia de temperaturas durante el periodo de funcionamiento

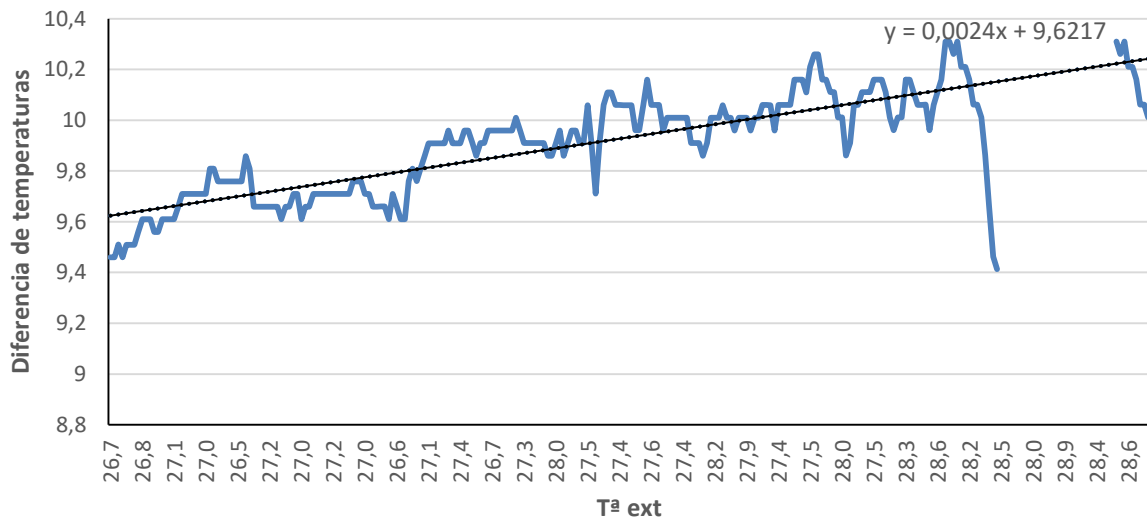


Figura 15: Diferencia de temperaturas durante el periodo de funcionamiento. Segundo ensayo

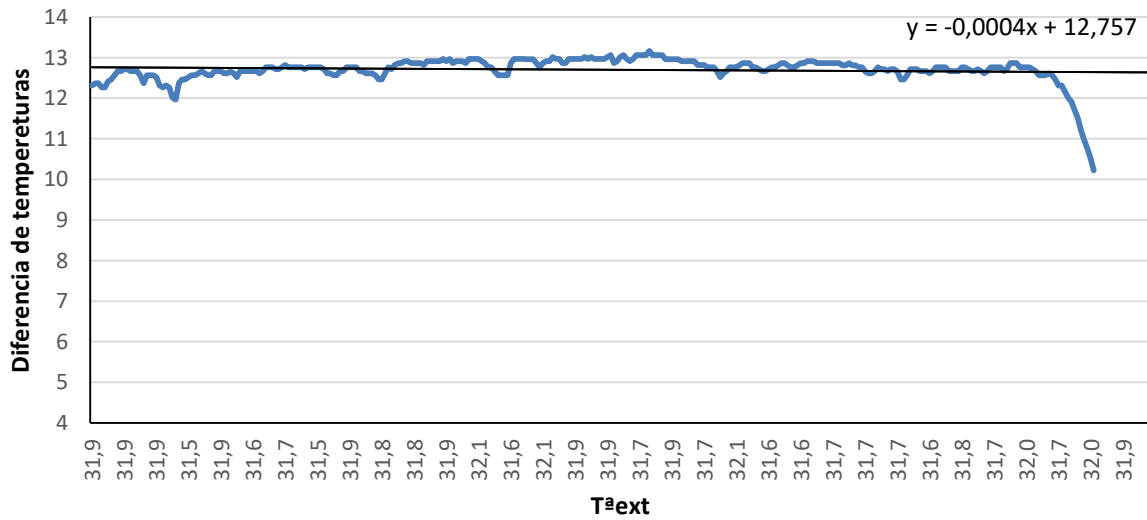


Figura 16: Diferencia de temperaturas durante el periodo de funcionamiento. Tercer ensayo

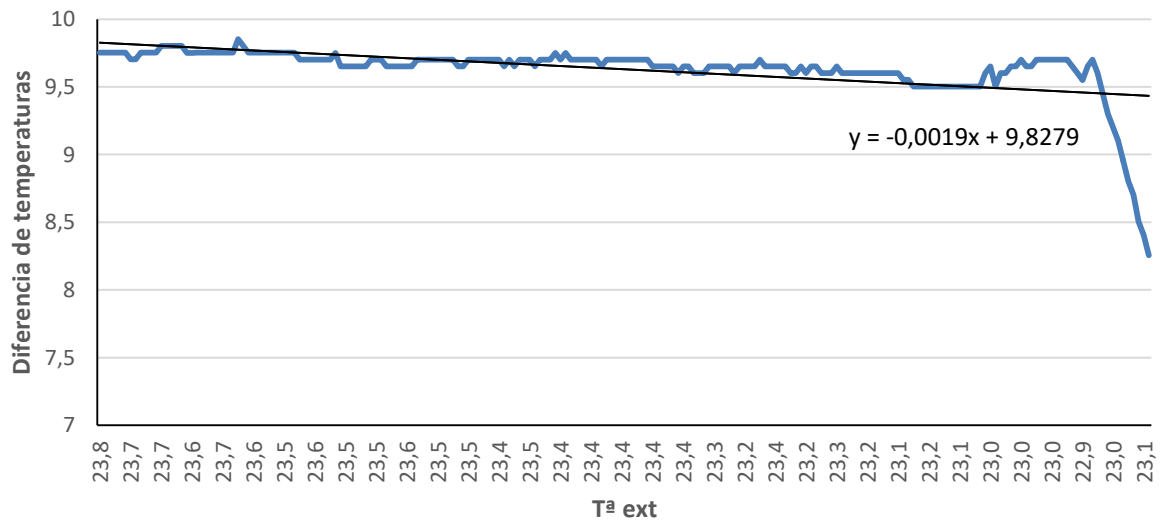


Figura 17: Diferencia de temperaturas durante el periodo de funcionamiento. Cuarto ensayo

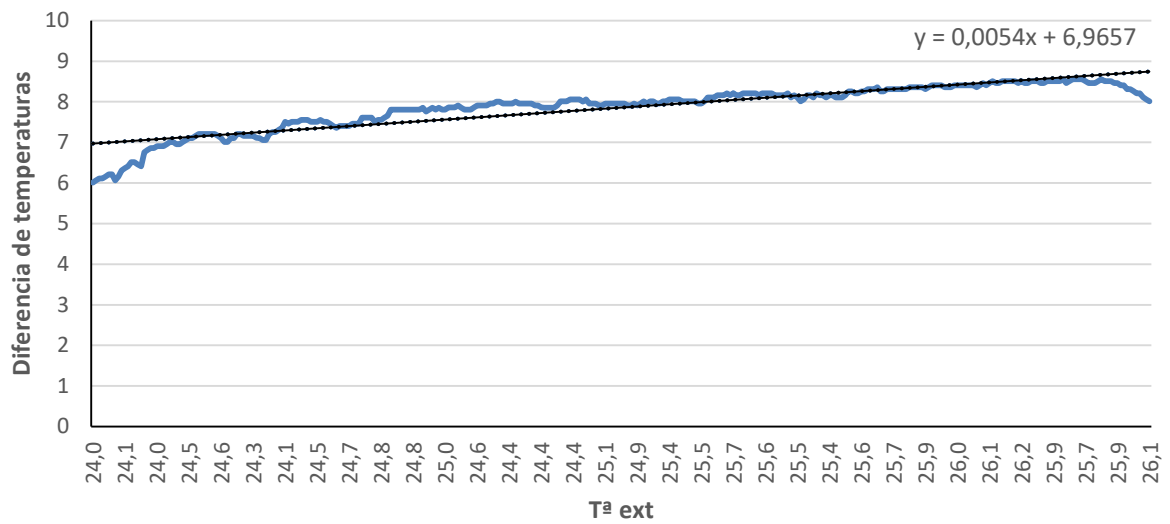


Figura 18: Diferencia de temperaturas durante el periodo de funcionamiento. Quinto ensayo

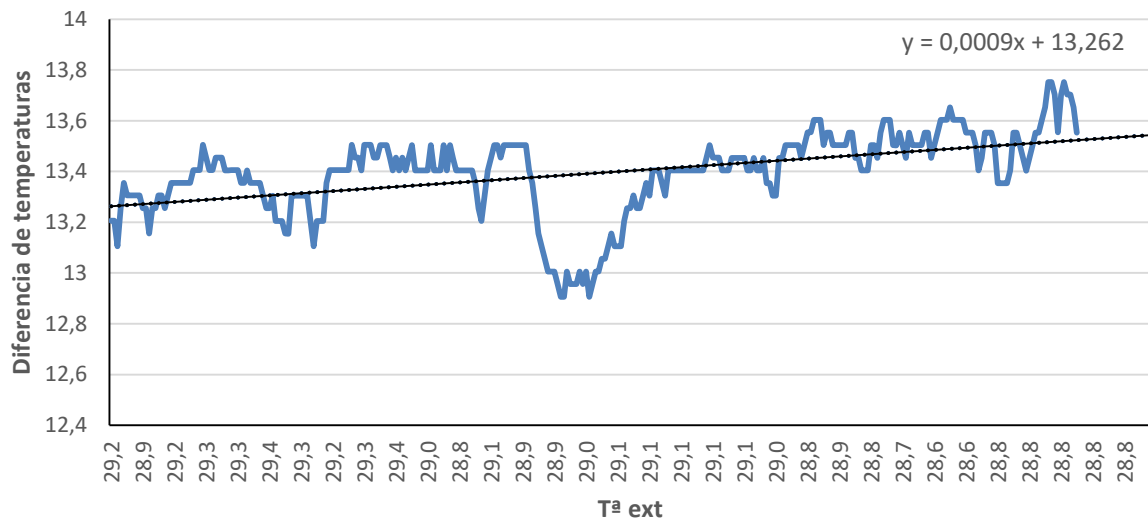


Figura 19: Diferencia de temperaturas durante el periodo de funcionamiento. Sexto ensayo

II.IV Eficiencia de saturación

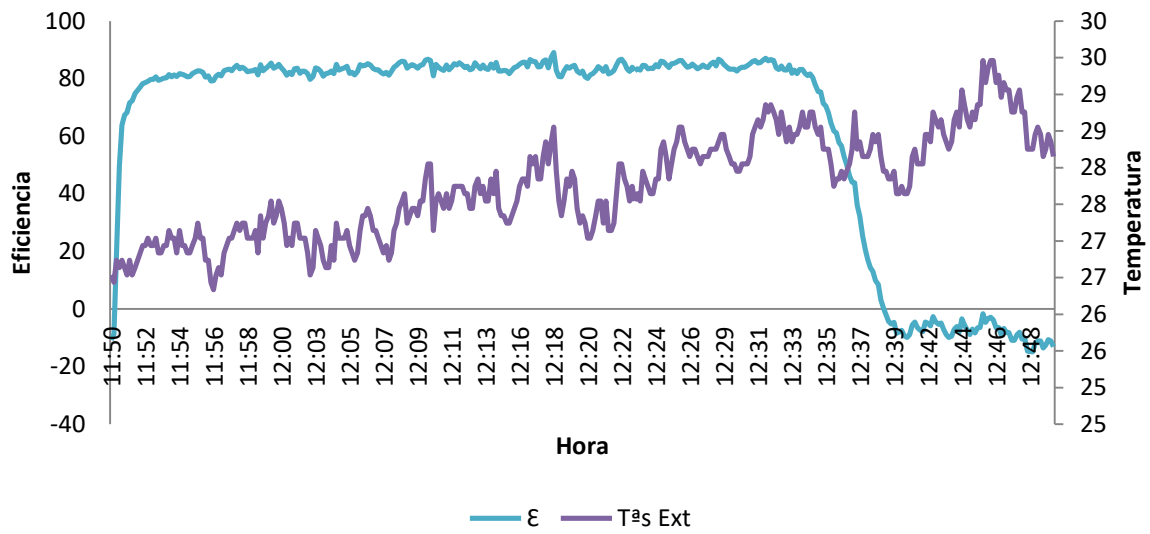


Figura 20: Eficiencia de saturación. Segundo ensayo. Temperatura

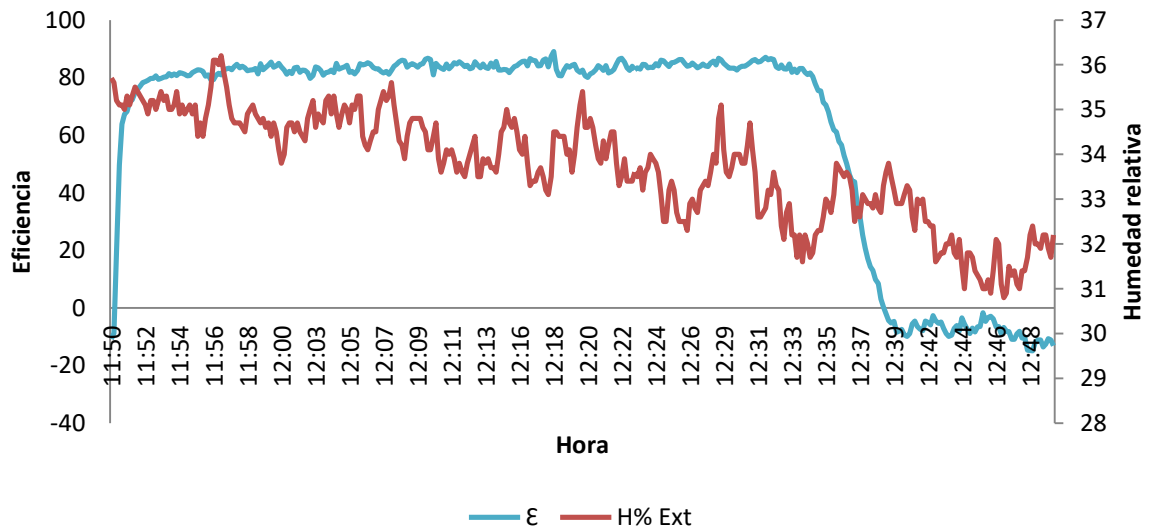


Figura 21: Eficiencia de saturación. Segundo ensayo. Humedad relativa

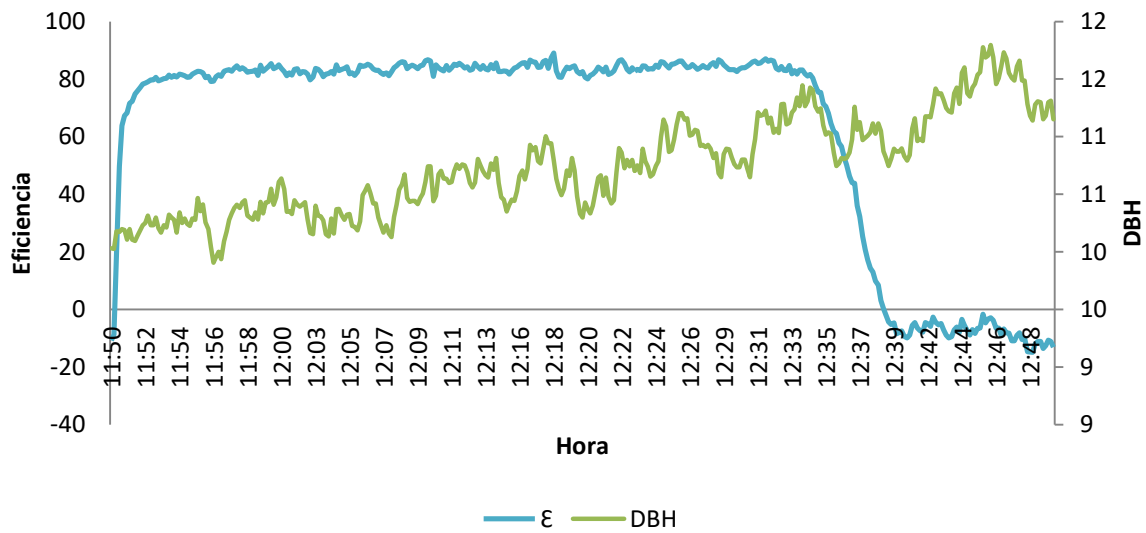


Figura 22: Eficiencia de saturación. Segundo ensayo. DBH

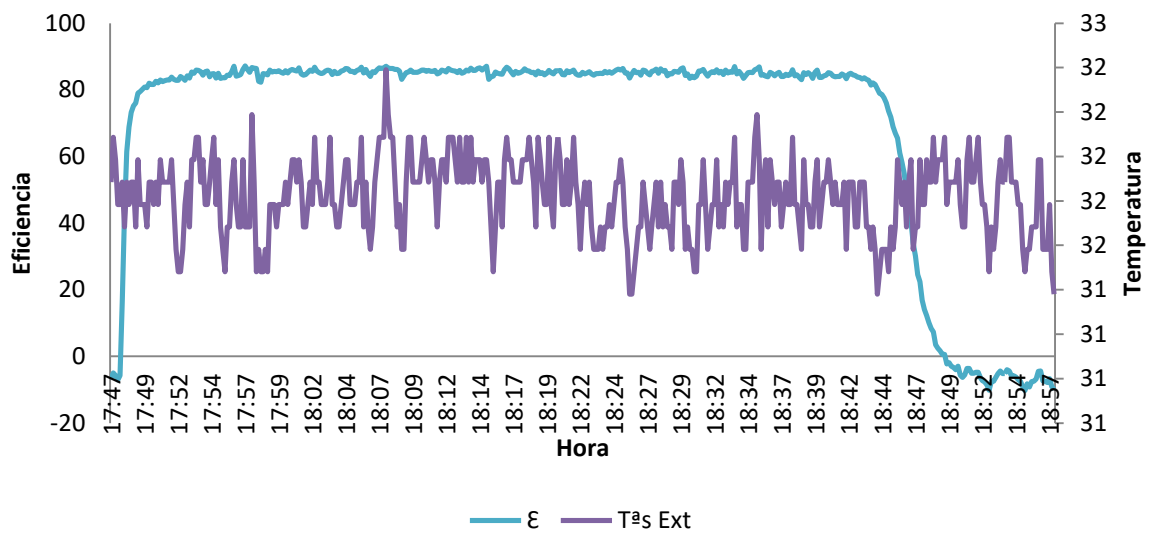


Figura 23: Eficiencia de saturación. Tercer ensayo. Temperatura

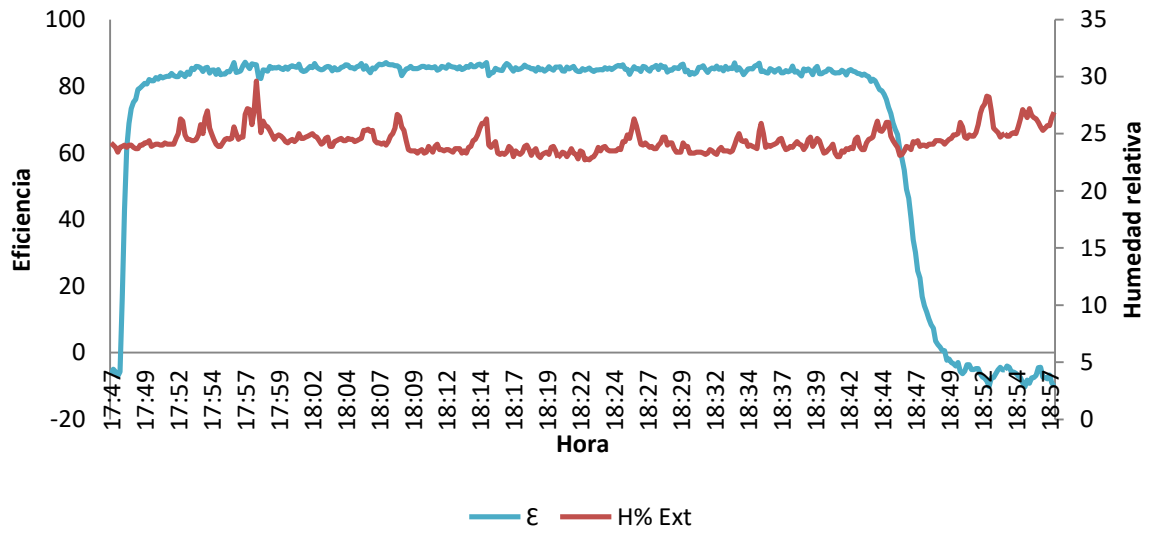


Figura 24: Eficiencia de saturación. Tercer ensayo. Humedad relativa

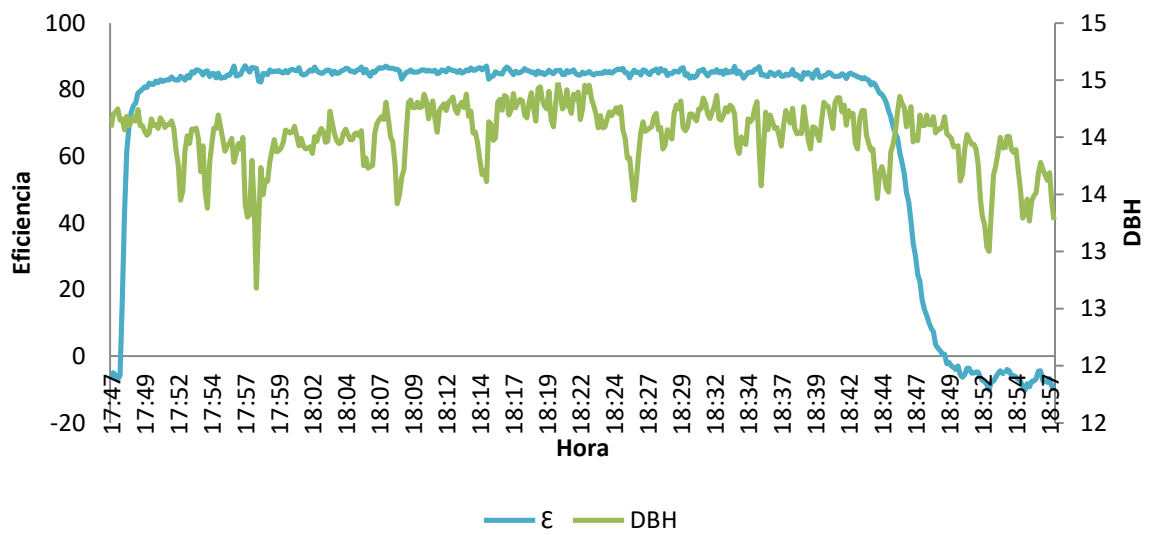


Figura 25: Eficiencia de saturación. Tercer ensayo. DBH

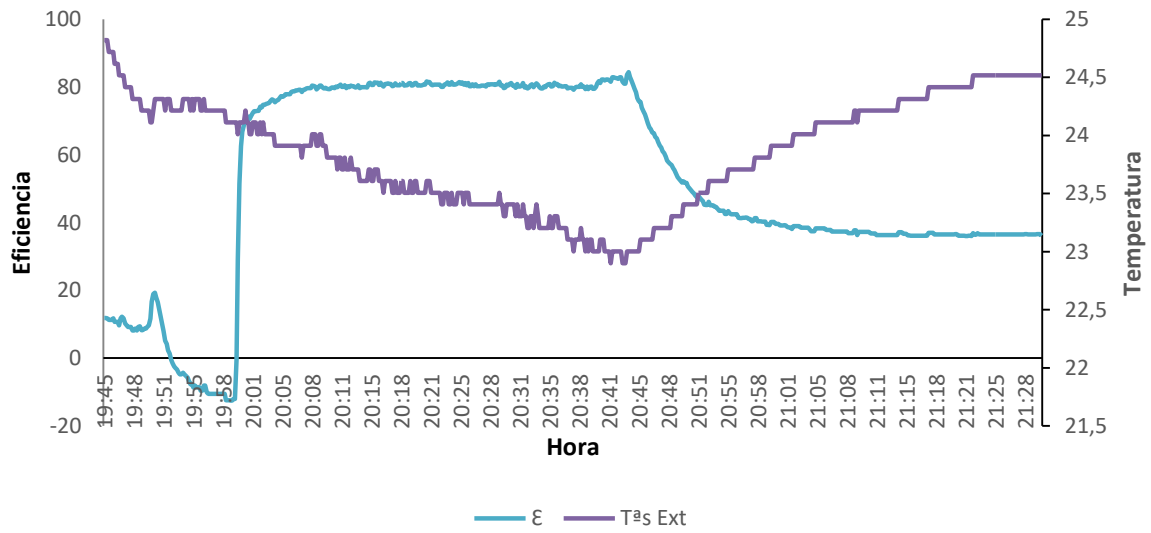


Figura 26: Eficiencia de saturación. Cuarto ensayo. Temperatura

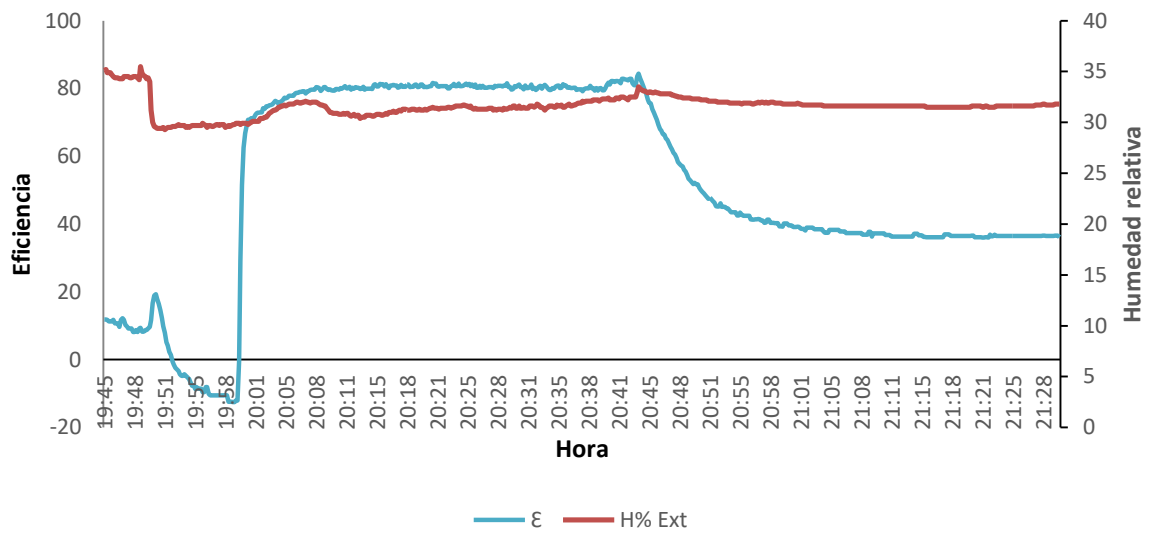


Figura 27: Eficiencia de saturación. Cuarto ensayo. Humedad relativa

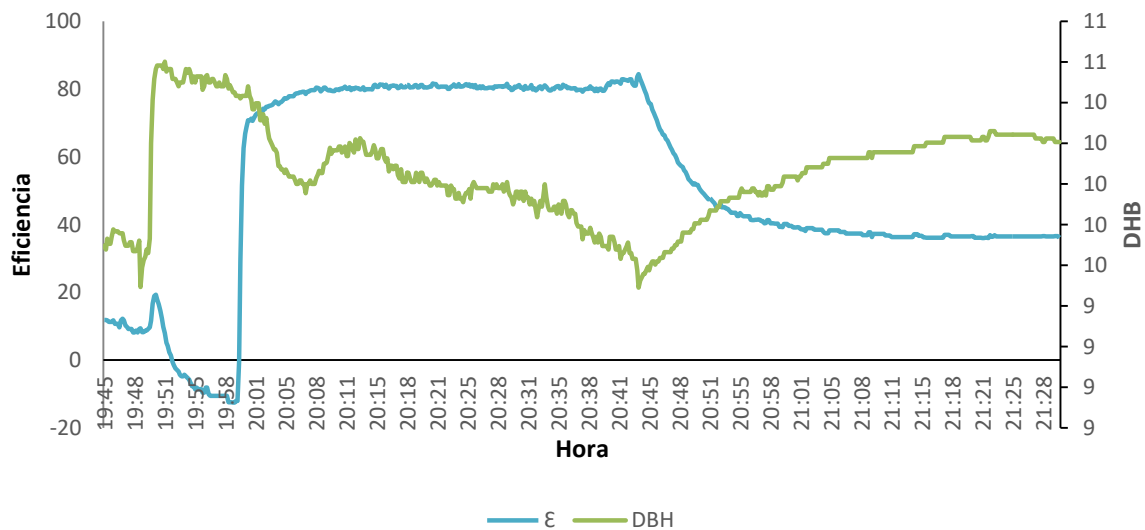


Figura 28: Eficiencia de saturación. Cuarto ensayo. DBH

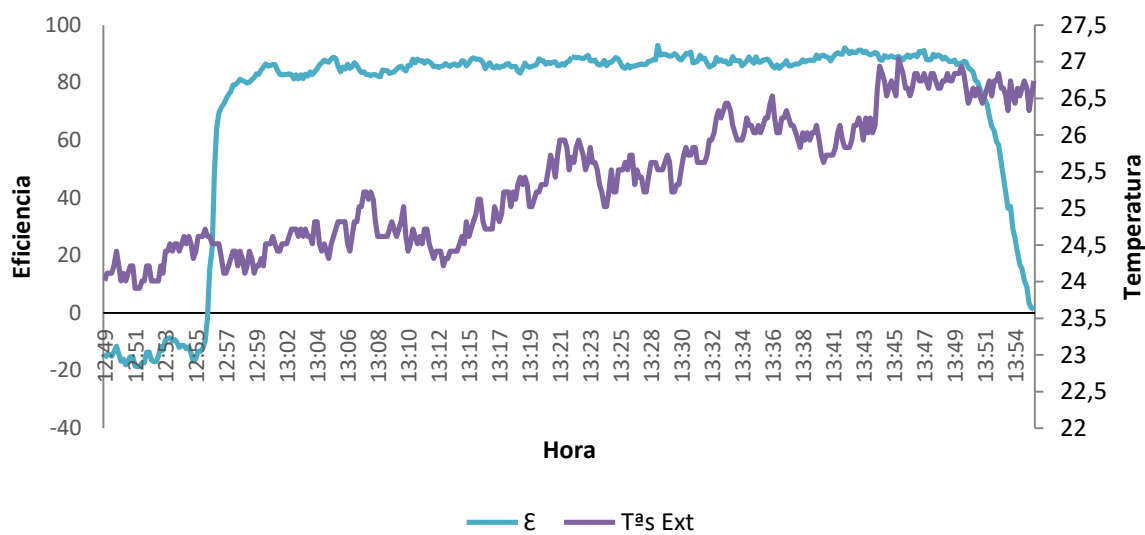


Figura 29: Eficiencia de saturación. Quinto ensayo. Temperatura

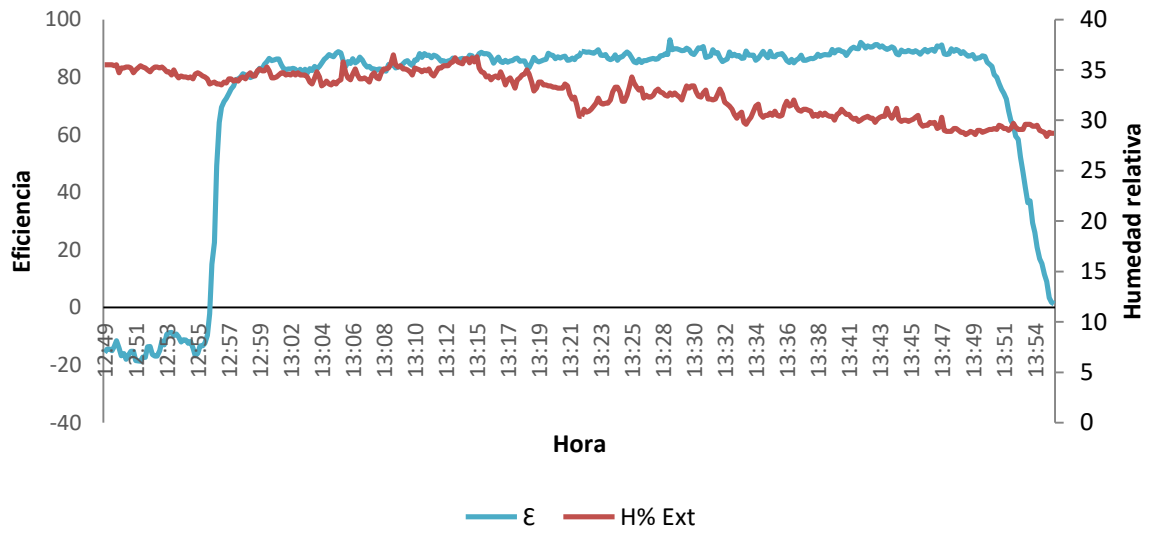


Figura 30: Eficiencia de saturación. Quinto ensayo. Humedad relativa

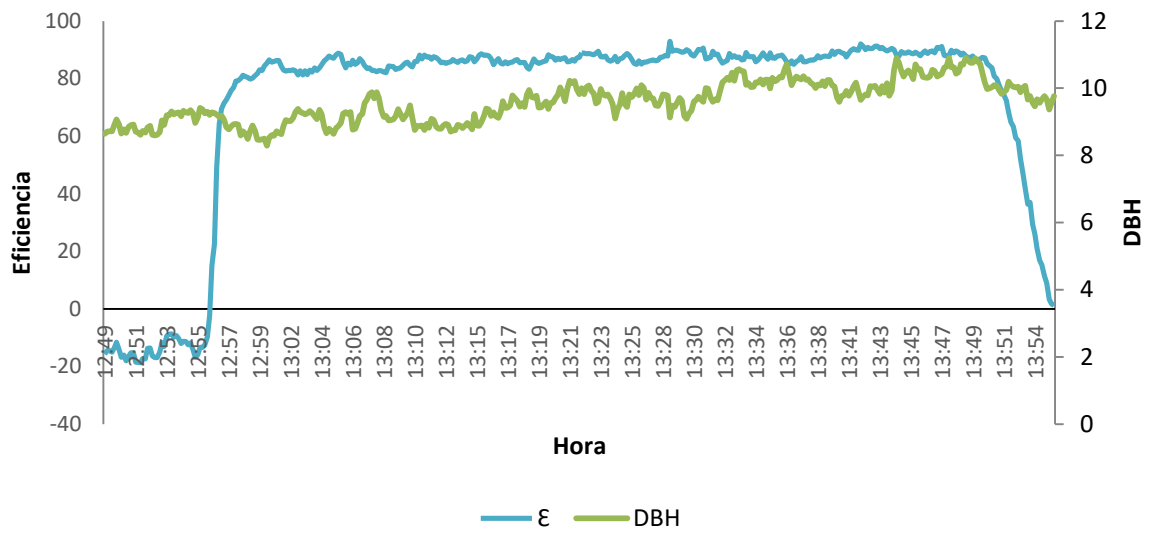


Figura 31: Eficiencia de saturación. Quinto ensayo. DBH

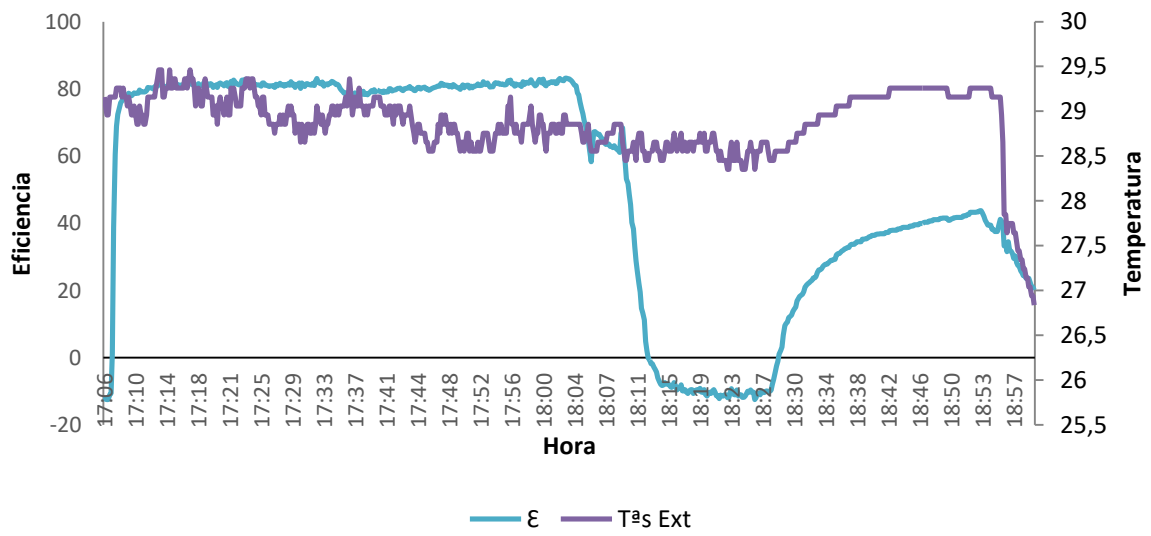


Figura 32: Eficiencia de saturación. Sexto ensayo. Temperatura

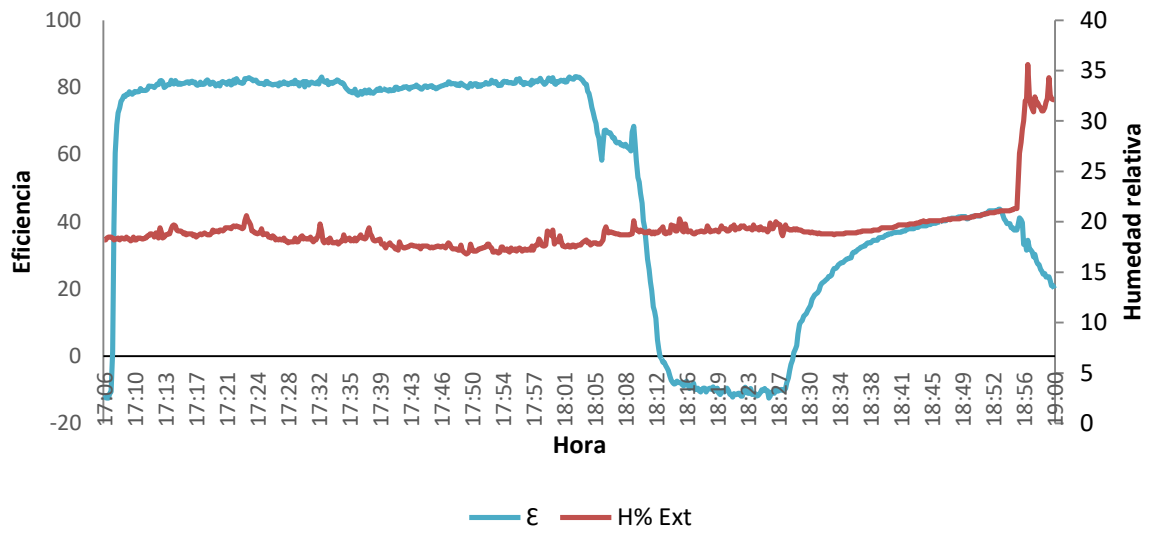


Figura 33: Eficiencia de saturación. Sexto ensayo. Humedad relativa

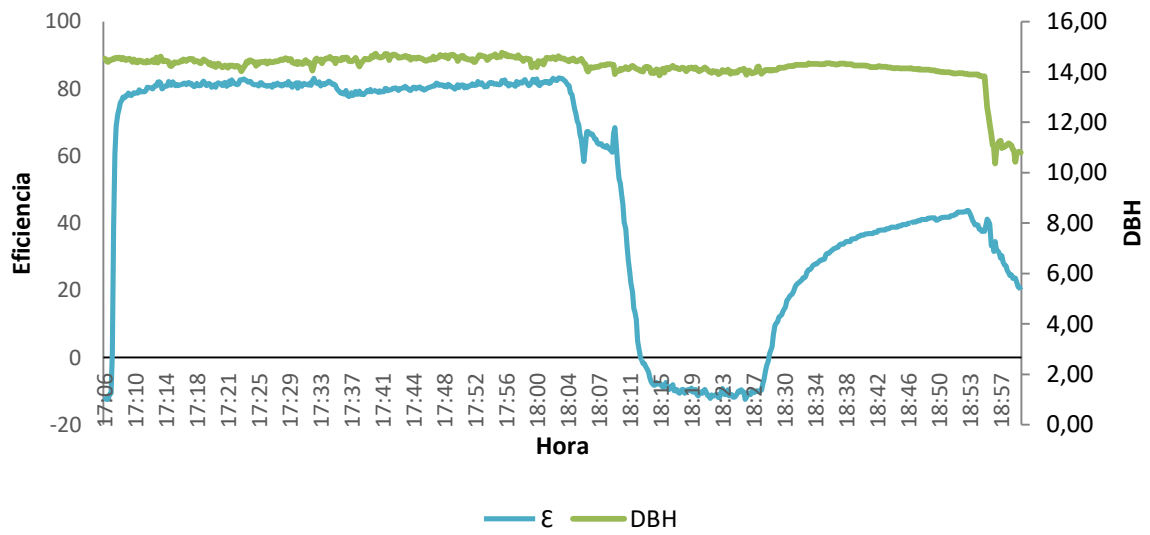


Figura 34: Eficiencia de saturación. Sexto ensayo. DBH

II.V Capacidad de enfriamiento

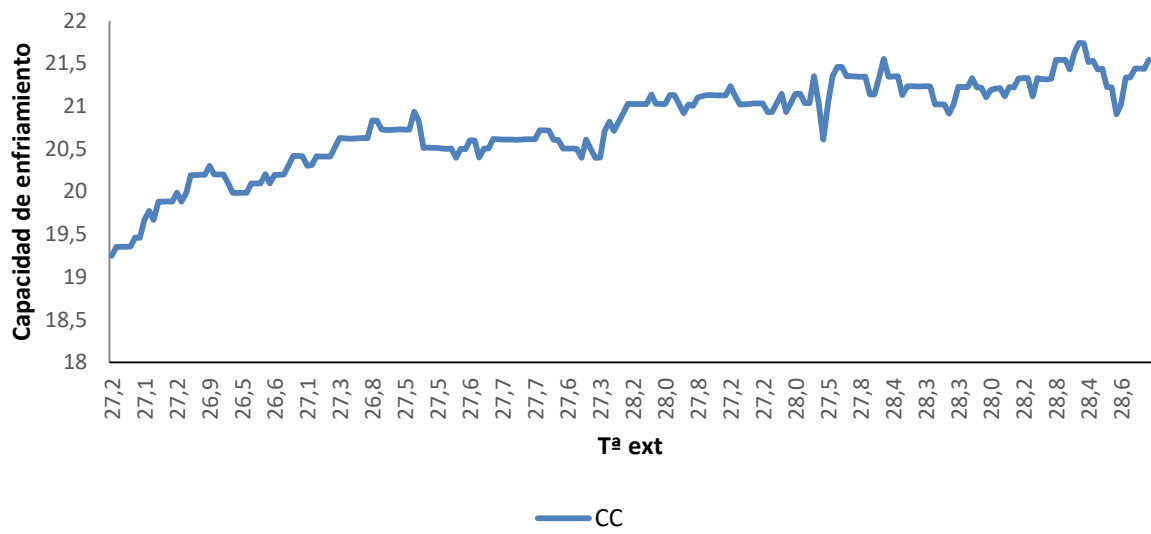


Figura 35: Capacidad de enfriamiento. Segundo ensayo

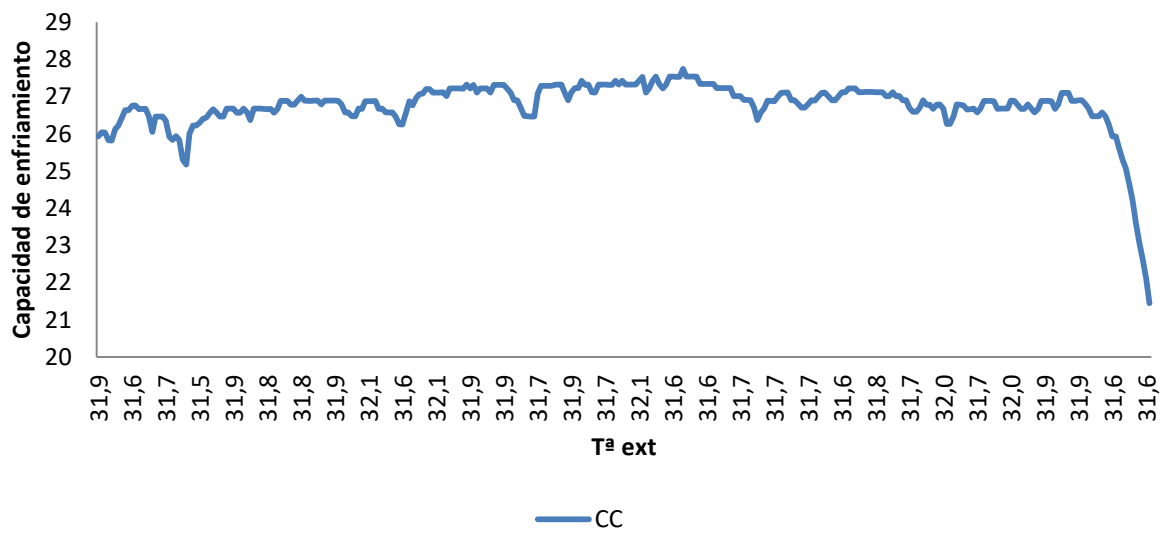


Figura 36: Capacidad de enfriamiento. Tercer ensayo

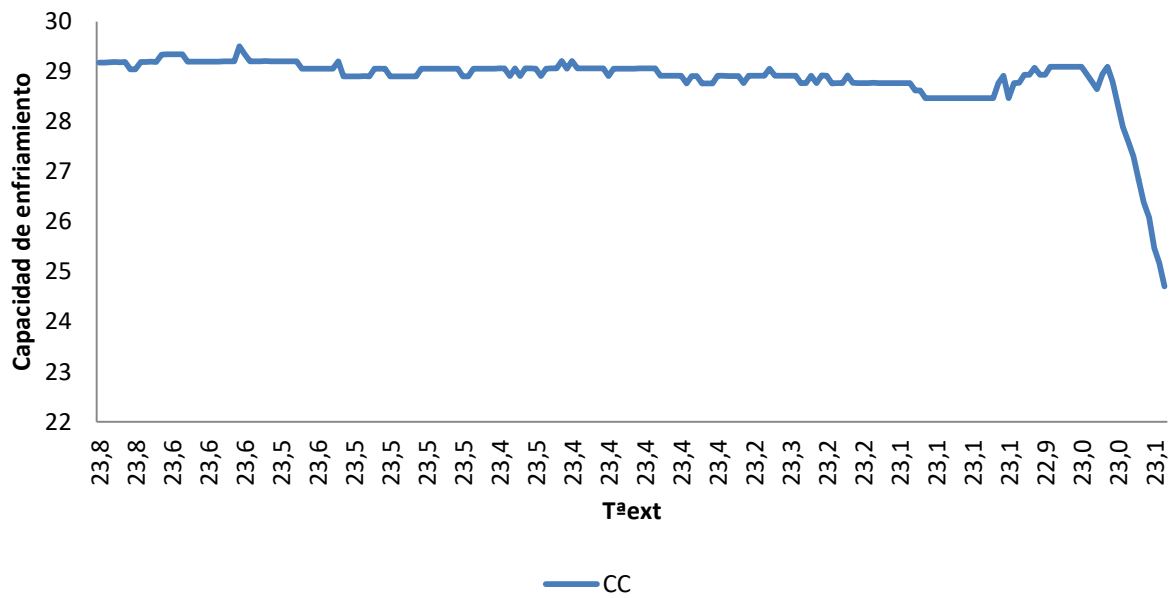


Figura 37: Capacidad de enfriamiento. Cuarto ensayo

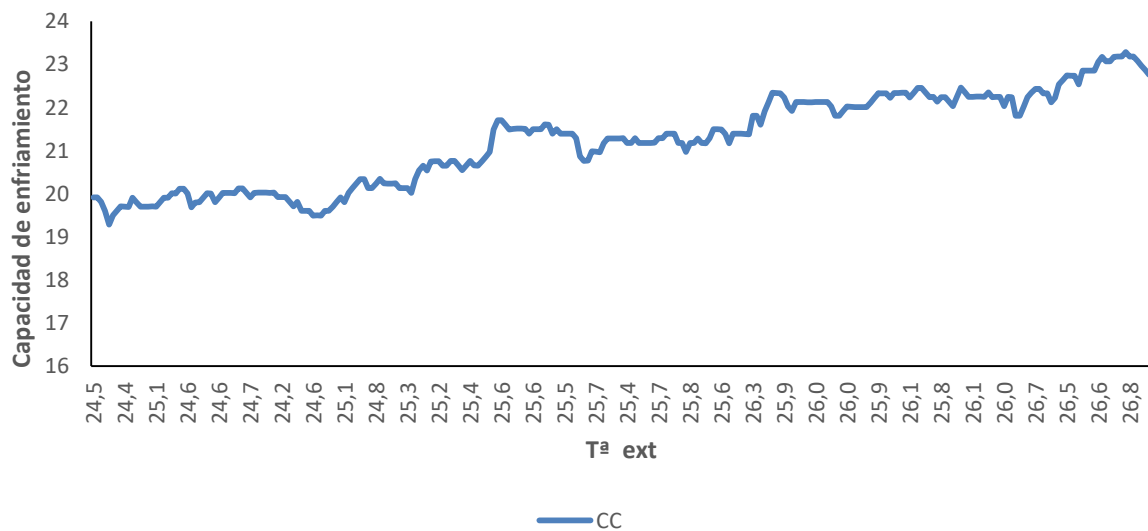


Figura 38: Capacidad de enfriamiento. Quinto ensayo

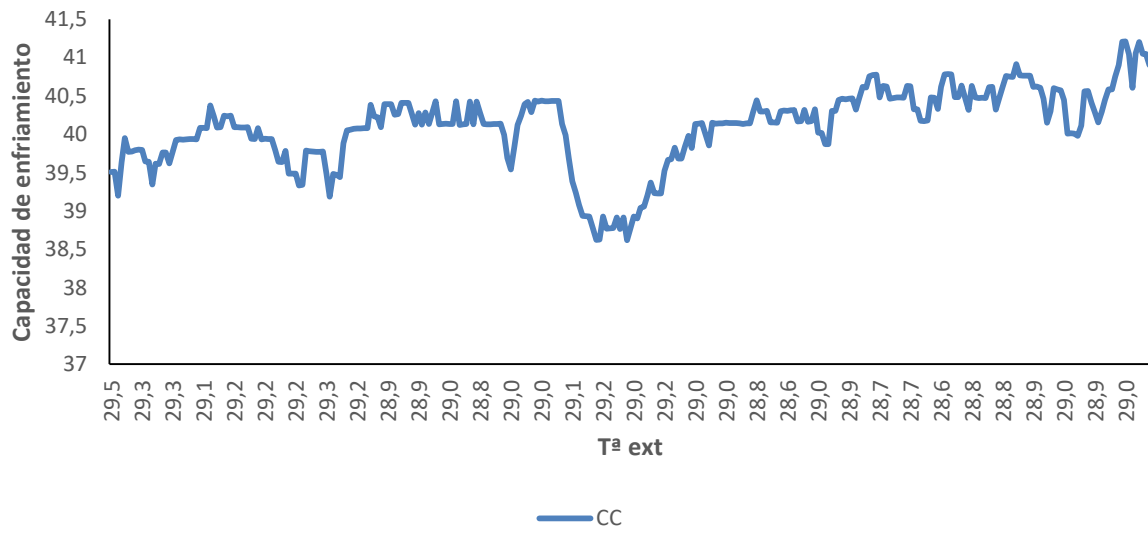


Figura 39: Capacidad de enfriamiento. Sexto ensayo

II.VI COP de frío

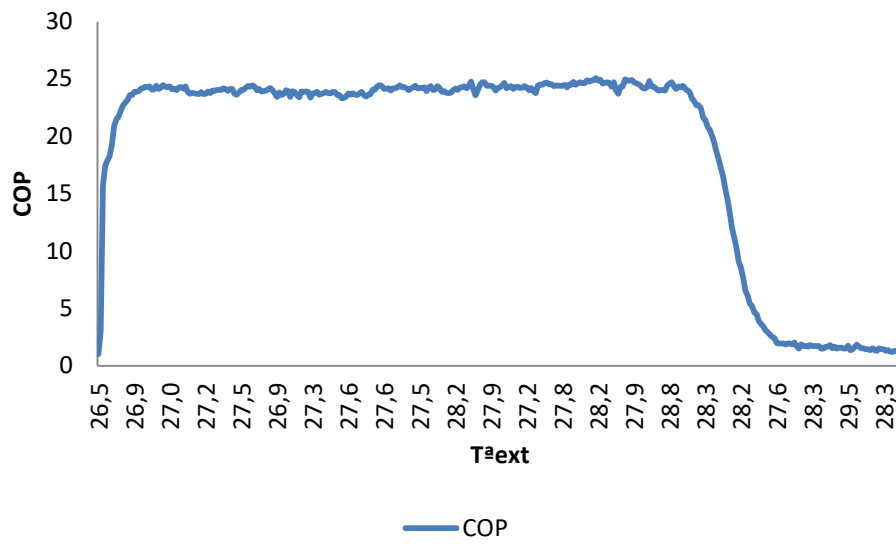


Figura 40: COP. Segundo ensayo

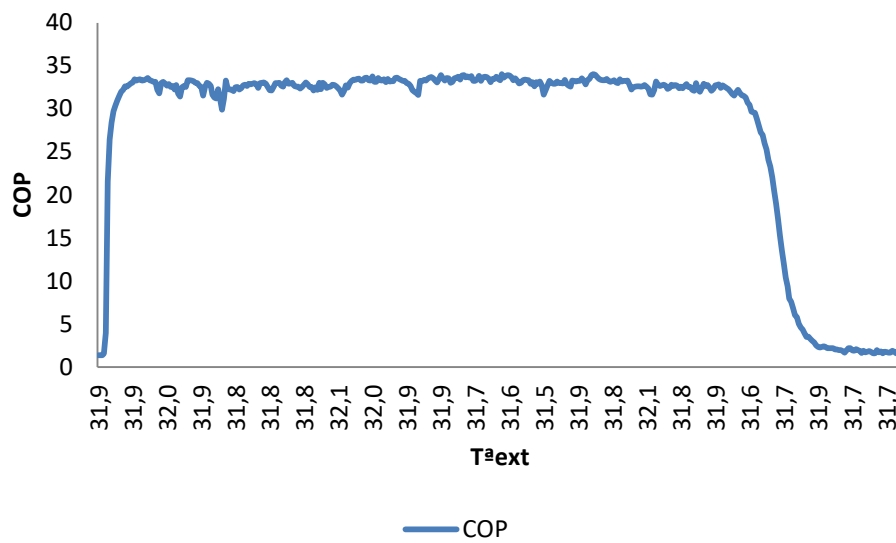


Figura 41: COP. Tercer ensayo

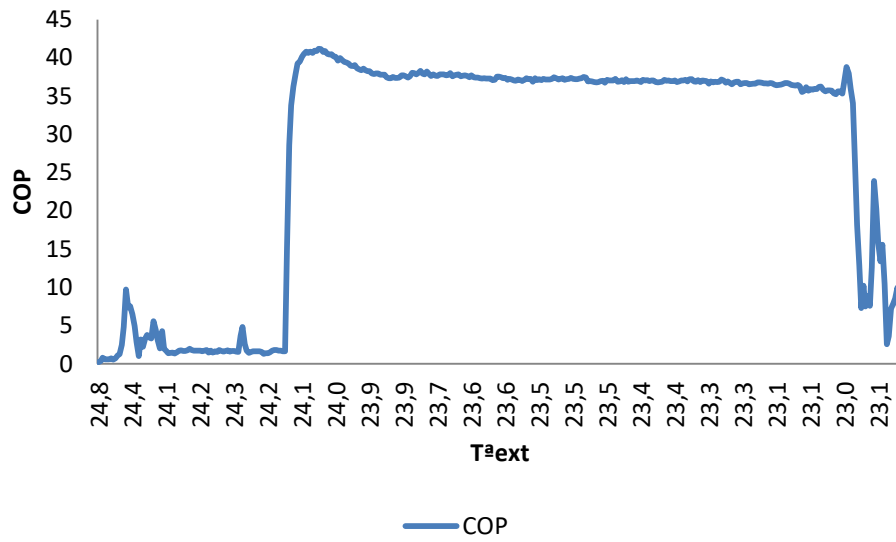


Figura 42: COP. Cuarto ensayo

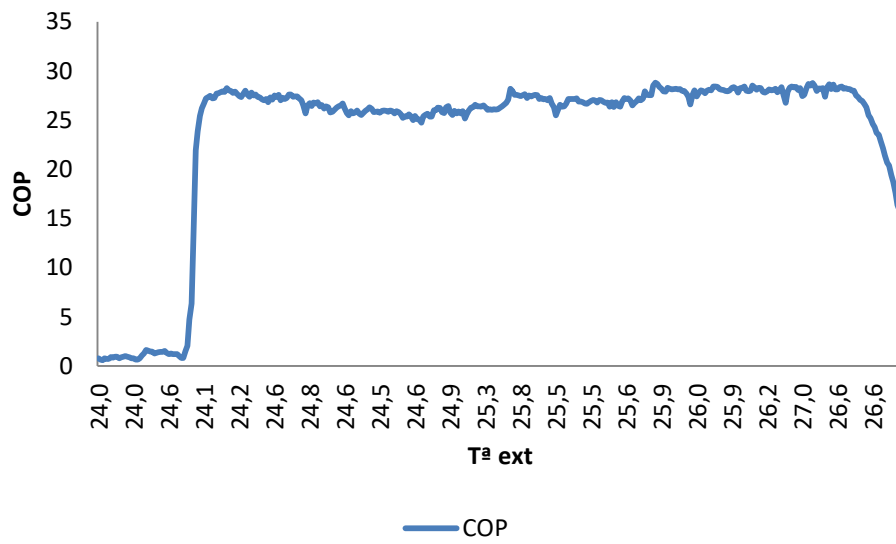


Figura 43: COP. Quinto ensayo

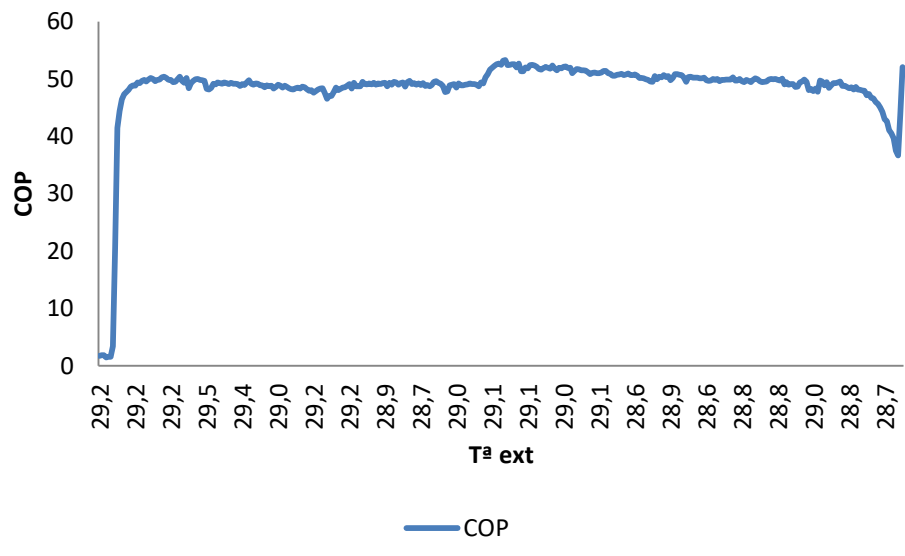
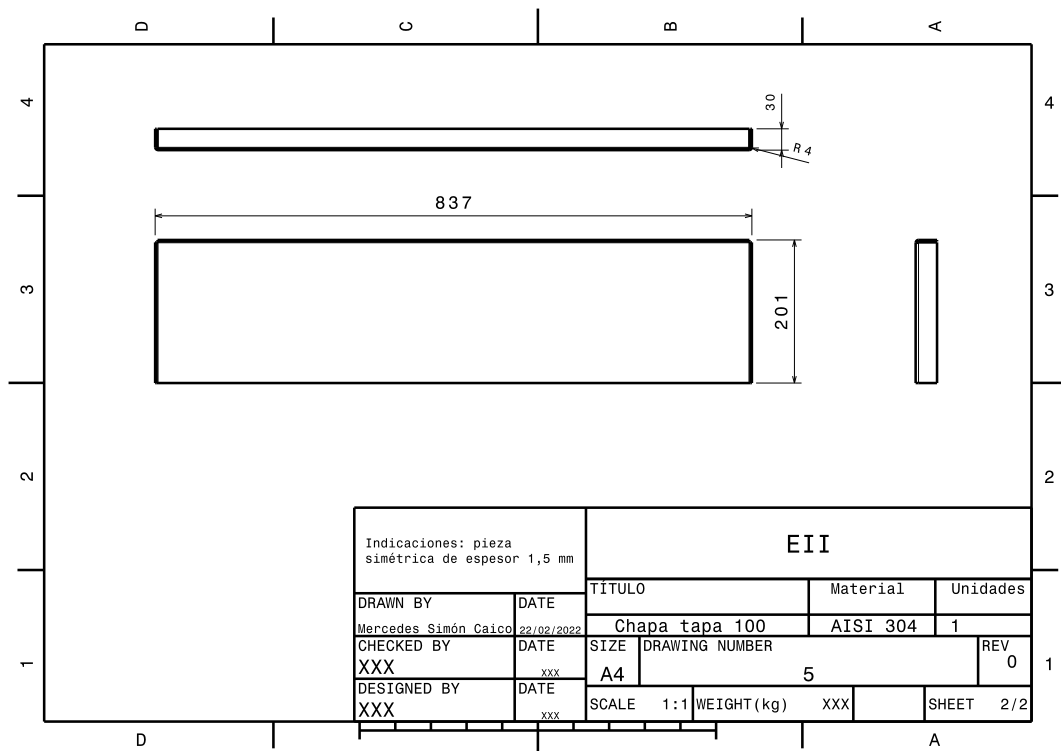
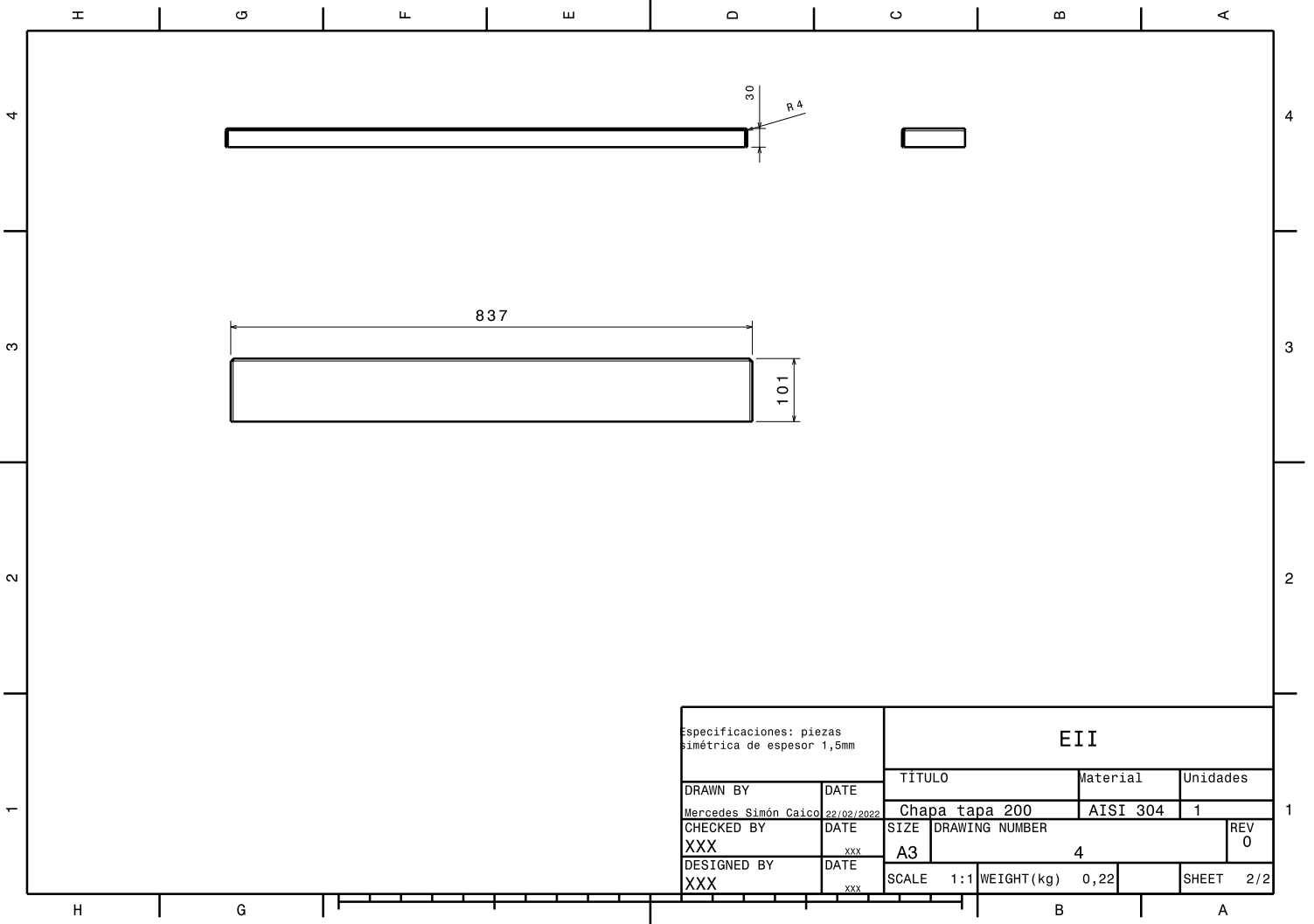


Figura 44: COP. Sexto ensayo

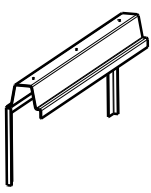
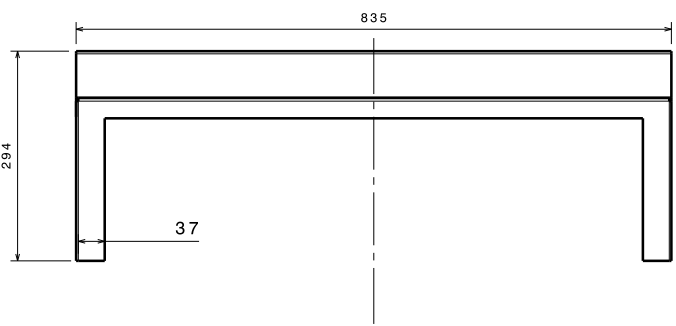
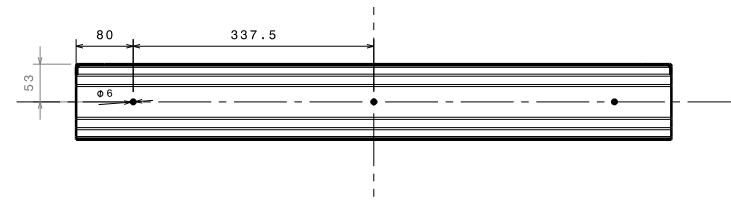
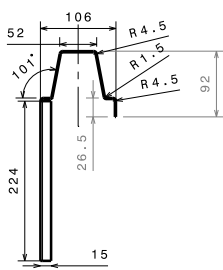
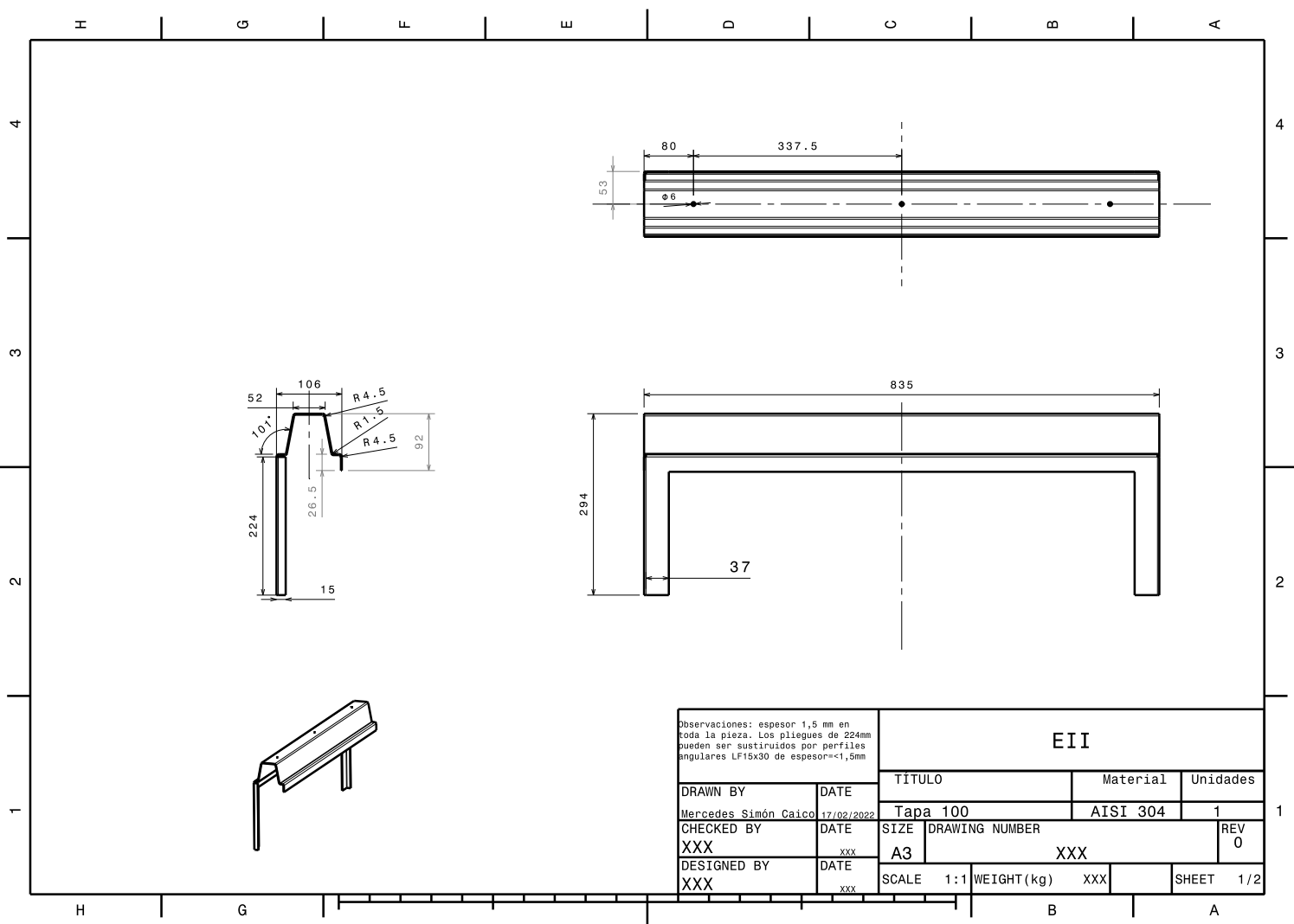
ANEXO III. Planos



| | | | | |
|---|------------|----------------|----------------|----------|
| Indicaciones: pieza simétrica de espesor 1,5 mm | | EII | | |
| DRAWN BY | DATE | TITULO | Material | Unidades |
| Mercedes Simón Caico | 22/02/2022 | Chapa tapa 100 | AISI 304 | 1 |
| CHECKED BY | DATE | SIZE | DRAWING NUMBER | REV |
| XXX | xxx | A4 | 5 | 0 |
| DESIGNED BY | DATE | SCALE | WEIGHT (kg) | SHEET |
| XXX | xxx | 1:1 | XXX | 2/2 |

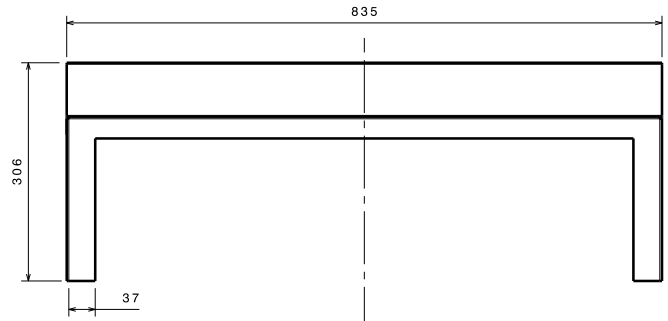
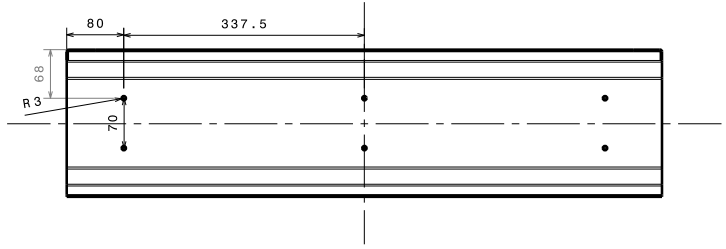
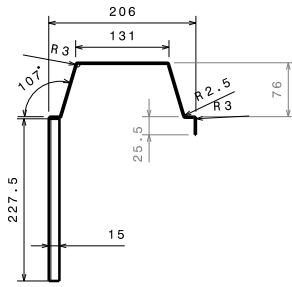
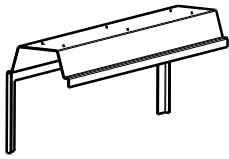


| | | | | |
|---|------------|----------------|----------------|----------|
| Especificaciones: piezas simétrica de espesor 1,5mm | | EII | | |
| DRAWN BY | DATE | TITULO | Material | Unidades |
| Mercedes Simón Caico | 22/02/2022 | Chapa tapa 200 | AISI 304 | 1 |
| CHECKED BY | DATE | SIZE | DRAWING NUMBER | REV |
| XXX | xxx | A3 | 4 | 0 |
| DESIGNED BY | DATE | SCALE | WEIGHT (kg) | SHEET |
| XXX | xxx | 1:1 | 0,22 | 2/2 |

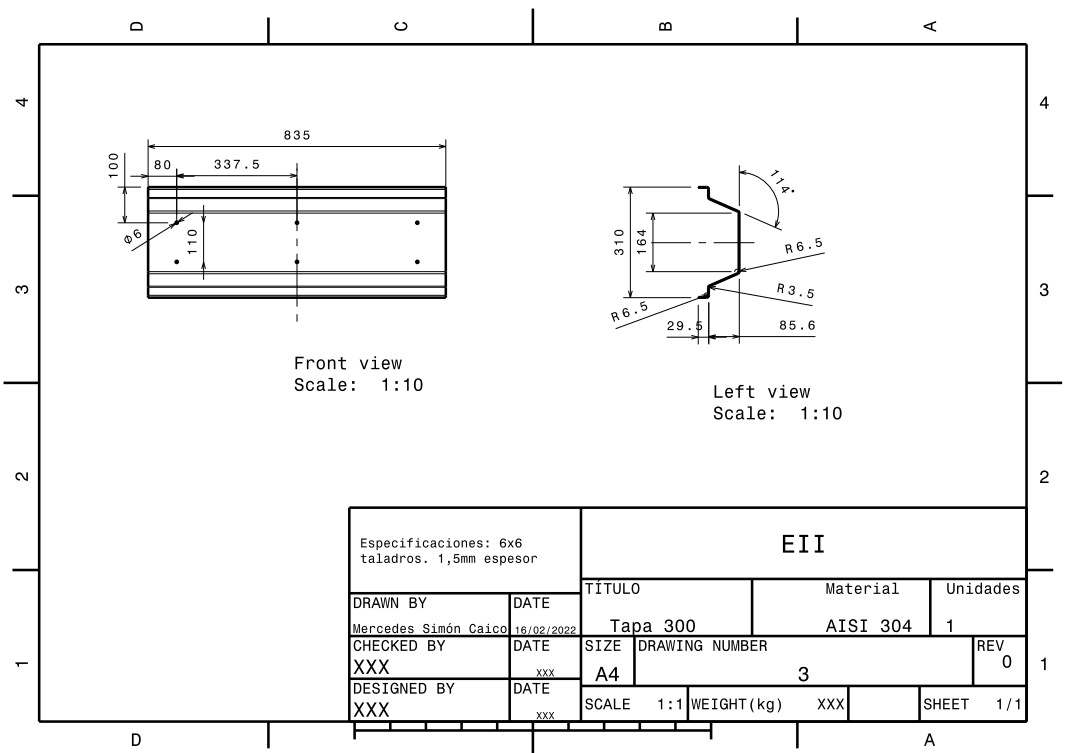


| | | | | |
|---|------------|------------|----------------|----------|
| Observaciones: espesor 1,5 mm en toda la pieza. Los pliegues de 224mm pueden ser sustituidos por perfiles angulares LF15x30 de espesor <= 1,5mm | | EII | | |
| DRAWN BY | DATE | TITULO | Material | Unidades |
| Mercedes Simón Caico | 17/02/2022 | Tapa 100 | AISI 304 | 1 |
| CHECKED BY | DATE | SIZE | DRAWING NUMBER | |
| XXX | xxx | A3 | XXX | |
| DESIGNED BY | DATE | SCALE | WEIGHT (kg) | SHEET |
| XXX | xxx | 1:1 | XXX | 1/2 |

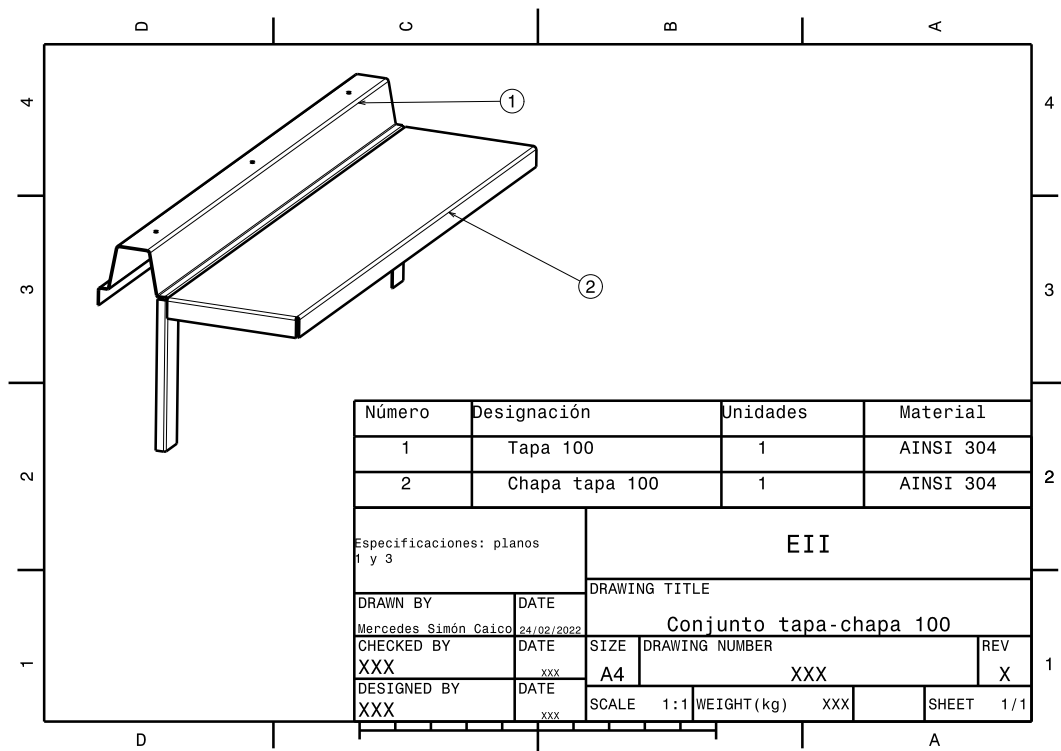
1



| | | | | |
|--|------------|------------|----------------|----------|
| Observaciones: espesores 1,5mm. Los pliegos de 227,5mm pueden ser sustituidos por perfiles angulares de LF15x30 de espesor =1,5 | | EII | | |
| DRAWN BY | DATE | TÍTULO | Material | Unidades |
| Mercedes Simón Caico | 17/02/2022 | Tapa 200 | AISI 304 | 1 |
| CHECKED BY | DATE | SIZE | DRAWING NUMBER | REV |
| XXX | xxx | A3 | 2 | 0 |
| DESIGNED BY | DATE | SCALE | WEIGHT (kg) | SHEET |
| XXX | xxx | 1:1 | XXX | 1/2 |

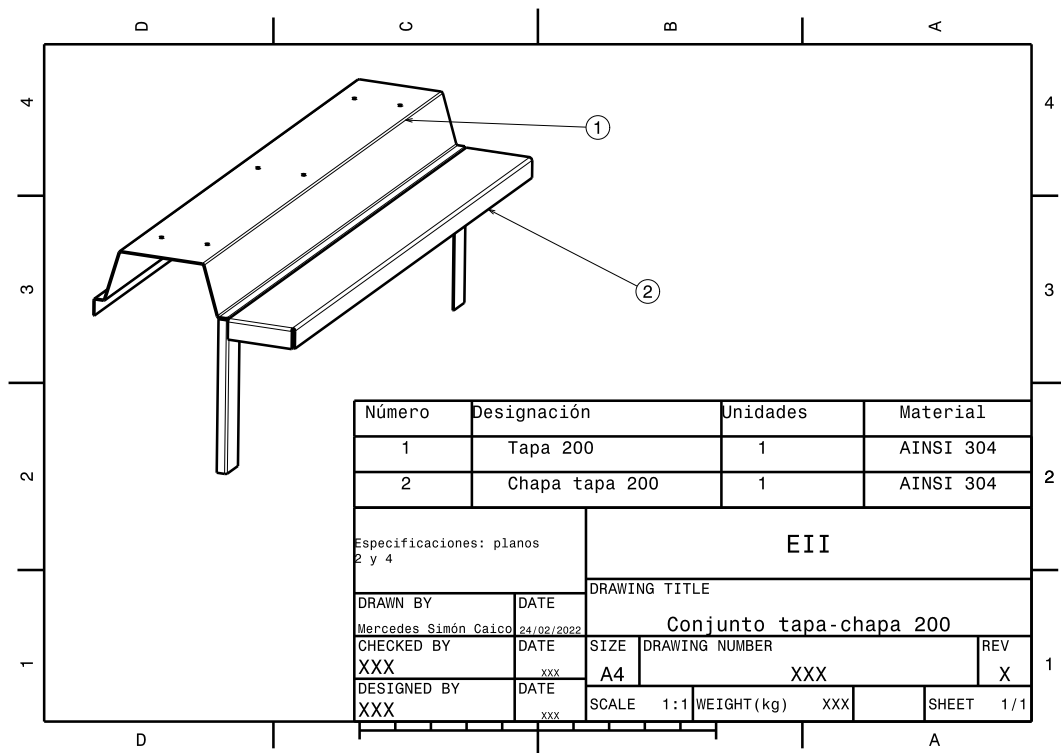


| | | | | |
|--|------------|------------|----------------|----------|
| Especificaciones: 6x6 taladros. 1,5mm espesor | | EII | | |
| DRAWN BY | DATE | TITULO | Material | Unidades |
| Mercedes Simón Caico | 16/02/2022 | Tapa 300 | AISI 304 | 1 |
| CHECKED BY | DATE | SIZE | DRAWING NUMBER | REV |
| XXX | xxx | A4 | 3 | 0 |
| DESIGNED BY | DATE | SCALE | WEIGHT (kg) | SHEET |
| XXX | xxx | 1:1 | XXX | 1/1 |



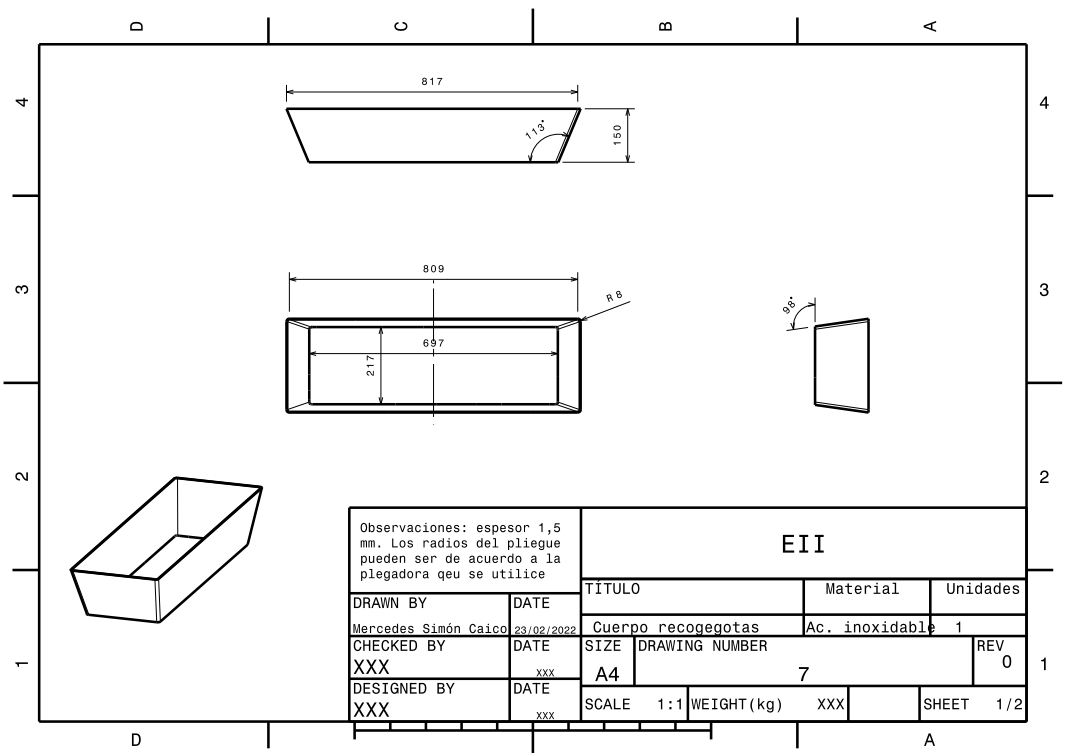
| Número | Designación | Unidades | Material |
|--------|----------------|----------|-----------|
| 1 | Tapa 100 | 1 | AINSI 304 |
| 2 | Chapa tapa 100 | 1 | AINSI 304 |

| | | | |
|-----------------------------------|-------------|--|-----------------------|
| Especificaciones: planos 1 y 3 | | EII | |
| DRAWN BY Mercedes Simón Caico | | DRAWING TITLE Conjunto tapa-chapa 100 | |
| CHECKED BY XXX | DATE xxx | SIZE A4 | DRAWING NUMBER XXX |
| DESIGNED BY XXX | DATE xxx | SCALE 1:1 | WEIGHT(kg) XXX |
| | | SHEET 1/1 | |

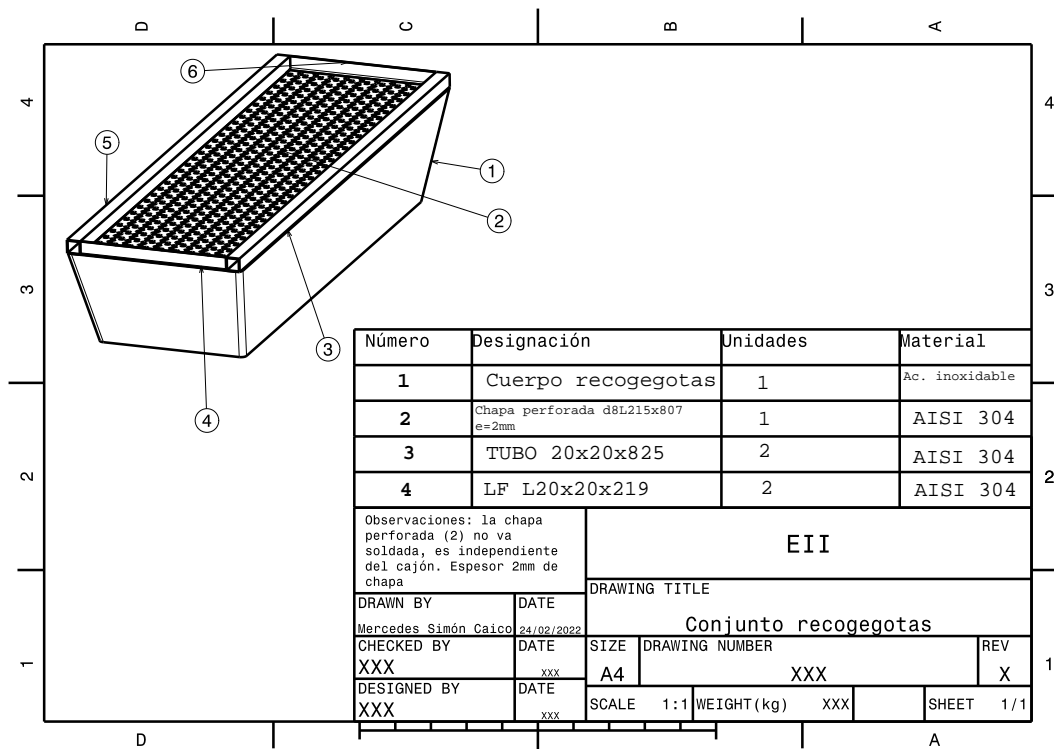


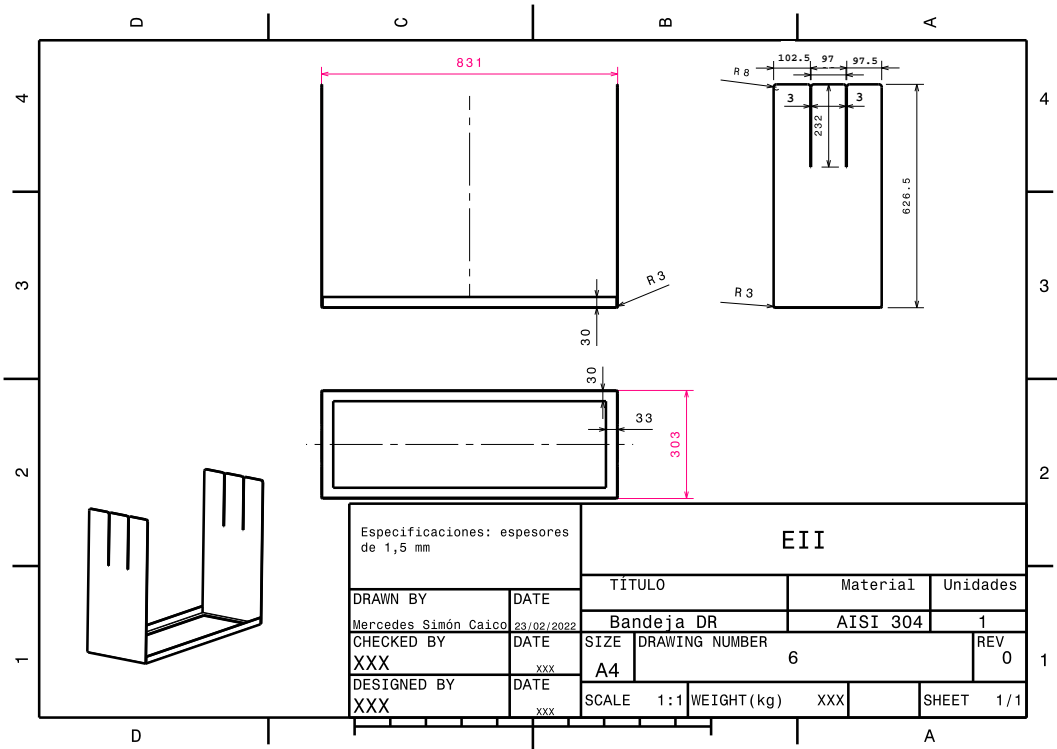
| Número | Designación | Unidades | Material |
|--------|----------------|----------|-----------|
| 1 | Tapa 200 | 1 | AINSI 304 |
| 2 | Chapa tapa 200 | 1 | AINSI 304 |

| | | | |
|-----------------------------------|--------------------|--|-----------------------|
| Especificaciones: planos 2 y 4 | | EII | |
| DRAWN BY Mercedes Simón Caico | | DRAWING TITLE Conjunto tapa-chapa 200 | |
| CHECKED BY XXX | DATE 24/02/2022 | SIZE A4 | DRAWING NUMBER XXX |
| DESIGNED BY XXX | DATE xxx | SCALE 1:1 | WEIGHT (kg) XXX |
| | | SHEET | 1/1 |



| | | | | |
|---|------------|--------------------|----------------|----------|
| Observaciones: espesor 1,5 mm. Los radios del pliegue pueden ser de acuerdo a la plegadora que se utilice | | EII | | |
| DRAWN BY | DATE | TITULO | Material | Unidades |
| Mercedes Simón Caico | 23/02/2022 | Cuerpo recogegotas | Ac. inoxidable | 1 |
| CHECKED BY | DATE | SIZE | DRAWING NUMBER | REV |
| XXX | xxx | A4 | 7 | 0 |
| DESIGNED BY | DATE | SCALE | WEIGHT (kg) | SHEET |
| XXX | xxx | 1:1 | XXX | 1/2 |

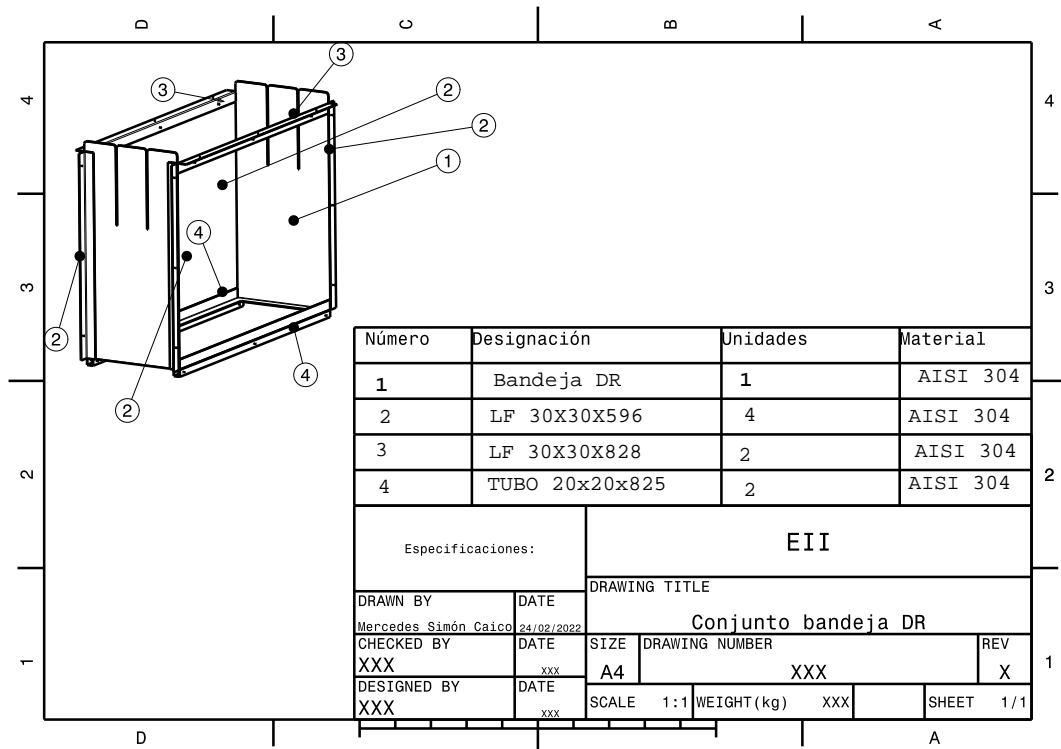




Especificaciones: espesores de 1,5 mm

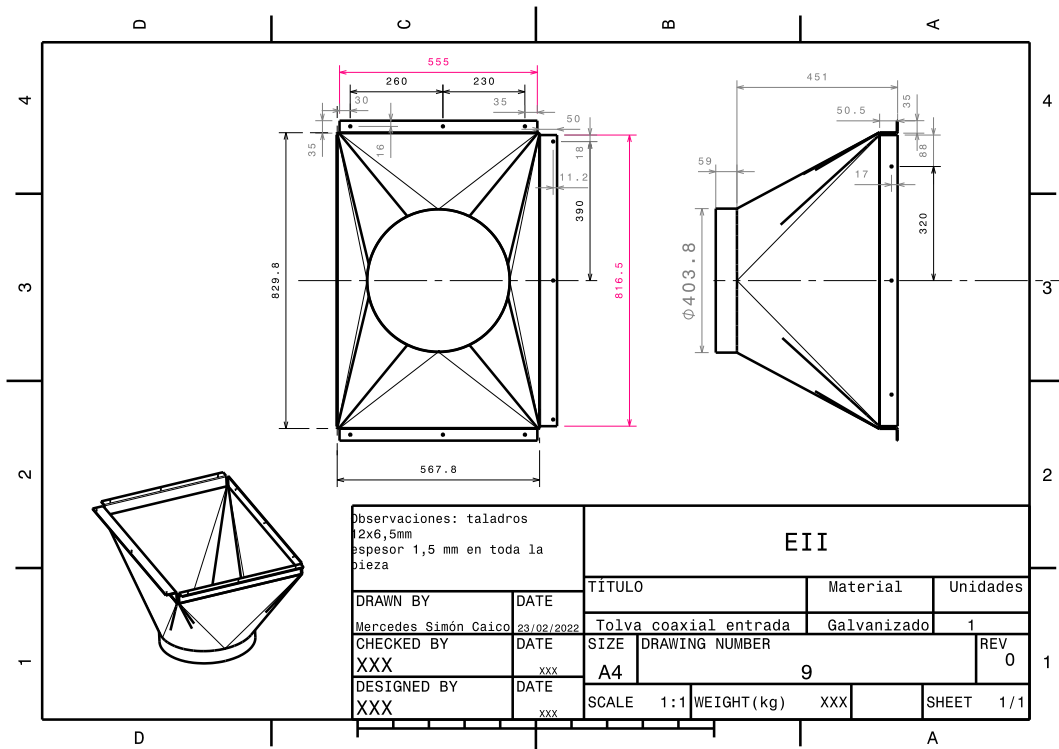
EII

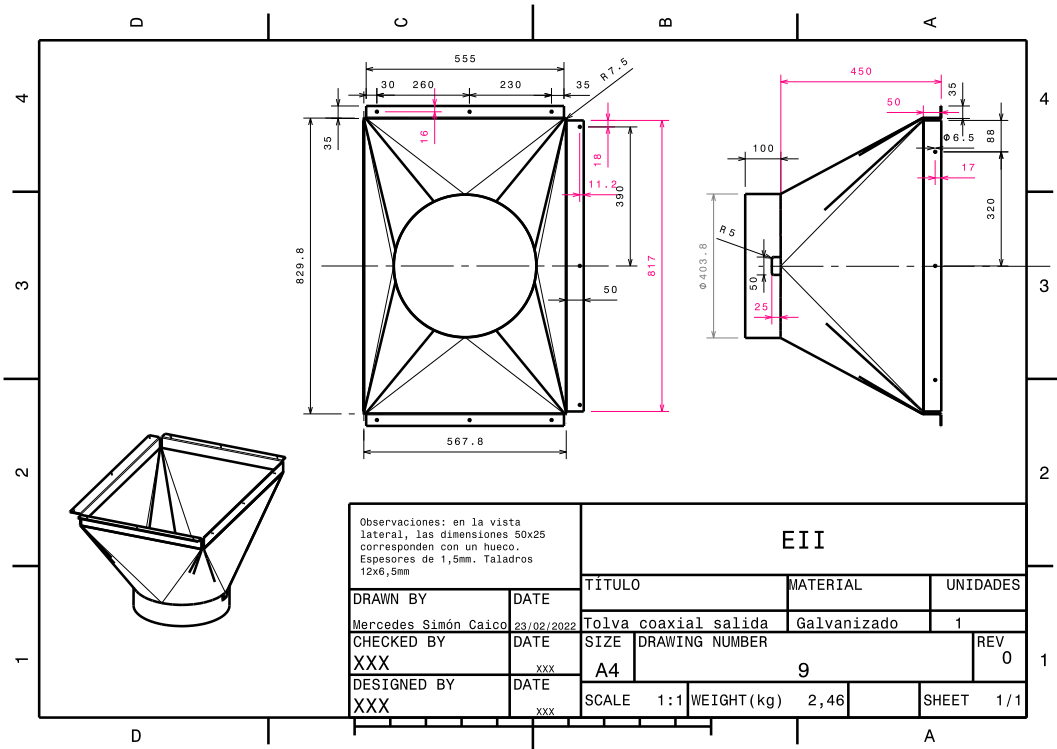
| | | | | | | | |
|----------------------|--|------------|--|----------------|-------------|----------|----------|
| DRAWN BY | | DATE | | TÍTULO | | Material | Unidades |
| Mercedes Simón Caico | | 23/02/2022 | | Bandeja DR | | AISI 304 | 1 |
| CHECKED BY | | DATE | | DRAWING NUMBER | | | REV |
| XXX | | xxx | | A4 | | | 6 |
| DESIGNED BY | | DATE | | SCALE | WEIGHT (kg) | SHEET | 1/1 |
| XXX | | xxx | | 1:1 | XXX | 1/1 | |



| Número | Designación | Unidades | Material |
|--------|----------------|----------|----------|
| 1 | Bandeja DR | 1 | AISI 304 |
| 2 | LF 30X30X596 | 4 | AISI 304 |
| 3 | LF 30X30X828 | 2 | AISI 304 |
| 4 | TUBO 20x20x825 | 2 | AISI 304 |

| | | | | |
|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|--------------|
| Especificaciones: | | EII | | |
| DRAWN BY | | DRAWING TITLE | | |
| Mercedes Simón Caico | DATE 24/02/2022 | Conjunto bandeja DR | | |
| CHECKED BY XXX | DATE xxx | SIZE A4 | DRAWING NUMBER XXX | REV X |
| DESIGNED BY XXX | DATE xxx | SCALE 1:1 | WEIGHT(kg) XXX | SHEET 1/1 |





| | | | | |
|--|------------|----------------------|----------------|----------|
| Observaciones: en la vista lateral, las dimensiones 50x25 corresponden con un hueco. Espesores de 1,5mm. Taladros 12x6,5mm | | EII | | |
| DRAWN BY | DATE | TITULO | MATERIAL | UNIDADES |
| Mercedes Simón Caico | 23/02/2022 | Tolva coaxial salida | Galvanizado | 1 |
| CHECKED BY | DATE | SIZE | DRAWING NUMBER | REV |
| XXX | xxx | A4 | 9 | 0 |
| DESIGNED BY | DATE | SCALE | WEIGHT (kg) | SHEET |
| XXX | xxx | 1:1 | 2,46 | 1/1 |

| Nº | Designación | Unidades | Material |
|----|------------------------------|----------|-------------|
| 1 | Tapa 100 | 1 | AINSI 304 |
| 2 | Chapa tapa 100 | 1 | AINSI 304 |
| 3 | Bandeja DR | 1 | AINSI 304 |
| 4 | Perfiles de bandeja DR | 1 | AINSI 304 |
| | LF 30X30X596 | 4 | AINSI 304 |
| | LF 30X30X828 | 2 | AINSI 304 |
| | TUBO 20X20X825 | 2 | AINSI 304 |
| 5 | TOLVA COAXIAL ENTRADA | 1 | GALVANIZADO |
| 6 | TOLVA COAXIAL SALIDA | 1 | GALVANIZADO |
| 7 | RECOGEGOTAS | 1 | AINSI 304 |
| 8 | TUBO 20X20X825 | 2 | AINSI 304 |
| | LF 30X30X219 | 2 | AINSI 304 |
| 9 | Tapa 300 | 1 | AINSI 304 |
| 10 | Tapa 200 | 1 | AINSI 304 |
| 11 | Chapa tapa 200 | 1 | AINSI 304 |

| | | | | | |
|--|--------------------------|--------------------|-------------------|--|-----------------|
| Observaciones: los tubos presentes son cuadrados | CHECKED BY XXX | DATE xxx | SIZE A4 | DRAWING TITLE Conjunto cajón | REV X |
| | Mercedes Simón Caico | DATE 24/02/2022 | SCALE 1:1 | WEIGHT(kg) XXX | SHEET 1/1 |

