



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

# **Estudio sobre los sistemas de recuperación de energía en la ventilación de quirófanos**

**Autor:**

**Mandado Muñoz, Carlos**

**Tutor(es):**

**Sanz Tejedor, M. Ascensión**

**Zarzuelo, Andrés**

**Valladolid, noviembre 2020.**



# Resumen

Las instalaciones de climatización y ventilación de quirófanos contribuyen en gran medida al consumo energético y eléctrico anual de un hospital, debido a las exigencias ambientales de los quirófanos que establece la normativa vigente.

Este Trabajo de Fin de Grado presenta el funcionamiento durante un intervalo de tiempo de un recuperador de calor instalado en una Unidad de Tratamiento de Aire que abastece a un quirófano en el Hospital Clínico Universitario de Valladolid.

En base a estos resultados se ha calculado la eficiencia energética a lo largo del tiempo, el ahorro en consumo térmico y eléctrico, y el impacto ambiental que supone la instalación del recuperador.

**Palabras clave:** energía, consumo, ahorro, climatización, quirófanos.

## Abstract

The air conditioning and ventilation facilities in operating rooms contribute a lot to the annual energy and electrical consumption of a hospital, due to the environmental requirements of operating rooms established by current regulations.

This End of Degree Work presents the operation during a time interval of a heat recoverer installed in an Air Treatment Unit that supplies an operating room at the Hospital Clínico Universitario de Valladolid.

Based on these results, energy efficiency over time, savings in termal and electrical consumption, and the environmental impact of installing the recoverer have been calculated.

**Keywords:** energy, consumption, saving, air conditioning, operating romos.



# ÍNDICE

1.	OBJETO DEL TFG.....	1
2.	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	1
3.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.....	3
3.1.	NORMATIVA DE LA INSTALACIÓN DE CLIMATIZACIÓN Y VENTILACIÓN EN HOSPITALES.....	3
3.2.	FINALIDAD DE LA INSTALACIÓN.....	3
3.3.	DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AIRE.....	4
4.	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA, POTENCIA RECUPERADA Y ENERGÍA EN PERIODOS TRANSITORIOS. C.O.P. DEL SISTEMA.....	16
4.1.	EFICIENCIA.....	16
4.2.	POTENCIA ÚTIL RECUPERADA EN PERIODOS ESTACIONARIOS.....	18
4.3.	ENERGÍA EN PERIODOS TRANSITORIOS.....	19
4.4.	C.O.P. DEL SISTEMA.....	19
5.	ADQUISICIÓN DE DATOS.....	22
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	22
5.2.	DATOS REGISTRADOS POR EL SCADA DEL HCUVa.....	22
5.3.	DATOS MEDIDOS EN EL CLIMATIZADOR.....	24
5.3.1.	Temperatura y humedad relativa del aire de impulsión y de retorno y temperatura del fluido del recuperador.....	24
5.3.2.	Flujo volumétrico del aire de retorno.....	30
6.	ANÁLISIS DE DATOS.....	34
6.1.	ANÁLISIS GENERAL.....	34
6.2.	ANÁLISIS DE UN PERIODO TRANSITORIO.....	35
6.3.	DATOS A ESTUDIO.....	37
7.	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y DE LA POTENCIA ÚTIL RECUPERADA.....	38
7.1.	EFICIENCIA SENSIBLE.....	38
7.2.	POTENCIA SENSIBLE RECUPERADA.....	38
7.3.	EFICIENCIA TOTAL.....	39
7.4.	POTENCIA TOTAL RECUPERADA.....	41
8.	ESTUDIO DE AHORRO ENERGÉTICO E IMPACTO AMBIENTAL. CÁLCULO DEL SCOP.....	42
8.1.	AHORRO ENERGÉTICO.....	42
8.2.	IMPACTO AMBIENTAL.....	43
8.3.	CÁLCULO DEL S.C.O.P.....	44

9.	ESTUDIO ECONÓMICO.....	45
10.	CONCLUSIONES.....	47
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	49
12.	ANEXOS.....	51
12.1.	HOJA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA UTA PP-S-3.4.....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.-Eficiencia típica de los principales recuperadores de calor usados en las UTAs, según el tipo (6).....	13
Tabla 5.1.- Datos registrados por el sistema del climatizador PP-S3.4.....	23
Tabla 5.2.- Fragmento del Excel con los datos obtenidos a través de las sondas. ..	29
Tabla 5.3.- Parámetros de las rectas de calibración de las distintas sondas utilizadas. ....	29
Tabla 5.4.- Excel con la tabla de datos, la media para cada zona, el caudal por cada subárea y el caudal total. ....	33
Tabla 8.1. Fragmento del Excel con los datos anuales obtenidos del CTE. ....	43
Tabla 9.1.- Tarifas eléctrica y térmica medias del HCUVa. ....	45





# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.-Vista de la entrada principal del HCUVa. ....	2
Figura 3.1.-Representación del efecto de una batería de calor sensible, en un diagrama psicrométrico, con el programa Sicro. ....	5
Figura 3.2.-Enfriamiento y deshumectación del aire al pasar por una batería de frío con deshumectación, representado en un diagrama psicrométrico, con el programa Sicro. ....	6
Figura 3.3.- Representación de una humectación con vapor, en un diagrama psicrométrico, con el programa Sicro. ....	7
Figura 3.4.- Gráfica que representa la sobrepresión que se produce en el quirófano en un intervalo en el que se abre y cierra la puerta (5). ....	8
Figura 3.5.- Esquema de un recuperador de placas (7). ....	9
Figura 3.6.- Esquema de un recuperador rotativo (8). ....	9
Figura 3.7.- Esquema de un recuperador por circulación y rociado (6). ....	10
Figura 3.8.- Esquema de un recuperador evaporador-condensador (6). ....	11
Figura 3.9.- Esquema de un recuperador por tubos de calor (6). ....	12
Figura 3.10.- Esquema básico de funcionamiento de un recuperador de dos baterías con bomba run-around (9). ....	13
Figura 3.11.- Fotografía de la zona exterior de la UTA donde se puede apreciar la posición del recuperador y de la bomba. ....	14
Figura 3.12.- Fotografía de la zona exterior de la UTA, donde se aprecia el conducto del recuperador junto con la sonda dispuesta en la medición de datos. ....	14
Figura 4.1.- Esquema básico de un recuperador de doble batería con bomba (run around) con el sistema de notación utilizado (10). ....	17
Figura 5.1.- Pantalla principal del SCADA para la climatizadora PP-S3.4, donde se pueden observar los distintos elementos y valores que proporciona. En el recuadro rojo se observa el caudal de impulsión. ....	23
Figura 5.2.- Sondas utilizadas en el seguimiento del recuperador de calor. ....	24
Figura 5.3.- Esquema de la posición en la que fueron colocadas las sondas en la UTA a estudio. ....	25
Figura 5.4.- Fotografía de la climatizadora PP-S3.4 donde se ve la disposición de las sondas. ....	26
Figura 5.5.- Fotografía de la posición de una de las sondas dentro del conducto. ..	26
Figura 5.6.- Fotografías donde se ve la posición de los termómetros para medir la temperatura del agua del recuperador. ....	27
Figura 5.7.- Fotografía de la posición en el conducto de una de las sondas que registraba la temperatura del líquido del recuperador. ....	28
Figura 5.8.- Fotografía del climatizador con referencia a la posición del anemómetro. ....	30
Figura 5.9.- Fotografía de la sonda y el soporte colocados. ....	31
Figura 5.10.- Fotografía del anemómetro y la sonda con la compuerta abierta. ....	31

Figura 5.11.- Fotografía del anemómetro en el momento de la toma de medidas..	32
Figura 5.12.- Posiciones de las medidas tomadas dentro del conducto. ....	33
Figura 6.1.- Representación de la eficiencia del recuperador frente al incremento de temperatura entre la sala de quirófano y el exterior.....	34
Figura 6.2.- Representación de las rpm del ventilador de extracción respecto al tiempo.....	35
Figura 6.3.- Representación en columnas de la eficiencia (eje vertical izquierdo) respecto al tiempo, sobre la representación en líneas de las rpm del ventilador de extracción (eje derecho) respecto al tiempo. ....	36
Figura 7.1.- Eficiencia de calor sensible respecto a la temperatura exterior. ....	38
Figura 7.2.- Representación de la energía recuperada en la impulsión frente a la temperatura exterior.....	39
Figura 7.3.- Imagen del programa Sicro, donde se obtuvieron los valores de las entalpías.....	40
Figura 7.4.- Representación de la eficiencia energética respecto a la entalpía exterior.....	40
Figura 7.5.- Representación de la energía total recuperada en impulsión respecto a la temperatura exterior.....	41
Figura 8.1. Imagen de la web documentos del CTE. En el recuadro rojo, el archivo de descarga de datos para las distintas zonas climáticas (13). ....	42

## 1. OBJETO DEL TFG.

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como objetivo principal determinar la eficiencia energética del sistema de recuperación instalado en una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) de un quirófano del Hospital Clínico Universitario de Valladolid (HCUVa).

Se establecen una serie de subobjetivos que derivan del objetivo principal, que permitirán alcanzar el objetivo del TFG.

- Observación y comprensión de los componentes que forman el sistema de recuperación, así como de su funcionamiento en conjunto en la UTA.
- Toma de los datos de funcionamiento del recuperador y la UTA, registrados por el Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) y realización de mediciones en campo.
- Analizar y seleccionar los datos disponibles para establecer los periodos a estudio.
- Determinación de la energía recuperada por el sistema, en función de los datos registrados, en los periodos a estudio.
- Determinación de la eficiencia energética del recuperador, en los periodos a estudio.
- Cálculo del ahorro económico y del impacto ambiental que supone la instalación del recuperador.

## 2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.

Este TFG se desarrolló con los datos y trabajos llevados a cabo durante el periodo de prácticas curriculares y extracurriculares realizadas en el HCUVa. La preocupación creciente por reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en los hospitales de Castilla y León, requiere cuantificar las diferentes estrategias y elementos utilizados para incrementar la eficiencia energética. Los recuperadores de energía, en sistemas de climatización, suponen un incremento en el consumo de los ventiladores, debido al incrementar la pérdida de carga del sistema, por lo que se debe valorar si la energía recuperada justifica este incremento de consumo.

El HCUVa (*Figura 2.1*) es un hospital con aproximadamente 750 camas, que junto con el Hospital Clínico Universitario de Salamanca son los hospitales de referencia de Castilla y León. Las últimas reformas que ha sufrido el HCUVa, requieren implementar estrategias de regulación y control, propias del sistema, una vez integrado en el edificio, por lo que es necesario caracterizar los sistemas y su eficiencia energética a fin de optimizar el consumo, siempre sin perder la finalidad de este tipo de instalaciones: dar confort, de forma segura y permanente.



Figura 2.1.-Vista de la entrada principal del HCUVa.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.

En este apartado se comienza con la normativa aplicable a los sistemas de climatización de los hospitales, y más concretamente a las áreas quirúrgicas. Una vez establecidos los requerimientos, se describe la instalación donde está integrado el recuperador a estudio, su configuración y funcionamiento.

#### 3.1. NORMATIVA DE LA INSTALACIÓN DE CLIMATIZACIÓN Y VENTILACIÓN EN HOSPITALES.

Siguiendo lo dispuesto en la Norma UNE 100713 (1) '*Instalaciones de acondicionamiento de aire en hospitales*', las medidas más importantes para una instalación de este tipo son:

1. El quirófano es una clase de local I, la cual tiene unas exigencias muy elevadas de número de partículas en el aire, por lo que necesita un mínimo de 3 niveles de filtración, los niveles de filtro se instalan de menor eficiencia a mayor eficiencia en el sentido del caudal del aire.
2. Las baterías deben estar colocadas antes del 2º nivel de filtración.
3. En las baterías de frío se deben recoger los condensados, de forma que no sean arrastrados por el aire.
4. El recuperador no puede tener *by pass* entre el aire de extracción y el de renovación, para evitar la transmisión de partículas, microorganismos o gases contaminantes. Por ello, normalmente son de doble batería o tubos de calor.
5. Los caudales de ventilación en quirófanos son de aire exterior sin recirculación, con un caudal mínimo de 2400 m<sup>3</sup>/h o 20 renovaciones hora, para lograr diluir rápidamente los contaminantes generados por la actividad del quirófano.
6. Los climatizadores deben estar provistos de mirillas e iluminación interior, como mínimo en la zona de ventiladores y filtros.
7. Los silenciadores se instalan antes del tercer nivel de filtración.

#### 3.2. FINALIDAD DE LA INSTALACIÓN.

Siguiendo lo dispuesto en la Norma UNE 100713 (1), las finalidades de la instalación de una unidad de tratamiento de aire en un quirófano son las siguientes:

- Limitar la concentración en el aire de la zona quirúrgica, y muy especialmente en los quirófanos, de partículas, aerosoles, gases, etc.

- Se establecen unos niveles de asepsia en el área quirúrgica, que normalmente van del quirófano, con máxima asepsia a la entrada, para lo cual se establecen unas sobrepresiones de forma que existan exfiltraciones de las zonas más limpias a las zonas de menor limpieza, para ello se controlan las sobrepresiones de las salas.
- Mantener las condiciones de presión y temperatura ambientales necesarias y requeridas para cada intervención quirúrgica.

### 3.3. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO DE AIRE.

*“La unidad de tratamiento de aire, es el elemento principal del sistema de climatización y ventilación de un edificio. Es un equipo o sistema formado por distintos elementos: intercambiadores de calor, ventiladores y filtros. Estos permiten acondicionar el aire a las condiciones requeridas en el interior del edificio (2).”*

Las diferentes partes que componen la UTA se describen en los siguientes subapartados.

#### 3.3.1. Filtros.

Los niveles de filtrado se colocan para reducir el número de partículas en el aire, y para proteger los distintos componentes del climatizador. La eficiencia del filtro que se usa depende de la calidad del aire que se quiere conseguir en el espacio acondicionado y del aire exterior de la zona donde se toma el aire.

Según la normativa vigente para hospitales (3), se deben disponer, como mínimo, tres niveles de filtros, siendo el último nivel un filtro tipo High Efficiency Particulate Air (HEPA).

El primer nivel tiene que estar en la entrada de aire, cuanto más exterior de la UTA mejor, ya que así se protegen los elementos de la instalación. En esta etapa, la climatizadora del HCUVa dispone de un filtro de categoría G4 (papel plisado). El segundo nivel debe situarse a la salida de la climatizadora, después de que el aire haya sido tratado convenientemente, y si es posible, después del ventilador. Así se evita que partículas y microorganismos se depositen en la red de conductos. En la climatizadora del HCUVa, este filtro es de categoría F9 ('en V'). El tercer nivel en el HCUVa se encuentra en los difusores, se usa un filtro de categoría HEPA, al ser el quirófano de tipo B. Por último, en el retorno, se tiene un filtro de categoría F6 (de bolsa rígida). (4)



### 3.3.2. Baterías.

Las baterías en la UTA del HCUVa son similares a un intercambiador de flujo cruzado aire-agua, compuestas por tubos de cobre con aletas de aluminio. Estas no pueden superar una profundidad de cuatro filas de tubos, por requerimientos de limpieza.

Existen dos baterías, una de calentamiento (*Figura 3.1*) y otra de refrigeración. La batería de refrigeración, en función de los requerimientos del sistema, puede funcionar sin deshumectación siempre que la temperatura superficial de esta sea superior a la temperatura de rocío del aire tratado. También puede funcionar deshumectando (*Figura 3.2*), cuando la temperatura de la superficie de la batería es inferior a la de rocío del aire tratado y el tiempo de residencia del aire en la batería es suficiente, produciéndose condensación sobre la superficie de la batería y el contenido de agua del aire se reduce, para lo cual dispondrá de una bandeja de recogido de condensados con sifón. (4)

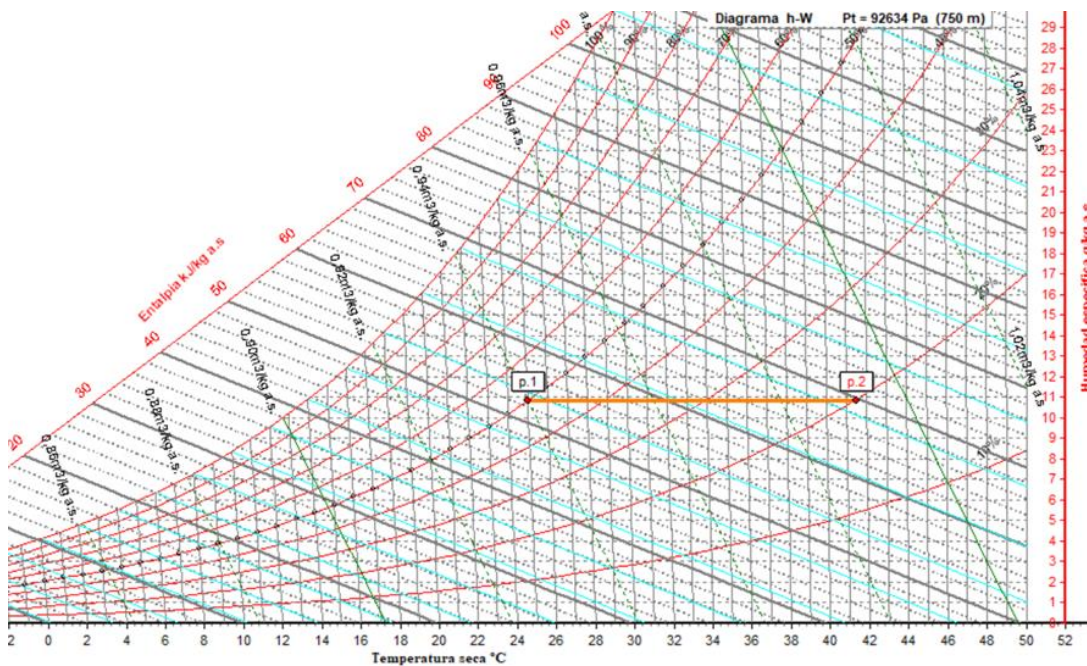


Figura 3.1.-Representación del efecto de una batería de calor sensible, en un diagrama psicrométrico, con el programa Sicro.

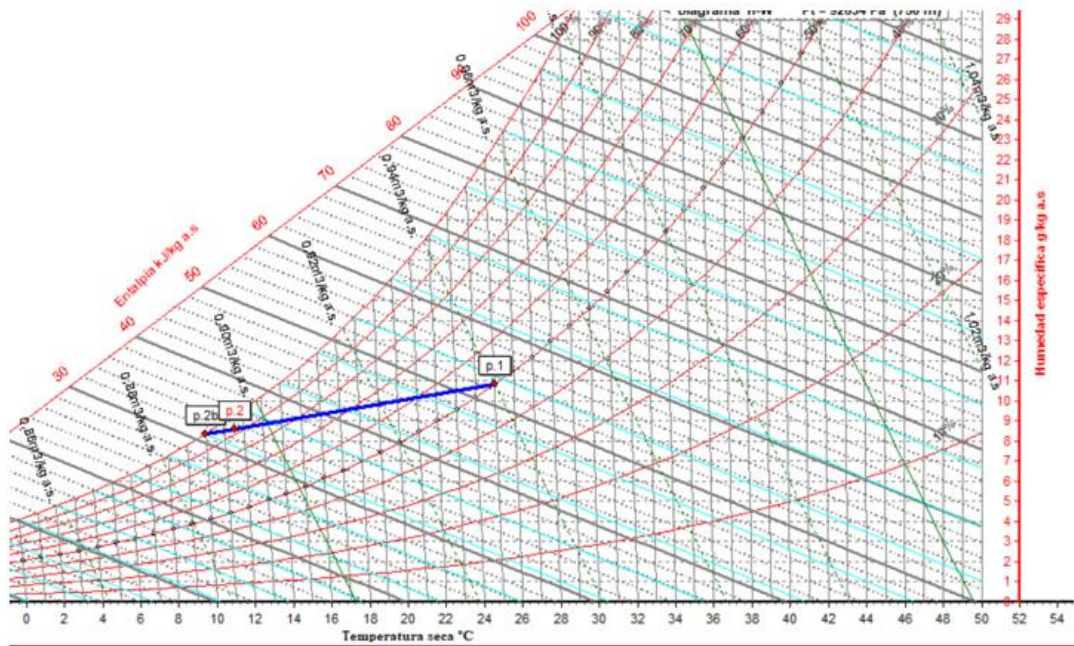


Figura 3.2.-Enfriamiento y deshumectación del aire al pasar por una batería de frío con deshumectación, representado en un diagrama psicrométrico, con el programa Sico.

### 3.3.3. Humectador.

La UTA dispone de un equipo de humectación eléctrico, de forma cilíndrica con 3 resistencias (una por cada fase), la alimentación de agua al equipo dispone de un filtro para que el agua a evaporar tenga la menor cantidad de sales y partículas disueltas, y evitar incrustaciones en las resistencias y atascos. El equipo tiene también una recirculación de agua mediante una bomba pequeña.

El vapor se introduce en la UTA a través de una lanza de vapor, que consiste en un conducto horizontal con orificios a los cuales les llega el vapor y lo distribuyen, aumentando así la humedad del aire (Figura 3.3). En la parte inferior de la lanza de vapor se dispone de una recogida de condensados (se mezcla vapor a 100°C con aire aproximadamente a 22°C, puede existir condensación del vapor) para evitar, entre otras cosas, la legionela.



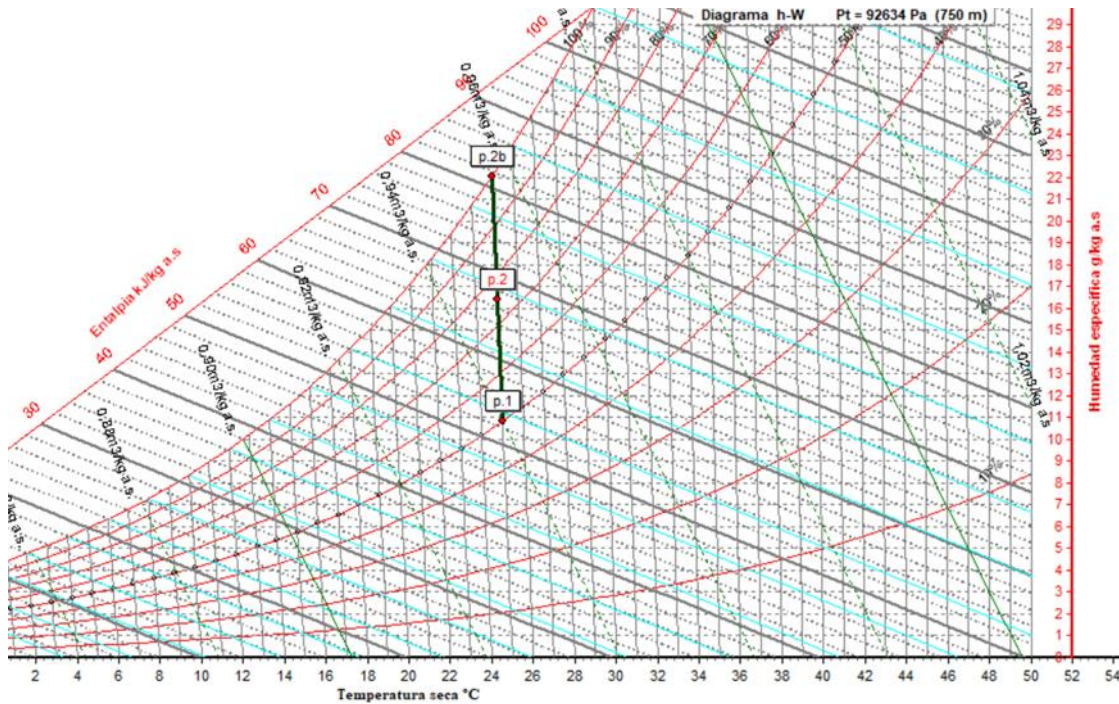


Figura 3.3.- Representación de una humidificación con vapor, en un diagrama psicrométrico, con el programa Sicro.

### 3.3.4. Ventilador.

La UTA dispone de dos ventiladores, uno de impulsión y otro de extracción, los dos ventiladores son axiales, con motor incorporado.

El ventilador de impulsión está regulado para dar un flujo volumétrico de aire constante de 2220 m<sup>3</sup>/h.

El ventilador de extracción está regulado para mantener la sobrepresión del quirófano en un valor de 20 Pa. Cuando el quirófano tiene todas las puertas cerradas y se encuentra en régimen estacionario, el ventilador funciona entre 3500-3800 rpm. Sin embargo, cuando el quirófano abre las puertas, se produce un régimen transitorio: para tratar de mantener la sobrepresión, disminuye sus rpm hasta llegar a un valor mínimo cercano a 1/3 de su valor estacionario, es decir, alrededor de 1200 rpm. Este valor mínimo se fija con el objetivo de que siga existiendo un flujo de aire en el quirófano. En el momento en que se cierran las puertas de nuevo, las rpm del ventilador aumentan rápidamente, llegando a una sobrepresión mayor de la deseada, para después volver a su valor estacionario de sobrepresión (Figura 3.4).

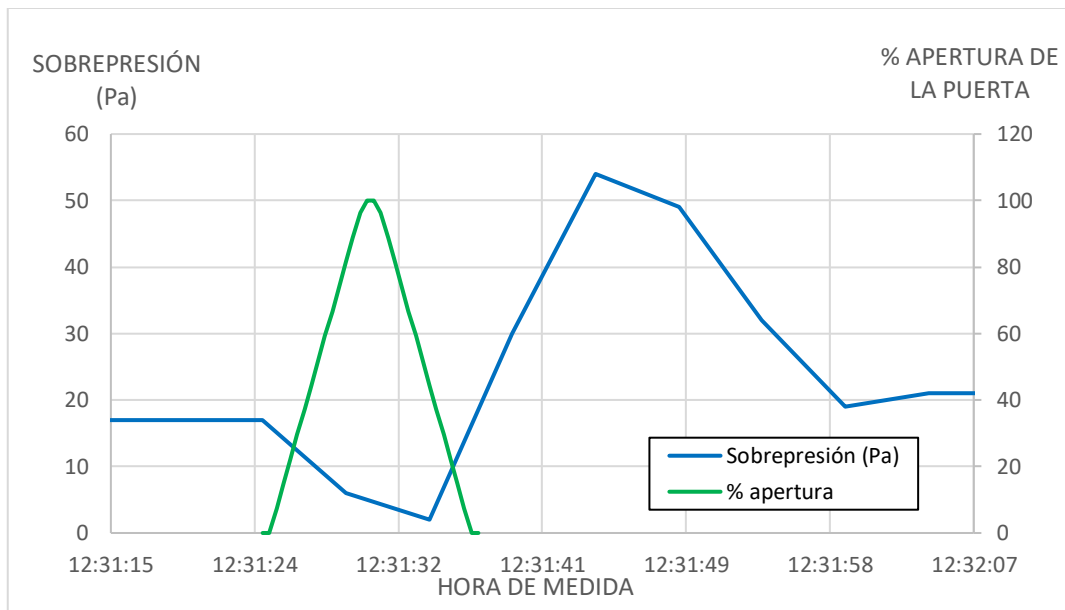


Figura 3.4.- Gráfica que representa la sobrepresión que se produce en el quirófano en un intervalo en el que se abre y cierra la puerta (5).

### 3.3.5. Silenciador.

El silenciador es un dispositivo que se coloca para disminuir la presión sonora y evitar la transmisión de sonido de la climatizadora hasta el área quirúrgica. En las UTAs del HCUVa se instala como último elemento de la climatizadora.

Se trata de una carcasa de acero galvanizado, en cuyo interior se disponen unas celdas paralelas verticalmente, con un material absorbente. (4)

### 3.3.6. Recuperador.

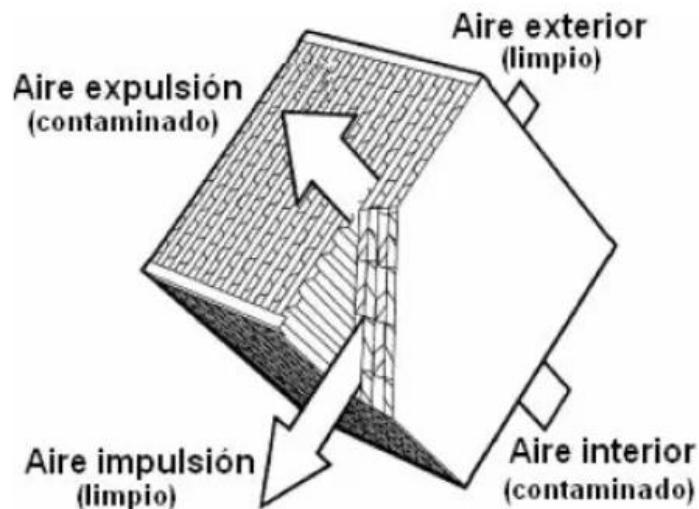
#### 3.3.6.1. Definición y principales tipos de recuperadores.

Un Recuperador de Energía en una UTA es aquel dispositivo que permite la reutilización de la energía contenida en el aire de extracción para conseguir así un ahorro en el aporte energético que se necesita en el aire de impulsión para lograr las condiciones de la sala. De esta manera se obtiene un mayor aprovechamiento energético en el sistema, consiguiendo una mayor eficiencia (6).

*“Un recuperador de Energía es aquel dispositivo que permite la reutilización del calor residual de un sistema y cuyo objetivo final es alcanzar la eficiencia máxima de la instalación (6).”*

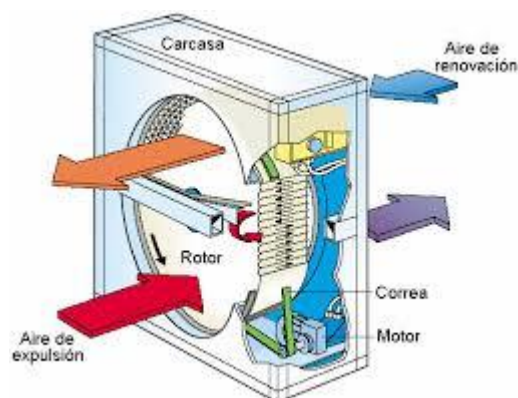
Los principales tipos de recuperadores de calor empleados en las UTAs son:

- **De placas:** Están formados por una carcasa rectangular abierta por sus extremos, cuya sección transversal se subdivide en una matriz de placas metálicas (*Figura 3.5*). Entre dos placas adyacentes se forma un conducto para el aire de extracción o el de impulsión. El aire de impulsión pasa a través de un lado de la placa y el de extracción a través del otro, transmitiéndose así el calor desde un flujo a otro a través de la placa (6).



*Figura 3.5.- Esquema de un recuperador de placas (7).*

- **Rotativos:** Principalmente están formados por una carcasa de hierro galvanizado, en la cual existe un tambor que gira, de material permeable al aire y que se caracteriza por una gran superficie de contacto. Tiene dos zonas que separan el caudal de aire de impulsión del caudal de aire de extracción, de manera adyacente y en contracorriente, de tal manera que mientras el tambor gira, es atravesado por un caudal u otro, en secuencia (*Figura 3.6*). En resumen, durante la rotación el tambor absorbe calor de la corriente de aire más caliente, y lo cede sucesivamente a la corriente de aire más frío (6).



*Figura 3.6.- Esquema de un recuperador rotativo (8).*

- **Por circulación y rociado:** En estos equipos, el intercambio de calor entre el caudal de aire de extracción y el de impulsión se realiza poniendo en contacto ambos caudales con un líquido higroscópico, el cual es rociado en contracorriente a cada caudal sobre un lecho de relleno de los intercambiadores, siendo estos similares en su forma a torres evaporativas (Figura 3.7). Se tienen dos bombas que aseguran la circulación del líquido higroscópico entre las dos torres, mientras que el aire al salir de cada una de ellas atraviesa un separador de gotas para evitar que sean arrastradas (6).

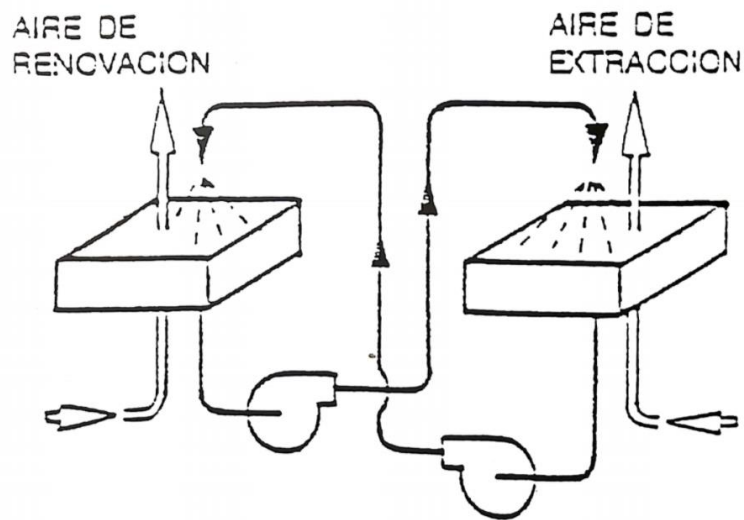


Figura 3.7.- Esquema de un recuperador por circulación y rociado (6).

- **Evaporador-condensador con retorno por gravedad (termosifón):**  
Se constituyen por muchos tubos reunidos mediante un paquete de aletas, formando una batería. Los tubos de calor son, esencialmente, un tubo metálico sellado donde se ha hecho el vacío y se ha cargado con un líquido refrigerante (Figura 3.8). La batería se divide en dos zonas: evaporador o condensador, siendo bañada cada zona por los caudales de aire de impulsión y de extracción, respectivamente (6).

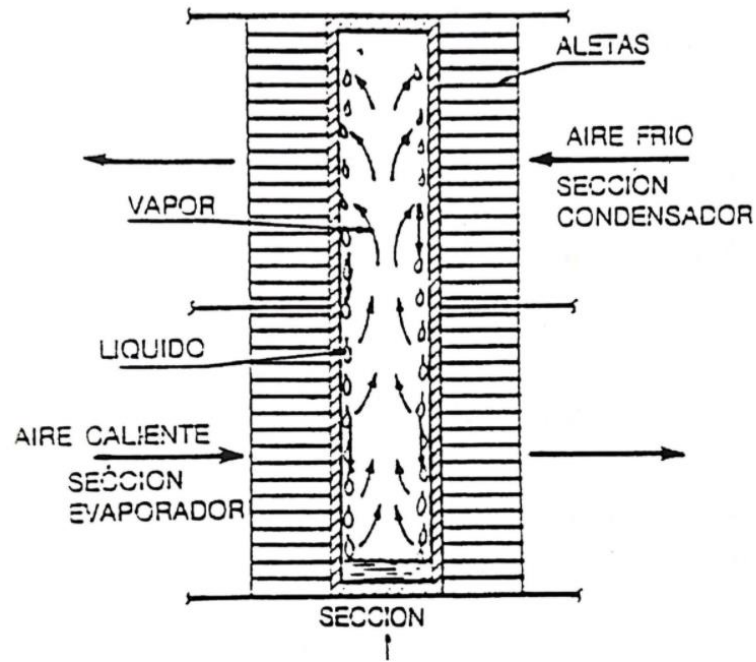


Figura 3.8.- Esquema de un recuperador evaporador-condensador (6).

- **De tubos de calor (heat pipes):**

Este tipo de recuperador se constituye, al igual que los de evaporador-condensador, por un tubo metálico sellado en el cual se ha hecho el vacío y se ha cargado con un líquido refrigerante. A diferencia de los anteriores, estos trabajaban por principio de termosifón, mientras que en ese tipo los tubos de calor están revestidos interiormente por un material poroso de modo que el retorno del condensado a la extremidad caliente del tubo se realiza por acción capilar a través de este. La evaporación del líquido por la extremidad caliente del tubo hace que se produzcan vacíos en la estructura porosa de forma continua, que serán rellenos por nuevos líquidos. De este modo se determina un flujo continuo del propio líquido de la sección de condensación a la de evaporación (Figura 3.9). Al contrario que en los de evaporador-condensador, el flujo del líquido no depende de la gravedad, aunque puede ser ayudado por ella. Al colocar varios tubos uno al lado del otro, formando una batería, se tiene un intercambiador de tubos de calor, el cual se monta en un marco metálico con las conexiones a los conductos por los que circulan los caudales de aire de impulsión y de extracción (6).

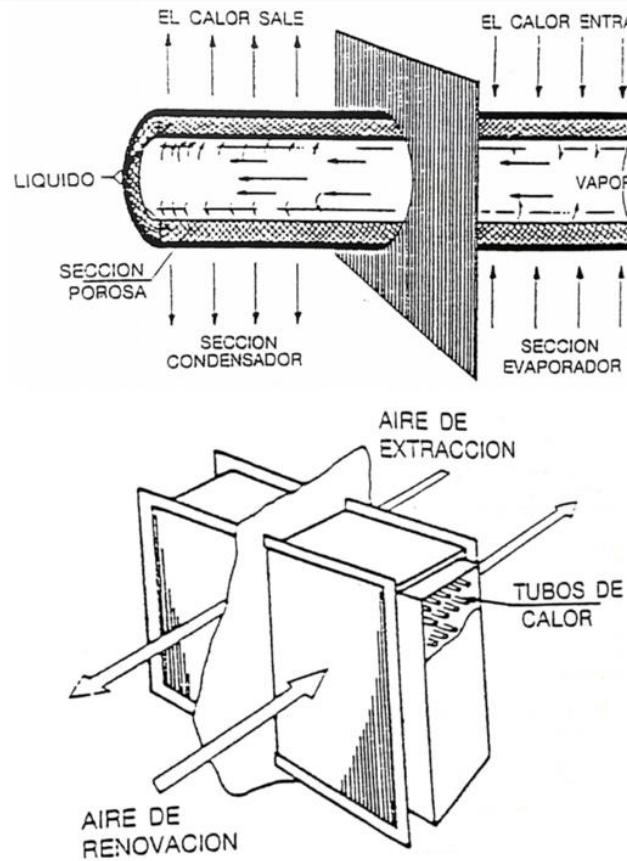


Figura 3.9.- Esquema de un recuperador por tubos de calor (6).

**Dos baterías con bomba (run around):** es el tipo de recuperador que se usa en la UTA que se estudia en este TFG. Está compuesto por dos baterías aleteadas, una de ellas instalada en la sección de entrada de aire a la UTA y la otra instalada en la sección de salida de aire de extracción de la UTA, las dos baterías están conectadas entre sí mediante una red de tubos calorifugados, que permite recircular agua de una batería a la otra, mediante una bomba de circulación (Figura 3.10). De esta forma, se transfiere energía calorífica del aire más caliente al aire más frío, utilizando el agua como fluido intermedio.

Por tanto, se podría clasificar como: sistemas aire/líquido, recuperativo y de calor sensible (6).



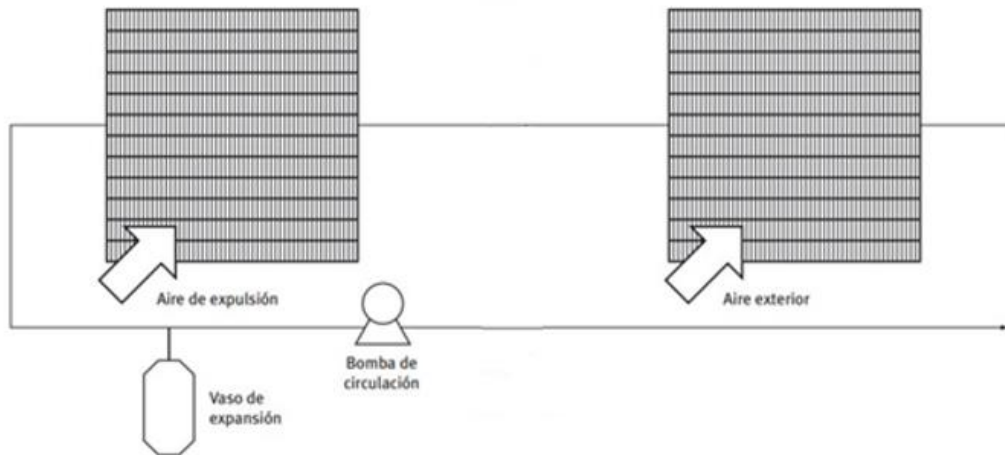


Figura 3.10.- Esquema básico de funcionamiento de un recuperador de dos baterías con bomba run-around (9).

La eficiencia típica de cada tipo de recuperador se presenta en la *Tabla 3.1*. En ella se puede observar como el tipo de dos baterías con bomba es el que menor eficiencia presenta, sin embargo, de estos tipos de recuperadores, en los hospitales realmente solo se pueden usar el de dos baterías con bomba y el de tubos de calor, debido al hecho de que no permiten que exista *by pass* entre el aire de entrada y el de salida, por requisitos de calidad del aire en el quirófano. Entre estos dos últimos tipos de recuperadores mencionados, el de tubos de calor presenta mayor eficiencia, sin embargo, su principal desventaja reside en que no se puede parar de manera rápida y puede provocar un efecto contrario en la aportación de energía en los periodos de cambios significativos en la temperatura exterior, como pueden ser primavera u otoño.

Tabla 3.1.-Eficiencia típica de los principales recuperadores de calor usados en las UTAs, según el tipo (6).

RECUPERADOR	CALOR TRANSFERIDO	EFICIENCIA (%)
Rotativo	Total	70-90
Placas	Sensible	45-65
Circulación y rociado	Total	60-70
Dos baterías con bomba	Sensible	40-60
Evaporador-condensador	Sensible	50-70
Tubos de calor	Sensible	50-80

### 3.3.6.2. Recuperador a estudio.

El recuperador estudiado en este TFG es de la empresa TROX, modelo TKM 50, y da servicio al quirófano PP-S3.4 del bloque quirúrgico del HCUVa (Figura 3.11 y Figura 3.12).



Figura 3.11.- Fotografía de la zona exterior de la UTA donde se puede apreciar la posición del recuperador y de la bomba.



Figura 3.12.- Fotografía de la zona exterior de la UTA, donde se aprecia el conducto del recuperador junto con la sonda dispuesta en la medición de datos.



**a) Materiales.**

Las baterías están integradas en la UTA, están montadas sobre una carcasa de acero galvanizado. Las baterías son de aletas de aluminio y tubos de cobre como se describió anteriormente.

**b) Características y funcionamiento.**

El aire más caliente (extracción o exterior), al pasar por la batería correspondiente, en forma de flujos cruzados, calienta el agua que se encuentra en su interior, la bomba circuladora mueve ese agua caliente a la otra batería, por donde pasa el aire frío que absorbe el calor del agua, igual que en el caso anterior como flujo cruzado, y enfría el agua, que es recirculada otra vez a la batería inicial y el agua se vuelve a calentar (6).

El agua en realidad es una solución acuosa de glicol etilénico, con la finalidad de evitar posibles congelaciones, cuando el aire exterior está por debajo de 0°C.

Generalmente se usa para recuperar calor sensible, variando la temperatura y manteniendo la humedad específica constante, sin embargo, en determinados momentos de funcionamiento del equipo, permite también la recuperación del calor latente, esto se produce cuando la temperatura de uno de los flujos disminuye a un valor por debajo de su temperatura de rocío, y por tanto se produce condensación, en este caso se produce una mejora considerable en el rendimiento.

El recuperador de calor, para su funcionamiento, requiere de una diferencia de temperatura entre el flujo de aire exterior y el de extracción o sala. Cuando las condiciones térmicas del aire exterior con respecto al aire extraído (temperatura de sala) son favorables para la recuperación de energía, el sistema de control acciona la bomba de recirculación, de tal forma que el agua transfiere la energía de una corriente de aire a otra. En este caso la bomba se acciona cuando la diferencia entre la temperatura exterior y sala en valor absoluto supera los 3°C, *Ecuación (1)*.

$$|T_{ext} - T_{sala}| \geq 3^{\circ}C \quad (1)$$

## 4. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA, POTENCIA RECUPERADA Y ENERGÍA EN PERIODOS TRANSITORIOS. C.O.P. DEL SISTEMA.

En este apartado se detallan las expresiones que posteriormente serán utilizadas en el análisis de este TFG. Se explican y se razonan las expresiones de la eficiencia del sistema, la potencia recuperada, la energía recuperada en periodos transitorios y el C.O.P. del sistema.

### 4.1. EFICIENCIA.

Cuando se estudia la eficiencia del sistema de recuperación de energía, se debe tener en cuenta la diferencia existente entre la eficacia del equipo intercambiador de calor (las dos baterías), y la del sistema de recuperación de energía en todo su conjunto. Se puede estudiar la energía sensible, latente o total intercambiada, por lo que se habla de eficiencia sensible, latente y total.

La eficiencia de recuperación, según la empresa *TROX*, para sus caudales de impulsión y retornos típicos, es de aproximadamente un 43%.

De manera general, la eficiencia del recuperador de energía se define según la *Ecuación (2)*, y relaciona la energía útil recuperada con la energía máxima que se podría llegar a recuperar.

$$\varepsilon = \frac{\text{Energía recuperada}}{\text{Máxima energía recuperable}} \quad (2)$$

El sistema de notación (*Figura 4.1*) que se usará es el siguiente; para el primer subíndice se tendrá:

- "1" para las propiedades del aire que entra por primera vez en el recuperador.
- "2" para el aire que entra por segunda vez en el recuperador.

Y el segundo subíndice se referirá a en qué punto de la batería es considerada la propiedad:

- "1" para la entrada
- "2" para la salida

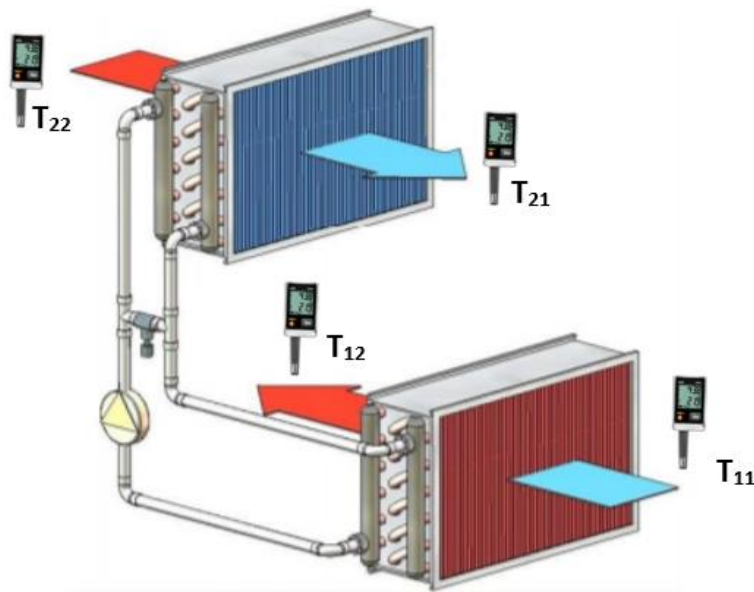


Figura 4.1.- Esquema básico de un recuperador de doble batería con bomba (run around) con el sistema de notación utilizado (10).

Por tanto, la eficiencia se puede expresar según la Ecuación (3), siendo la energía útil recuperada la diferencia que existe entre los puntos '12' y '11', ya que representa el ahorro energético que se consigue en la instalación gracias al recuperador, mientras que la máxima recuperable sería entre los puntos '21' y '11', que representan la diferencia entre la temperatura de sala y la temperatura exterior.

$$\varepsilon = \frac{Q_{ent} (x_{12} - x_{11})}{Q_{min} (x_{21} - x_{11})} = \frac{Q_{ext} (x_{22} - x_{21})}{Q_{min} (x_{11} - x_{21})} \quad (3)$$

Donde:

- $Q_{ent}$ : Caudal de aire de entrada, m<sup>3</sup>/h.
- $Q_{ext}$ : Caudal de aire de extracción, m<sup>3</sup>/h.
- $Q_{min}$ : Caudal de aire menor entre los de entrada y extracción, m<sup>3</sup>/h.
- X: Puede ser temperatura de bulbo seco, humedad absoluta o entalpía.

En función de la propiedad termodinámica que se utilice en la expresión anterior se obtendrían valores de eficiencia térmica (solo se transfiere calor sensible, x=temperatura de bulbo seco), energética (calor total, x=entalpía) o de humedad (x=humedad absoluta) (6).

## 4.2. POTENCIA ÚTIL RECUPERADA EN PERIODOS ESTACIONARIOS.

La potencia útil recuperada, teniendo en cuenta únicamente los periodos estacionarios de funcionamiento del sistema, se entiende por aquella potencia que se recupera en la batería de impulsión, ya que, si se tuviera en cuenta la de extracción, existirían una serie de pérdidas debidas a que los tubos del recuperador no tienen aislamiento, y no se tendrían en cuenta. Al considerar los periodos estacionarios, no se tendrá en cuenta la inercia que existe en las propias baterías, donde acumulan energía interna.

Se distingue, al igual que la eficiencia, en potencia recuperada sensible (*Ecuación (4)*), latente (*Ecuación (6)*) y total (*Ecuación (5)*).

$$\text{Potencia sensible recuperada [kW]} = C_{p\text{aire}} * \rho_{\text{aire}} * Q_{\text{imp}} * (T_{12} - T_{11}) \quad (4)$$

$$\text{Potencia total recuperada [kW]} = \rho_{\text{aire}} * Q_{\text{imp}} * (h_{12} - h_{11}) \quad (5)$$

$$\text{Potencia latente recuperada [kW]} = \text{Potencia total} - \text{Potencia sensible} \quad (6)$$

Donde tenemos que:

- $C_{p\text{aire}} = 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$  = Calor específico del aire a 25 °C.
- $\rho_{\text{aire}} = 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  = densidad del aire a 25 °C.
- $Q_{\text{imp}} = \text{Caudal de impulsión de aire} = 2220 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,617 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ .
- $T_2 = \text{Temperatura del aire de impulsión tras pasar por el recuperador [}^\circ\text{C]}$ .
- $T_1 = \text{Temperatura del aire de impulsión antes de pasar por el recuperador [}^\circ\text{C]}$ .
- $h_{12} = \text{Entalpía del aire de impulsión tras pasar por el recuperador } \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg as}} \right]$ .
- $h_{11} = \text{Entalpía del aire de impulsión antes de pasar por el recuperador } \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg as}} \right]$ .

### 4.3. ENERGÍA EN PERIODOS TRANSITORIOS.

A la hora de evaluar la energía intercambiada teniendo en cuenta los periodos transitorios, en los cuales se produce una variación del caudal de aire de extracción, se tiene en cuenta la inercia de las baterías, es decir, la energía que interna que se acumula en las propias baterías en función del tiempo, por lo que se tiene la Ecuación (7).

$$\dot{m}_{imp} * (h_{12} - h_{11})dt + \frac{dE_1}{dt} dt = \dot{m}_{ret} * (h_{21} - h_{22})dt + \frac{dE_2}{dt} dt \quad (7)$$

Donde:

- $\dot{m}_{imp}$  = flujo másico del aire de impulsión  $[\frac{kg}{s}]$ .
- $\dot{m}_{ret}$  = flujo másico del aire de retorno  $[\frac{kg}{s}]$ .
- $\frac{dE_1}{dt} dt$  = Energía interna de la batería de impulsión del recuperador.
- $\frac{dE_2}{dt} dt$  = Energía interna de la batería de extracción del recuperador.
- $h_{12}$  = Entalpía del aire de impulsión tras pasar por el recuperador  $[\frac{kJ}{kg as}]$ .
- $h_{11}$  = Entalpía del aire de impulsión antes de pasar por el recuperador  $[\frac{kJ}{kg as}]$ .
- $h_{21}$  = Entalpía del aire de impulsión tras pasar por el recuperador  $[\frac{kJ}{kg as}]$ .
- $h_{22}$  = Entalpía del aire de impulsión antes de pasar por el recuperador  $[\frac{kJ}{kg as}]$ .

### 4.4. C.O.P. DEL SISTEMA.

Para la evaluación del sistema de recuperación en todo su conjunto, existe el coeficiente de prestación **C.O.P.** (Coefficient of Perfomance), que representa la relación entre el ahorro energético que produce la instalación y el gasto energético que consume para su funcionamiento, Ecuación (8). De esta manera, el C.O.P. da una idea general de la eficiencia del sistema del recuperador en todo su conjunto. Se divide en dos tipos:

- El C.O.P. instantáneo.
- El C.O.P. medio estacional (S.C.O.P.).

$$C.O.P. = \frac{\text{Efecto Energético Obtenido}}{\text{Energía Empleada}} \quad (8)$$

#### 4.4.1. C.O.P. instantáneo.

El efecto energético obtenido, para el **C.O.P instantáneo**, se refiere a la energía recuperada para calentar o refrigerar el aire que se logra en función de las condiciones exteriores (estación climática), y se expresa en términos de potencia. En lo referido a la energía consumida en el funcionamiento del recuperador, se contabilizan todos los consumos de potencia que se necesiten para que la instalación funcione de forma correcta, generalmente estos consumos son la energía eléctrica consumida por los ventiladores para vencer las pérdidas de carga provocadas por el recuperador instalado ( $P_v$ ) y la bomba de recirculación ( $P_b$ ) (6).

De esta forma, tendríamos la *Ecuación (9)*.

$$C.O.P. = \frac{C}{P_v + P_b} \quad (9)$$

Donde:

- C: Capacidad de refrigeración o calefacción obtenida (kW).
- $P_v$ : Consumo por las pérdidas de carga (kW).
- $P_b$ : Consumo de la bomba (kW).

El consumo originado por las pérdidas de carga se calcula mediante la *Ecuación (10)*.

$$P_v = \frac{Q * \Delta P}{1000 * \eta} \quad (10)$$

Donde:

- $P_v$ : Consumo de potencia por pérdidas de carga (kW)
- Q: Caudal de aire ( $m^3/s$ )
- $\Delta P$ : Pérdida de presión (Pa).
- $\eta$ : Rendimiento del ventilador y del motor de la bomba.

Y el consumo originado por la bomba de recirculación se calcula mediante la *Ecuación (11)*.

$$P = V * I * \cos\delta \quad (11)$$

Donde:

- P: Consumo de potencia por la bomba (kW).

- V: Voltaje de la bomba (kV).
- I: Intensidad de corriente de la bomba (A).
- $\cos\delta$ : Factor de potencia de la bomba.

#### 4.4.2. S.C.O.P. medio estacional.

El **S.C.O.P. medio estacional** es la relación entre la energía recuperada útil para calentar o refrigerar el aire de impulsión y la energía consumida debida al uso del recuperador, lo que representa la integral de la *Ecuación (12)* a lo largo de las horas de funcionamiento del sistema en cada período, período de calefacción y período de refrigeración.

Por tanto, para evaluarlo se requiere comprobar el comportamiento del sistema de recuperación y de sus componentes al variar la carga térmica (las condiciones exteriores) durante un periodo de tiempo determinado, siguiendo la *Ecuación (12)*, lo cual ofrece una información más completa sobre la eficiencia del sistema, debido a la variación que ocurre en los periodos no estacionarios (6).

$$SCOP = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} COP dt \quad (12)$$

## 5. ADQUISICIÓN DE DATOS.

### 5.1. INTRODUCCIÓN.

En este apartado se presentan los diferentes datos y parámetros que sirven para realizar este TFG.

Los datos y parámetros que se han utilizado son los recogidos durante el periodo de prácticas, realizadas desde el día 30/09/2019 hasta el día 29/11/2019, existiendo tres tipos de datos: a) los datos que registra el SCADA del propio hospital, b) los registrados por sondas colocadas por el Grupo de Investigación Reconocido de Termotecnia en el climatizador a estudio y c) las medidas realizadas de forma puntual para testear los datos recogidos. Se han realizado medidas en periodos de dos minutos, lo que supone alrededor de 98.000 registros, por lo que se tienen alrededor de 980.000 datos.

### 5.2. DATOS REGISTRADOS POR EL SCADA DEL HCUVa.

Como se ha comentado anteriormente, el HCUVa dispone de un programa, Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA), que gestiona Ferrovial Servicios, en el que se reciben todos los parámetros y medidas de Hospital, con los que se regulan y controlan los diferentes sistemas. Dado la gran cantidad de registros y la limitación de capacidad de almacenamiento del sistema, cada semana se reescriben los archivos, por lo que para seguimientos de más de una semana es necesario que Ferrovial Servicios genere un archivo específico donde se almacenen los datos del sistema a estudio.

Para este estudio se creó un archivo donde se recogían los datos de la UTA del quirófano PP-S3.4. del HCUVa, donde se ubica el recuperador a estudio. En la imagen de la pantalla que proporciona el SCADA de dicha UTA (*Figura 5.1*) en un momento determinado, se puede observar claramente cómo se disponen los distintos elementos que componen la UTA.



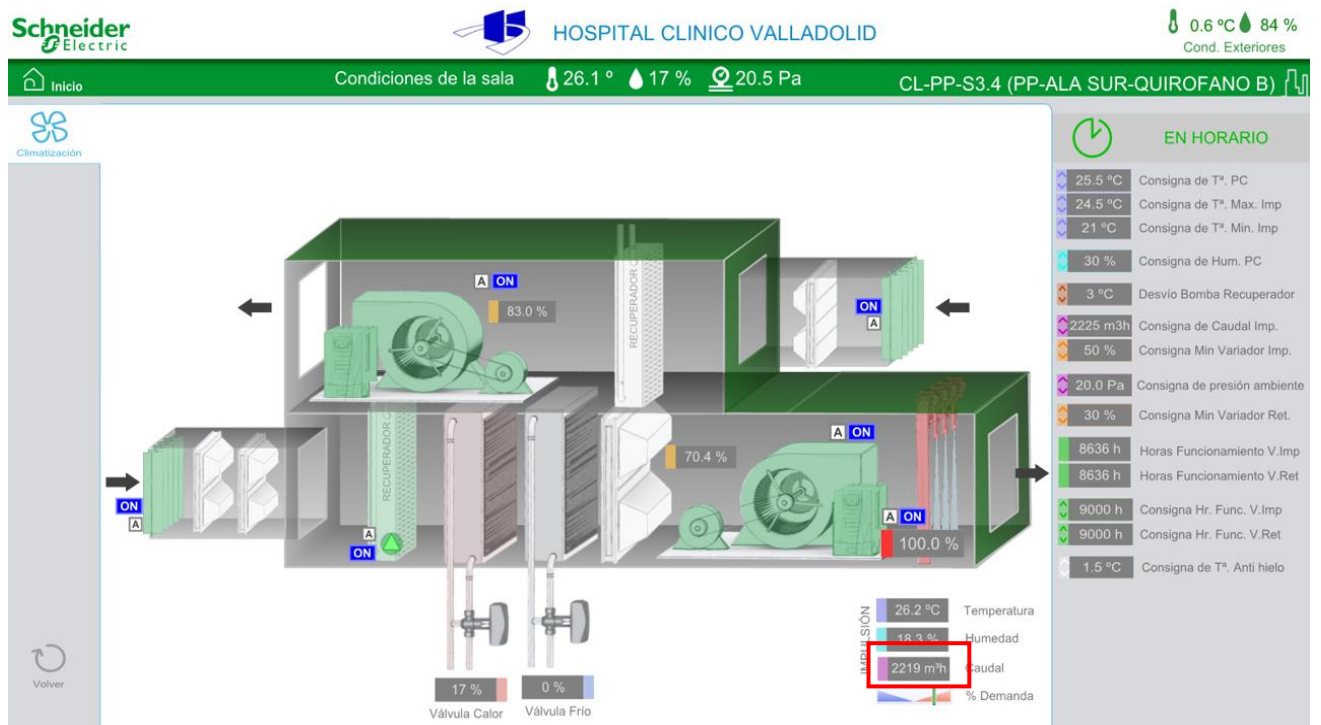


Figura 5.1.- Pantalla principal del SCADA para la climatizadora PP-S3.4, donde se pueden observar los distintos elementos y valores que proporciona. En el recuadro rojo se observa el caudal de impulsión.

Los datos que registró el sistema se recogen en la *Tabla 5.1*Tabla 3.1.

Tabla 5.1.- Datos registrados por el sistema del climatizador PP-S3.4.

Unidad	Impulsión				Retorno			
	A	Hz	W	rpm	A	Hz	W	rpm
Parámetro	Corriente del variador de impulsión	Frecuencia del variador de impulsión	Potencia del variador de impulsión	Velocidad del variador de impulsión	Corriente del variador de retorno	Frecuencia del variador de retorno	Potencia del variador de retorno	Velocidad del variador de retorno

Los datos del sistema se registran en un fichero tipo Excel, que permite su tratamiento y conversión. Estos datos fueron tomados desde el día 07/02/2020 hasta el día 20/02/2020, en intervalos de 2 minutos, obteniendo un total de 9.289 registros.

### 5.3. DATOS MEDIDOS EN EL CLIMATIZADOR.

Los datos que registra el SCADA son parámetros que se utilizan principalmente para la regulación del sistema, por lo que, para realizar un estudio más específico sobre un recuperador, es necesario colocar sistemas de adquisición de datos externos al sistema.

Para la realización de este TFG se han instalado sondas de:

- Temperatura ambiente.
- Temperatura de contacto.
- Humedad relativa.

#### 5.3.1. Temperatura y humedad relativa del aire de impulsión y de retorno y temperatura del fluido del recuperador.

Los equipos utilizados fueron: cuatro sondas de temperatura ambientales y humedad relativa de la marca Testo modelo 175 H1 y dos sondas de temperatura ambiente y temperatura de contacto de la marca Testo modelo 175 T2 (*Figura 5.2*), el registro de temperaturas se hizo, como se ha mencionado, cada dos minutos.



*Figura 5.2.- Sondas utilizadas en el seguimiento del recuperador de calor.*

La colocación de las sondas se realizó el día 07/10/2019 y se colocaron en la UTA a estudio en los puntos indicados en la *Figura 5.3*.

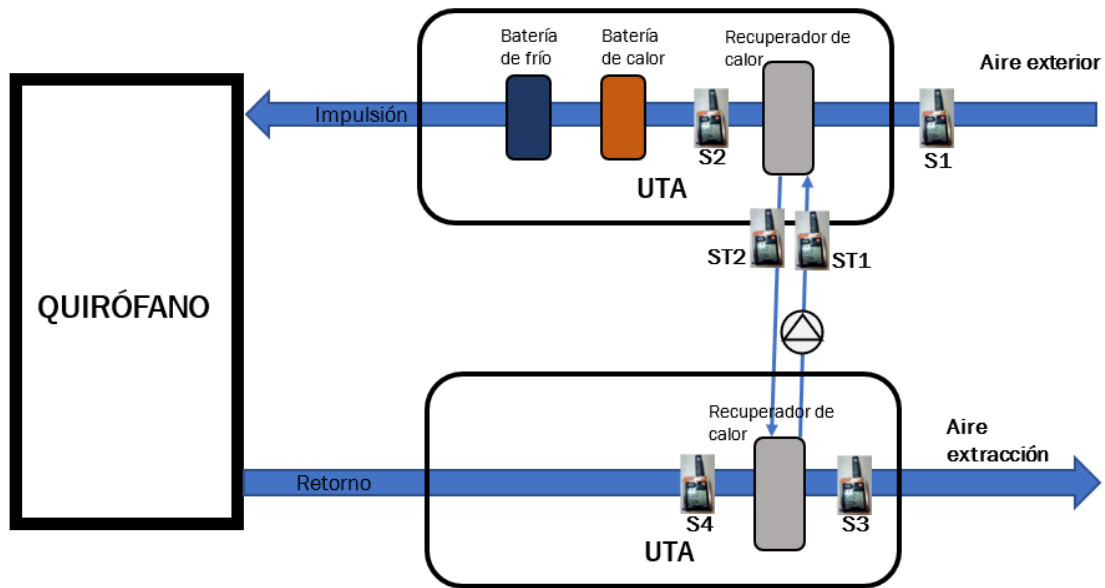


Figura 5.3.- Esquema de la posición en la que fueron colocadas las sondas en la UTA a estudio.

Se colocaron un total de 6 termómetros registradores de la siguiente manera:

Para los registradores de temperatura del aire, se usaron 4 termómetros, en las posiciones indicadas en la *Figura 5.4*.

El primero, S1, se situaba en la entrada de aire exterior. El segundo, S2, tras la batería del recuperador de calor en la impulsión, antes de las baterías de calor y frío de la UTA. El tercero, S4, se situaba en el retorno, antes de la batería del recuperador, mientras que el cuarto, S3, estaba colocado tras la batería del recuperador de retorno (*Figura 5.5*).

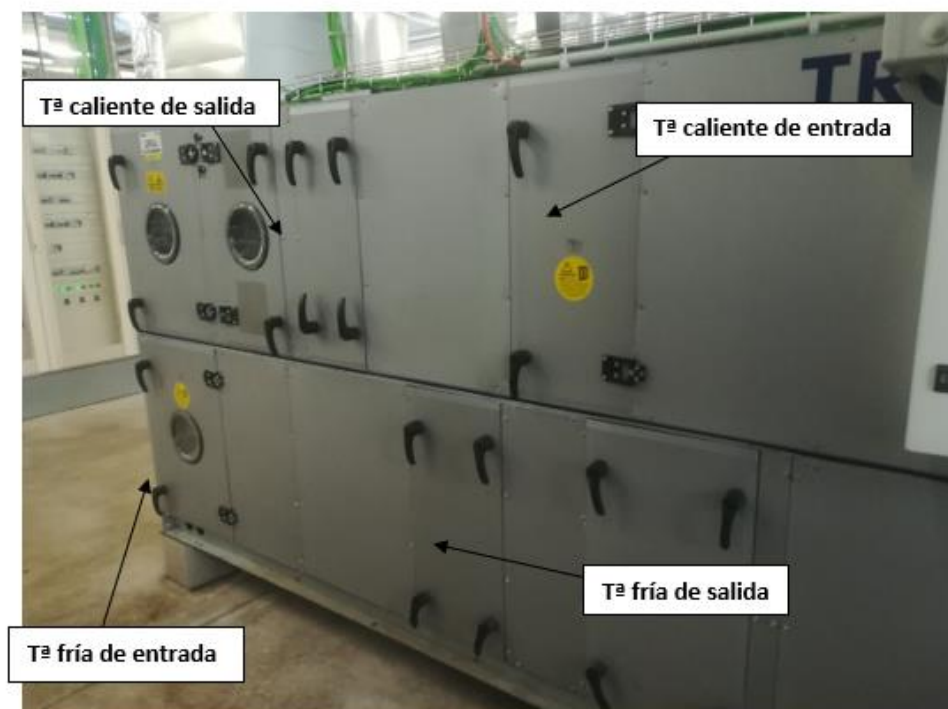


Figura 5.4.- Fotografía de la climatizadora PP-S3.4 donde se ve la disposición de las sondas.



Figura 5.5.- Fotografía de la posición de una de las sondas dentro del conducto.

Para los registradores de temperatura del agua del recuperador se usaron 2 termómetros, en las siguientes posiciones (*Figura 5.6 y Figura 5.7*):

El primero, ST1, estaba colocado en la tubería del circuito del recuperador, antes de la entrada a la batería de retorno, mientras que el segundo, ST2, estaba colocado tras la batería de retorno.



*Figura 5.6.- Fotografías donde se ve la posición de los termómetros para medir la temperatura del agua del recuperador.*



*Figura 5.7.- Fotografía de la posición en el conducto de una de las sondas que registraba la temperatura del líquido del recuperador.*

Estos 6 termómetros registradores fueron colocados, y empezaron a tomar medidas el día 7/10/2019 a las 13:00 horas. Fueron programados para tomar medidas cada 2 minutos, e interrumpidamente registraron los valores hasta el día 20/02/2020 a las 09:36 horas.

De esta forma se obtuvieron en total 98.650 registros de cada termómetro, uno por cada intervalo de 2 minutos.

Los termómetros registradores colocados dentro del conducto de aire daban los valores tanto de la temperatura [°C], como de la humedad relativa [%]. Mientras que los colocados en el conducto del recuperador medían la temperatura del agua del recuperador y la temperatura ambiente.

En el mes de febrero, se registraron en el SCADA los valores de la velocidad del ventilador de retorno [rpm], para así poder elegir los datos en función del régimen de funcionamiento de la UTA. De esta forma, se tienen los valores que ya se habían medido de temperaturas y humedades relativas, junto con la velocidad del ventilador de retorno, para un total de 9.289 registros por cada termómetro lo que hace un total de 92890 datos, que son los que se han utilizado finalmente para realizar este estudio (Tabla 5.2).

Tabla 5.2.- Fragmento del Excel con los datos obtenidos a través de las sondas.

Valores	Fecha	Rpm ventilado	Text S1 real [%]	T imp S2 real [%]	T ret S4 real [%]	T ret S3 real [%]	T líquido entrad	T líquido sal	HR S1 real [%]	HR S2 real [%]	HR S4 real [%]	HR S3 real [%]
1	07/02/2020 12:00	1211	3,979952608	10,00172546	19,8707202	12,39950972	16,53682626	13,93222	71,9928514	50,02210483	26,84925717	38,80961162
2	07/02/2020 12:02	2680	3,658125011	9,892380163	19,76335809	12,07345908	16,33348854	14,13244	73,38743765	50,02210483	27,38606771	40,11381418
3	07/02/2020 12:04	3752	3,44357328	9,783034864	19,76335809	12,39950972	16,23181968	13,93222	74,24564457	50,3145013	27,17134349	39,4617129
4	07/02/2020 12:06	3610	3,979952608	9,673688955	19,8707202	12,07345908	16,23181968	13,83211	72,52923072	50,56883133	27,06398138	40,11381418
5	07/02/2020 12:08	3682	3,979952608	9,892380163	19,8707202	12,39950972	16,53682626	13,83211	72,63650659	50,56883133	27,2787056	39,4617129
6	07/02/2020 12:10	3489	3,872676742	9,892380163	19,76335809	12,07345908	16,4351574	14,03233	72,95833419	50,56883133	27,49342981	40,11381418
7	07/02/2020 12:12	3074	4,087228473	10,00172546	19,65599598	12,39950972	16,53682626	13,93222	72,20740313	50,67817663	27,60079192	39,67907999
8	07/02/2020 12:14	3591	4,40905607	10,00172546	19,65599598	11,63872489	16,33348854	14,13244	71,13464447	50,89686723	28,03024035	41,52670029
9	07/02/2020 12:16	3751	4,301780204	10,22041606	19,54863388	12,50819926	16,63849512	14,03233	71,3491962	50,02210483	27,92287824	39,4617129
10	07/02/2020 12:18	3731	4,087228473	10,11107076	19,44127177	12,39950972	16,63849512	14,33266	72,74378245	50,67817663	28,24496456	39,57039645
11	07/02/2020 12:20	3840	4,301780204	10,00172546	19,33390966	12,29082617	16,63849512	14,13244	71,9928514	51,11555782	28,45968878	39,89644709
12	07/02/2020 12:22	3138	4,730883667	10,32976136	19,33390966	12,50819926	16,63849512	14,13244	70,70594101	50,89686723	28,45968878	39,67907999
13	07/02/2020 12:24	3626	4,730883667	10,00172546	19,22654755	11,85609198	16,33348854	14,43277	69,95460995	51,66228432	28,78177551	41,20064965
14	07/02/2020 12:26	3779	4,40905607	9,892380163	19,11918545	11,4213578	16,13015082	14,13244	71,45647207	51,22490312	29,10386142	42,7221931
15	07/02/2020 12:28	3445	4,516318936	9,673688955	19,22654755	11,31267425	16,02848196	13,93222	71,45647207	51,88097491	28,99649931	42,7221931
16	07/02/2020 12:30	3890	4,838159532	10,22041606	19,22654755	12,07345908	16,4351574	13,83211	70,27643755	51,00621252	28,88913721	40,76591546
17	07/02/2020 12:32	2111	4,623607801	10,00172546	19,11918545	11,74740844	16,33348854	14,23255	70,81281687	51,44359972	29,10386142	41,63538384
18	07/02/2020 12:34	3495	4,945435398	10,00172546	19,11918545	11,74740844	16,23181968	14,03233	69,84733408	51,77162962	29,21122353	41,63538384
19	07/02/2020 12:36	3856	4,945435398	10,22041606	19,11918545	12,18214262	16,4351574	14,03233	69,95460995	51,00621252	29,21122353	40,76591546
20	07/02/2020 12:38	2966	4,838159532	10,32976136	19,11918545	11,96477553	16,53682626	14,33266	70,49098928	50,3145013	29,42594774	41,52670029
21	07/02/2020 12:40	3527	5,052711264	10,11107076	19,01182334	11,74740844	16,33348854	14,33266	69,63278235	51,22490312	29,42594774	41,7406738
22	07/02/2020 12:42	3754	5,267262995	10,43910666	19,01182334	12,29082617	16,4351574	14,23255	68,77457543	50,67817663	29,42594774	40,87459901
23	07/02/2020 12:44	3523	5,267262995	10,11107076	19,01182334	11,4213578	16,23181968	14,33266	69,20367889	51,77162962	29,85539617	43,37432059
24	07/02/2020 12:46	3065	5,267262995	10,00172546	19,01182334	10,87794006	16,02848196	14,23255	69,31095476	51,77162962	29,74803407	44,24378896
25	07/02/2020 12:48	3624	5,159987129	10,54845196	19,01182334	12,29082617	16,53682626	14,13244	69,31095476	50,24079543	29,74803407	41,0919661
26	07/02/2020 12:50	3788	5,267262995	10,65779725	19,01182334	12,39950972	16,74016399	14,53288	69,31095476	49,91275954	29,85539617	40,7459901
27	07/02/2020 12:52	3483	5,267262995	10,22041606	19,01182334	11,74740844	16,53682626	14,63299	69,53550649	51,33424842	29,64067196	42,07011802
28	07/02/2020 12:54	3637	5,589090592	10,65779725	19,01182334	12,29082617	16,53682626	14,23255	68,34547196	50,02210483	29,64067196	41,20064965
29	07/02/2020 12:56	2748	6,12546992	10,43910666	18,90446123	11,2039907	16,13015082	14,63299	66,30723052	51,22490312	30,07012039	43,37432059
30	07/02/2020 12:58	3586	6,232745785	10,87648785	19,01182334	12,39950972	16,63849512	14,43277	65,87812706	50,02210483	29,85539617	41,0919661
31	07/02/2020 13:00	3522	6,018194054	10,54845196	19,01182334	11,31267425	16,33348854	14,83321	66,95088571	50,02210483	29,96275828	43,26563704
32	07/02/2020 13:02	1181	6,12546992	10,43910666	18,90446123	11,63872489	16,23181968	14,53288	65,87812706	50,78752193	30,07012039	42,83092085
33	07/02/2020 13:04	2701	5,803642323	10,22041606	18,90446123	10,66057297	16,02848196	14,43277	67,27271331	51,66228432	30,17748249	45,33062443
34	07/02/2020 13:06	3736	5,481814726	9,564344266	18,68973702	10,11715523	15,31679994	14,23255	68,77457543	53,5211544	31,89527621	49,24323212
35	07/02/2020 13:08	3102	5,696366457	10,22041606	18,68973702	11,63872489	16,02848196	13,63189	67,9163685	51,66228432	32,43208675	45,65667507

### 5.3.1.1. Calibración de las sondas.

Todos estos datos fueron corregidos con la calibración de los termómetros registradores, realizada durante el verano de 2020 por el Grupo de Investigación Reconocido de Termotecnia de la Universidad de Valladolid. Los valores tanto de la ordenada en el origen como de la pendiente de la recta de calibración, como de la regresión de cada uno de los termómetros se muestran en la *Tabla 5.3*.

Para las humedades relativas, durante la calibración se observó que las soluciones que se utilizaban al calibrarlas dependen mucho de si hay sal para saturación o no, mientras que para humedades relativas superiores al 35% la precisión era válida.

Se considera que estas calibraciones tienen un error genérico del 5%.

Tabla 5.3.- Parámetros de las rectas de calibración de las distintas sondas utilizadas.

Termómetros Datos	T <sub>11</sub>	T <sub>12</sub>	T <sub>21</sub>	T <sub>22</sub>	ST <sub>1</sub>	ST <sub>2</sub>
Ordenada en el origen	-0,2345	-0,6091	-0,1177	-0,2739	-0,8164	-0,6195
Pendiente	1,0233	1,0199	1,0044	1,0125	1,0512	1,0446
Regresión	0,9998	0,9997	0,9997	0,9998	0,9992	0,9989



### 5.3.2. Flujo volumétrico del aire de retorno.

Mediante los datos del SCADA, como se ha visto, se obtuvo el valor del flujo volumétrico de entrada, el cual es constante.

Sin embargo, el flujo volumétrico de retorno no es constante, sino que varía adaptándose a los cambios de presión de la sala del quirófano, como ya se mencionó en el *Apartado 3.3.4*.

#### 5.3.2.1 Método de obtención de datos.

La medida del flujo volumétrico de retorno se hizo de la siguiente manera:

Se utilizó un anemómetro TESTO de hilo caliente, modelo 435, que fue colocado en el conducto de extracción de aire (*Figura 5.8*), para ello antes se realizó una malla de puntos donde medir la velocidad del aire en cada punto. Multiplicando el área asociada a cada punto por su velocidad, se obtenía el caudal asociado en ese punto, y sumando todos los valores resultaba el caudal.



*Figura 5.8.- Fotografía del climatizador con referencia a la posición del anemómetro.*

La posición se eligió teniendo en cuenta las compuertas que había y la facilidad para realizar la medida. Para poderlo colocar, se usó un soporte con una pinza con el cual se podía elegir la posición exacta en la que se quería colocar para realizar las medidas (*Figura 5.9*).





Figura 5.9.- Fotografía de la sonda y el soporte colocados.

De esta manera quedaba colocado el dispositivo (Figura 5.10), a la izquierda se podía leer la velocidad del ventilador de retorno [rpm], para poder saber en qué régimen estaba en cada momento, y en el anemómetro se podía el valor de la velocidad del aire.



Figura 5.10.- Fotografía del anemómetro y la sonda con la compuerta abierta.

Una vez estaba todo colocado, se cerraba la compuerta para que no afectara la diferencia de presión al valor de la medida, quedando de la siguiente manera (Figura 5.11).



Figura 5.11.- Fotografía del anemómetro en el momento de la toma de medidas.

De esta forma, se tomaron valores de velocidad en los momentos en que el ventilador trabajaba en régimen estacionario, es decir, alrededor de 3500-3800 rpm, que era cuando la puerta del quirófano estaba cerrada y no había variaciones de presión en la sala.

### 5.3.2.2. Resultados.

Una vez estaba todo preparado, se procedió a la toma de datos de la velocidad del aire en el conducto de extracción, teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- El flujo de la velocidad del aire de extracción es perpendicular al área transversal del conducto, por tanto el flujo volumétrico es el resultado del área transversal por la velocidad del aire.
- El flujo de aire de extracción es incompresible.

Por tanto, el flujo volumétrico del aire de extracción es el resultado de el producto del área transversal por la velocidad media, *Ecuación (13)*.

$$\dot{v} = A * \bar{v} \quad (13)$$

Siendo:

- $\dot{v}$  = flujo volumétrico del aire en el conducto de extracción [ $\frac{m^3}{s}$ ].
- $A$  = área transversal del conducto [ $m^2$ ].
- $\bar{v}$  = velocidad media del aire en el conducto de extracción [ $\frac{m}{s}$ ].

De esta manera, se dividió el conducto en 9 áreas (*Figura 5.12*), se tomaron 10 medidas de velocidad en el punto medio de cada área y se hizo la media para cada una. La velocidad total se obtuvo haciendo la media de estas nueve velocidades para después hallar la velocidad total haciendo la media de estas velocidades, obteniendo

finalmente un flujo volumétrico de aire en el conducto de extracción de 1.313,7 m<sup>3</sup>/h (Tabla 5.4).

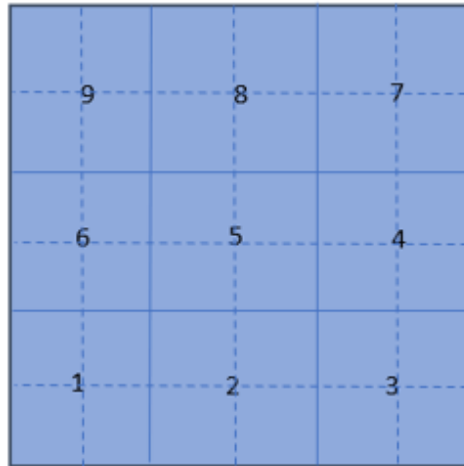


Figura 5.12.- Posiciones de las medidas tomadas dentro del conducto.

Tabla 5.4.- Excel con la tabla de datos, la media para cada zona, el caudal por cada subárea y el caudal total.

	Datos tomados a 3913 rpm ( velocidad máxima)								
	Velocidad (m/s)								
	Abajo izq	Abajo centro	Abajo dcha	Medio dcha	Medio centro	Medio izqda	Arriba dcha	Arriba centro	Arriba izqda
Puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1,07	5,51	4,86	8,19	7,81	2,18	8,75	5,88	4,37
	0,9	5,59	4,95	8,88	7,7	2,07	8,29	6,23	4,86
	1,09	5,36	5,17	8,73	7,06	2,11	7,98	6,2	4,11
	1,18	5,73	5,16	9,22	7,72	2,12	8,01	6,21	4,56
	0,88	5,6	5,31	8,89	7,45	1,78	8,63	6,02	4,23
	0,86	5,57	5,15	9,09	6,99	2	8,37	6,19	4
	0,82	5,93	5,11	8,76	7,35	2,12	8,24	6,05	4,4
	0,74	5,86	5,17	8,62	7,19	1,73	8,55	6,16	4,35
	1	5,63	5,11	9,03	7,01	1,74	8,19	6,24	4,87
	0,94	5,53	5,18	8,75	7,08	1,68	8,22	6,16	4,25
Velocidad media (m/s)	0,948	5,631	5,117	8,816	7,336	1,953	8,323	6,134	4,4
Caudal subárea (m3/s)	0,00710958	0,04223002	0,03837525	0,06611612	0,05501677	0,01464664	0,06241884	0,0460023	0,03299806
Caudal total (m3/s)	0,36491359								
Caudal total (m3/h)	1313,68893								

## 6. ANÁLISIS DE DATOS.

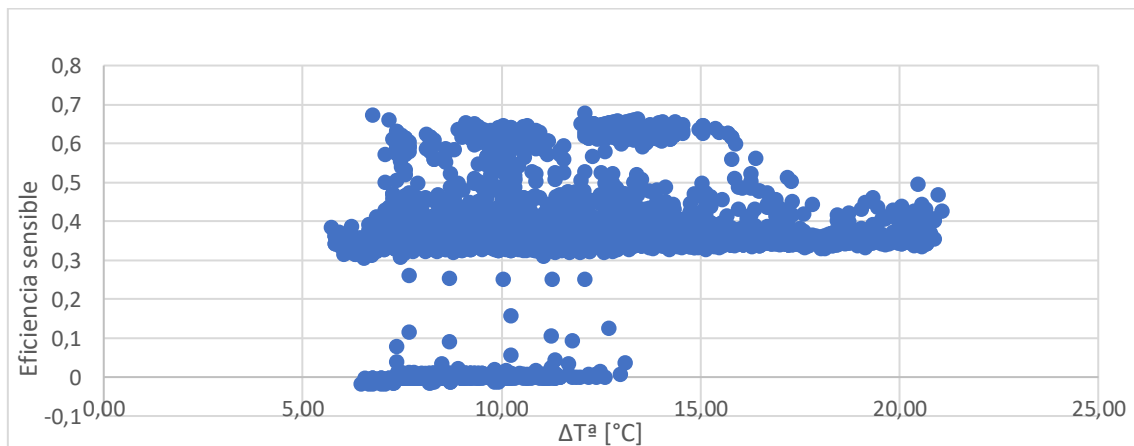
En este apartado se procede al análisis, para su posterior interpretación, de los datos recogidos en este TFG, en busca de los objetivos marcados en el *Apartado 1*.

En primer lugar, se presentarán todos los valores y se analizarán, pudiendo hacer una distinción entre los datos estacionarios y los transitorios, y comprobando el modo de funcionamiento del recuperador a estudio. De esta manera, se desecharán una serie de datos no válidos para el TFG y se trabajará únicamente con los datos necesarios.

Una vez elegidos los datos a estudio, se realizará un estudio de eficiencia sensible y potencia sensible recuperada y un estudio de eficiencia total del recuperador y potencia total recuperada.

### 6.1. ANÁLISIS GENERAL.

En primer lugar, calculando la eficiencia sensible mediante la *Ecuación (3)*, se representa junto con la diferencia de temperatura entre la temperatura de sala y la temperatura exterior (*Figura 6.1*).



*Figura 6.1.- Representación de la eficiencia del recuperador frente al incremento de temperatura entre la sala de quirófano y el exterior.*

Como se puede observar en la *Figura 6.1*, la gran mayoría de los datos siguen una tendencia en la cual la eficiencia se mantiene en unos valores próximos a 0,4, aumentando ligeramente a medida que la diferencia de temperatura aumenta. Sin embargo, se observa cómo una cantidad considerable de estos datos se acumulan tanto por encima como por debajo de la tendencia que siguen la mayoría de los datos.

Estos datos que se salen de la tendencia son los que se toman durante el periodo transitorio, son debidos a la inercia de las baterías de recuperación y a la disminución del caudal de extracción. El proceso es el siguiente: cuando se abren las puertas del quirófano, el régimen del ventilador de extracción disminuye con el objetivo de mantener la sobrepresión de 20 Pa, por lo que en esos periodos la energía interna de las baterías varía (Ecuación (7)), y cuando se reestablecen las condiciones del ventilador, vuelve a variar la energía interna de las baterías para alcanzar las condiciones de régimen estacionario (Figura 6.2). En dicha figura se ve cómo, al representar las rpm del ventilador de extracción respecto al tiempo, existen unas zonas que se repiten periódicamente, en las que las rpm disminuyen considerablemente en periodos cortos de tiempo, llegando a valores de aproximadamente  $1/3$  de su valor nominal (aproximadamente 1200 rpm), como se mencionó en el Apartado 3.3.4, para después volver a aumentar.

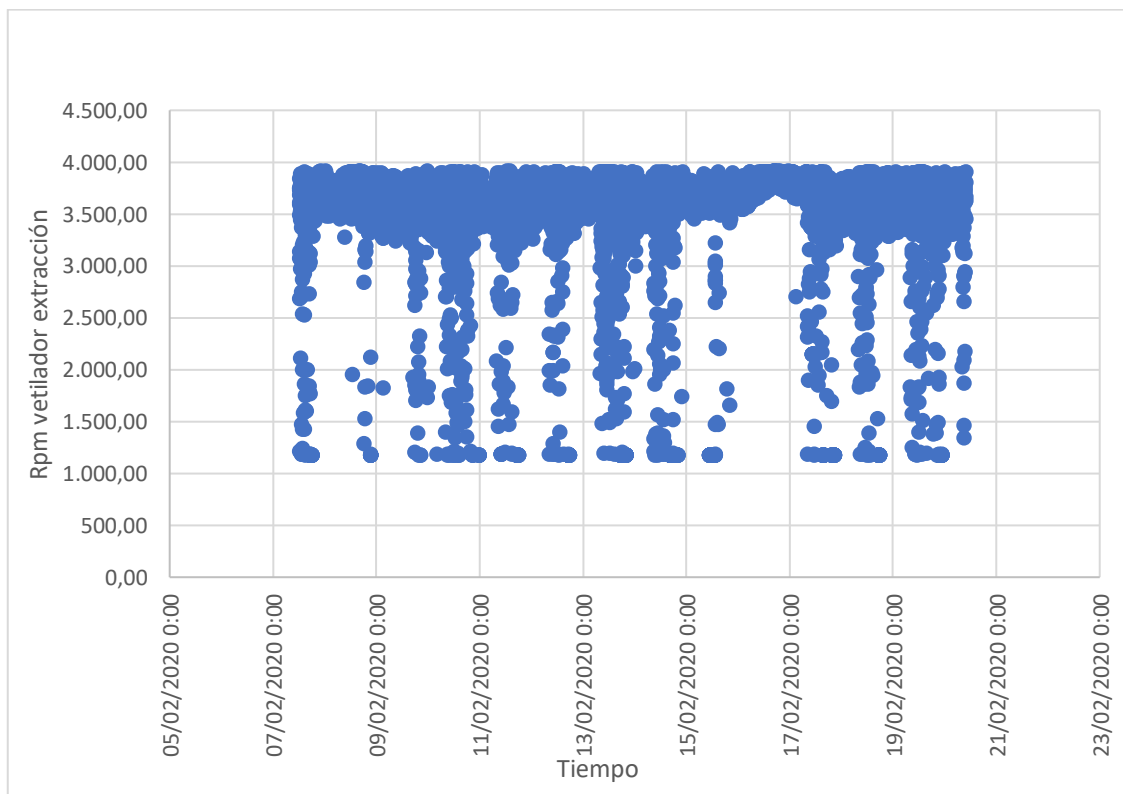


Figura 6.2.- Representación de las rpm del ventilador de extracción respecto al tiempo.

## 6.2. ANÁLISIS DE UN PERIODO TRANSITORIO.

Una mejor forma de analizar el régimen transitorio explicado en el subapartado anterior es observando un periodo de apertura de puertas (Figura 6.3). En dicha figura se puede ver cómo varían las rpm del ventilador de extracción y la eficiencia a lo largo del tiempo en un periodo tomado del día 08/02/2020; en un

instante (alrededor de las 20:56 minutos) se produce una apertura de puertas, por lo que el ventilador disminuye drásticamente sus rpm para lograr mantener la sobrepresión en 20 Pa, y se mantiene en un valor prácticamente constante de unas 1178 rpm. Después del cierre, se puede observar cómo rápidamente el ventilador vuelve a sus rpm nominales (3500-3800), llegando en algún momento a sobrepasarlas debido a que se contrarrestan las sobrepresiones surgidas después del cierre de puertas. También se observa cómo la eficiencia aumenta considerablemente en el momento en que se abren las puertas, como se ha mencionado anteriormente, debido a la inercia de las baterías, mientras que en el momento del cierre vuelven de nuevo a su intervalo nominal.

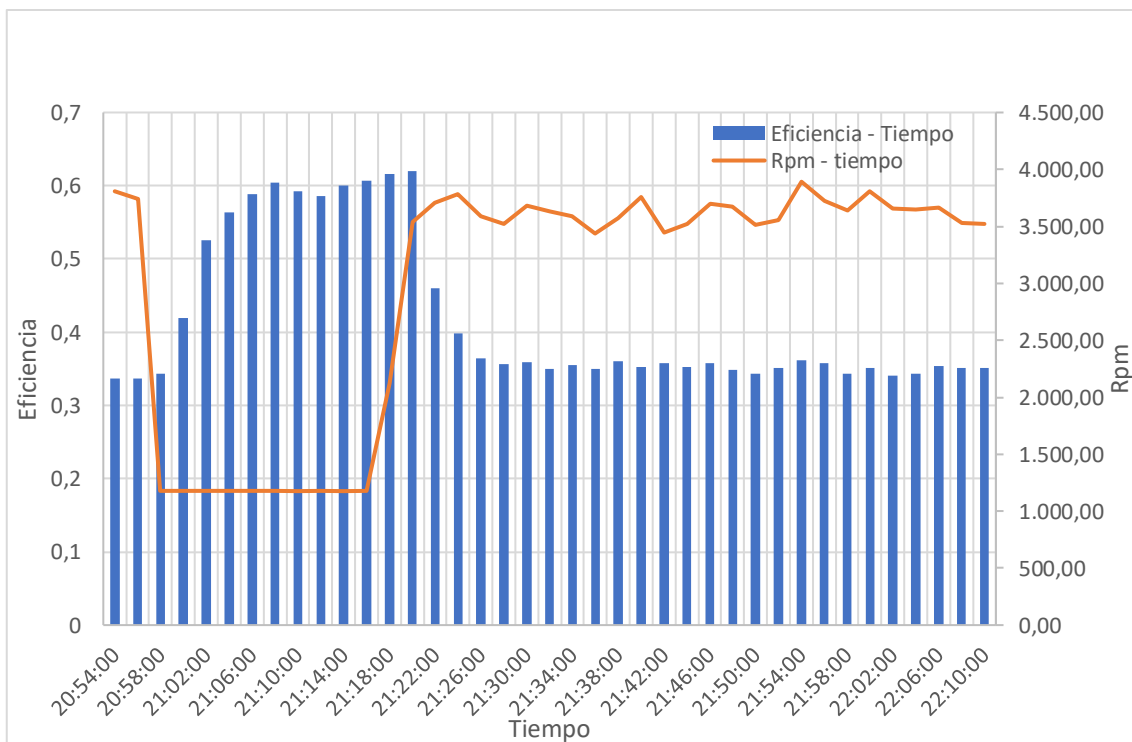


Figura 6.3.- Representación en columnas de la eficiencia (eje vertical izquierdo) respecto al tiempo, sobre la representación en líneas de las rpm del ventilador de extracción (eje derecho) respecto al tiempo.

Por esta razón se han desechado los periodos del transitorio del estudio, debido a que dichos valores van desfasados con la regulación, ya que la regulación toma datos en intervalos de dos minutos, por lo que al abrirse y cerrarse una puerta la toma de datos no permite analizar los periodos transitorios.

### 6.3. DATOS A ESTUDIO.

Para hacer la **distinción entre los datos estacionarios y transitorios** se han tenido en cuenta los períodos de tiempo de los datos en función de las rpm del ventilador de extracción, donde se ha observado que la cantidad de datos que hay en función del régimen del ventilador cumple lo siguiente:

- Para rpm > 3800, los datos representan un 15% del total.
- Para rpm > 3600, los datos representan un 52% del total.
- Para rpm > 3500, los datos representan un 70,4% del total.

Teniendo en cuenta estos valores y la explicación anterior, se entiende que el ventilador de extracción alcanza unos valores máximos en el transitorio, cuando se cierran las puertas del quirófano y aumenta para llegar a obtener la sobrepresión, llega un punto en el que la sobrepasa y luego se reduce hasta llegar a su valor estacionario (*Figura 6.3*). Teniendo en cuenta este razonamiento se han tomado como rpm estacionarios aquellas que estén en el intervalo 3500-3800 rpm.

Dentro de estos datos estacionarios, se distinguen distintos **casos de funcionamiento**:

1. Cuando el recuperador no está en funcionamiento.

Como se comentó en la *Ecuación (1)*, en el quirófano a estudio, la bomba del recuperador se acciona con un valor previamente fijado de diferencia de temperaturas entre la sala del quirófano y el exterior.

Por tanto, cuando esto no se cumple el recuperador no estará en funcionamiento y, por tanto, no son datos válidos para el estudio.

2. Cuando el recuperador está en funcionamiento.

Cuando se cumple dicha condición, la bomba se acciona y el recuperador entra en funcionamiento.

En los datos del estudio, se comprueba que el recuperador siempre está en funcionamiento (*Figura 6.1* y *Ecuación (1)*), por lo que no hay que desechar datos debido a la condición 1, y que siempre trabaja en '*Modo invierno*', es decir, la temperatura de sala siempre es mayor que la temperatura exterior.

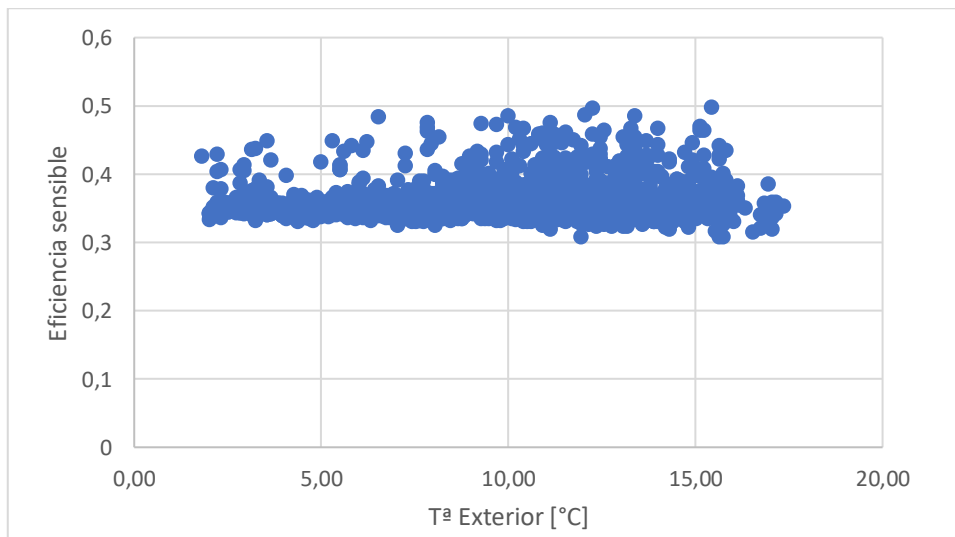
Con lo expuesto anteriormente, se desechan los datos debidos a los periodos transitorios, quedando un total de 5.108 registros por cada sonda, siendo un total de 51.080 datos.

## 7. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA Y DE LA POTENCIA ÚTIL RECUPERADA.

### 7.1. EFICIENCIA SENSIBLE.

Para el estudio de la eficiencia sensible solo se tienen en cuenta las temperaturas secas de las sondas, y se calcula a partir de estas, usando la *Ecuación (3)*. De esta manera, se calcularon las eficiencias sensibles para cada valor de los datos a estudio.

Una vez calculada, se representa la eficiencia sensible respecto a la temperatura exterior (*Figura 7.1*). Como se puede observar, la gran mayoría de los datos se dan para eficiencias que oscilan entre 0,3 y 0,4.



*Figura 7.1.- Eficiencia de calor sensible respecto a la temperatura exterior.*

### 7.2. POTENCIA SENSIBLE RECUPERADA.

Para analizar el calor sensible recuperado, se utiliza la *Ecuación (4)*.

Representando la potencia sensible útil recuperada frente a la temperatura exterior (*Figura 7.2*), observamos que sigue una tendencia en la cual la potencia recuperada disminuye considerablemente a medida que la temperatura exterior aumenta, partiendo de unos 5,5 kW cuando la temperatura exterior es de 2°C, y llegando hasta 1,5 kW cuando la temperatura exterior es de 18°C.



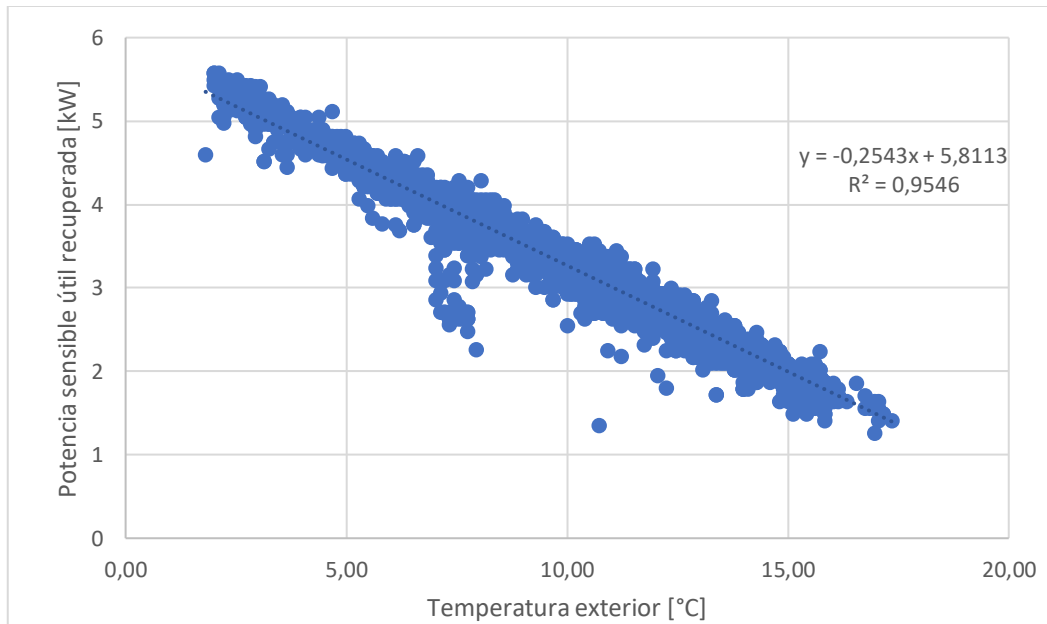


Figura 7.2.- Representación de la energía recuperada en la impulsión frente a la temperatura exterior.

De la Figura 7.2, mediante regresión lineal se obtiene la expresión que relaciona la potencia sensible útil recuperada en función de la temperatura exterior, Ecuación (14).

$$\text{Potencia sensible útil recuperada} = (-0,2543 * T_{ext}) + 5,8113 \quad (14)$$

### 7.3. EFICIENCIA TOTAL.

Para el estudio de la eficiencia total se tiene en cuenta la entalpía de las corrientes, esta se obtiene a través de los valores de temperatura seca [°C] y de humedad relativa [%] que se obtuvieron en las mediciones.

Para ello, se utilizó el programa *Sicro* (Figura 7.3), de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). En él se tenía un diagrama de Carrier, ajustado para la altura de Valladolid (700m), y se fueron proporcionando valores de temperatura seca y humedad, obteniendo las entalpías para todos los puntos.

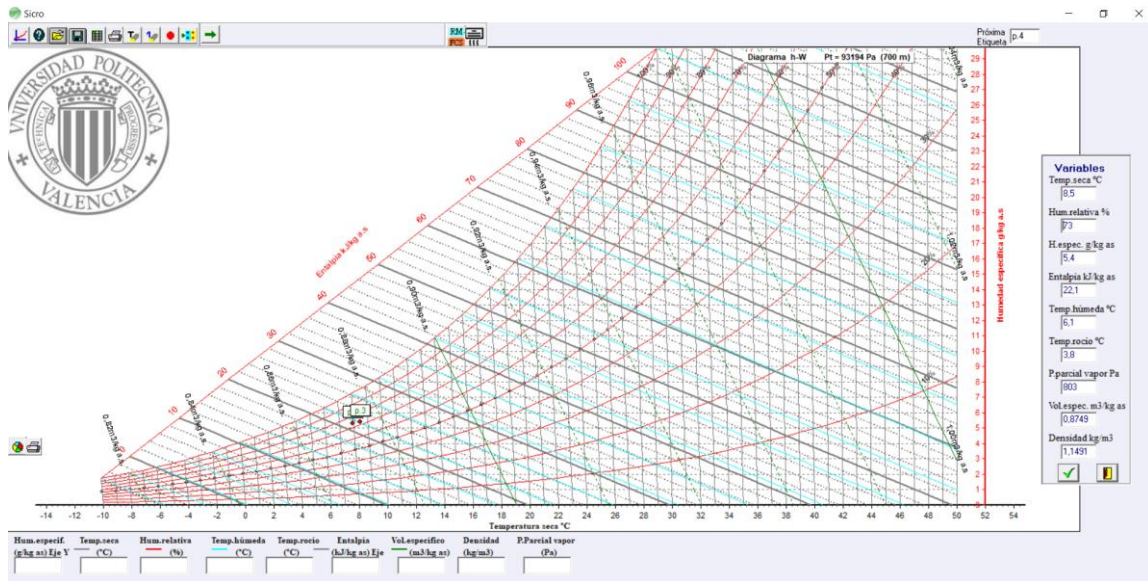


Figura 7.3.- Imagen del programa Sicro, donde se obtuvieron los valores de las entalpías.

Una vez obtenidas las entalpías, se calcula la eficiencia total a partir de la Ecuación (3), usando como variables dichas entalpías. Representando dicha eficiencia total respecto a la entalpía exterior (Figura 7.4), se puede ver cómo la eficiencia aumenta ligeramente a medida que aumenta la entalpía exterior.

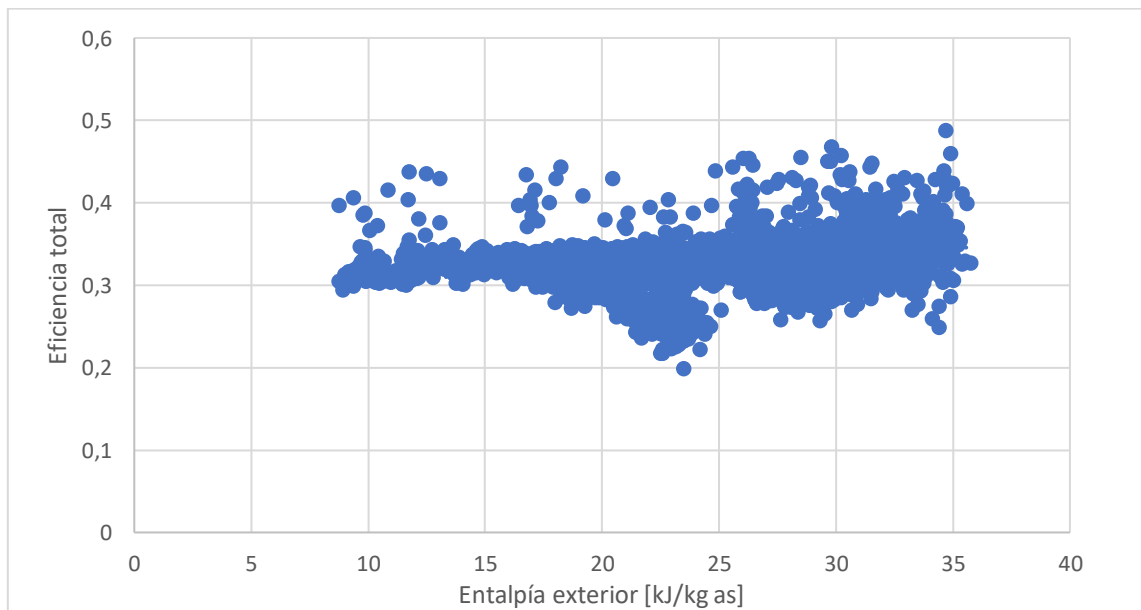


Figura 7.4.- Representación de la eficiencia energética respecto a la entalpía exterior.

#### 7.4. POTENCIA TOTAL RECUPERADA.

Para el estudio de la potencia total recuperada, se representa la potencia total recuperada en impulsión, calculada mediante la *Ecuación (5)*, respecto a la temperatura exterior (*Figura 7.5*), donde se aprecia claramente como a medida que la temperatura exterior aumenta, la potencia total recuperada disminuye. De esta representación, mediante regresión lineal, se obtiene la *Ecuación (15)*.

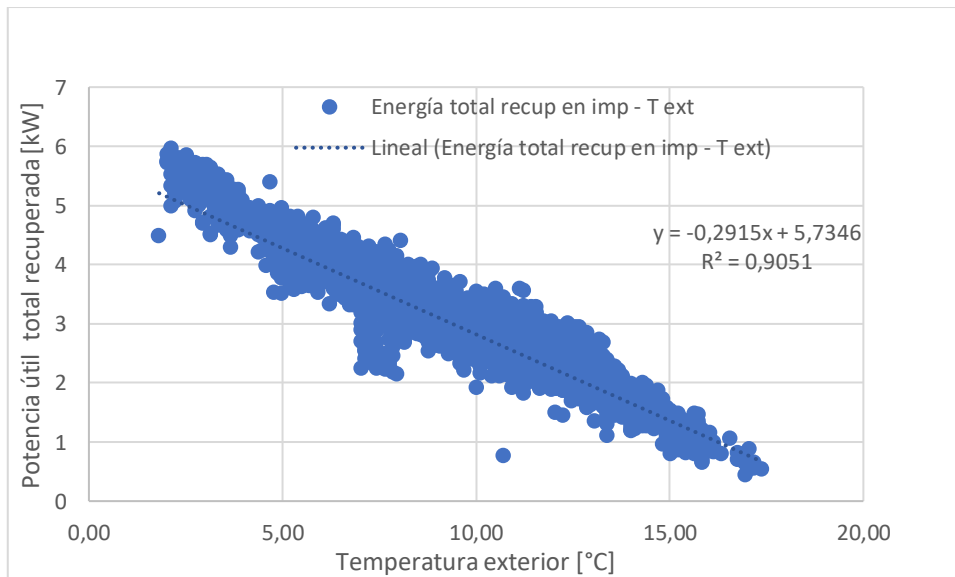


Figura 7.5.- Representación de la energía total recuperada en impulsión respecto a la temperatura exterior.

$$\text{Potencia útil total recuperada} = (-0,2915 * T_{ext}) + 5,7346 \quad (15)$$

## 8. ESTUDIO DE AHORRO ENERGÉTICO E IMPACTO AMBIENTAL. CÁLCULO DEL SCOP.

En este apartado, partiendo de los análisis de datos realizados en el apartado anterior, se valorará el ahorro energético obtenido gracias a la utilización del recuperador en la UTA, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y se calculará el S.C.O.P del sistema en su conjunto. La energía térmica utilizada se obtiene del Gas Natural (GN).

Para todo ello se tomará como intervalo de tiempo la temporada de invierno, eligiendo los meses de noviembre a febrero, ambos inclusive, obteniendo así una idea más representativa de los resultados obtenidos.

### 8.1. AHORRO ENERGÉTICO.

Se pretende dar una idea del ahorro energético total que supone tener el recuperador de calor de la UTA en funcionamiento en un intervalo de tiempo. Como los datos del estudio son de un periodo de tiempo de febrero de 2020, se extrapolarán al intervalo de tiempo de la temporada de invierno.

Para ello, a partir de los datos anuales de temperaturas del CTE (11), *Figura 8.1*, siendo la zona climática D2 para la ciudad de Valladolid (12), se obtienen los registros de la temperatura exterior de Valladolid por intervalos de 1h (*Tabla 8.1*).

The image shows a screenshot of the CTE (Código Técnico de la Edificación) website. The main navigation bar includes '¿Qué es el CTE?', 'Documentos CTE', 'Registro CTE', 'Guías y otros', 'Programas', and 'Actualidad'. The page is titled 'Ahorro de energía' and features a 'DOCUMENTO BÁSICO' section with a yellow 'DB-HE' button labeled 'Ahorro de energía'. Below this, there are sections for 'DOCUMENTOS DIVULGATIVOS' including 'Documento divulgativo' and 'Guía de aplicación'. A red rectangular box highlights a 'DB-HE' button labeled '.MET climas' with the text 'Archivos de datos de todas las zonas climáticas' below it. On the right side, there is a 'Documentos CTE' list and a 'GUÍAS Y OTROS' section.

*Figura 8.1. Imagen de la web documentos del CTE. En el recuadro rojo, el archivo de descarga de datos para las distintas zonas climáticas (13).*

Tabla 8.1. Fragmento del Excel con los datos anuales obtenidos del CTE.

MES	DÍA	HORA	T seca (°C)	H específica	HR (%)
1	1	1	10.0	0.00572	75
1	1	2	9.5	0.00568	77
1	1	3	9.0	0.00564	79
1	1	4	8.4	0.00555	81
1	1	5	7.9	0.00549	83
1	1	6	7.3	0.00546	86
1	1	7	6.8	0.00546	89
1	1	8	7.1	0.00552	88
1	1	9	8.6	0.00562	81
1	1	10	10.7	0.00584	73
1	1	11	12.1	0.00597	68
1	1	12	12.1	0.00606	69
1	1	13	11.7	0.00598	70
1	1	14	10.7	0.00592	74
1	1	15	10.6	0.00596	75
1	1	16	10.2	0.00588	76
1	1	17	9.6	0.00587	79
1	1	18	9.4	0.00579	79
1	1	19	9.2	0.00579	80
1	1	20	8.9	0.00567	80
1	1	21	8.7	0.00559	80
1	1	22	8.5	0.00552	80
1	1	23	8.2	0.00547	81
1	1	24	8.0	0.00540	81
1	2	1	7.7	0.00535	82
1	2	2	7.4	0.00531	83

Por consiguiente, usando la *Ecuación (15)* que obtuvimos en la que se tenía la potencia total recuperada en impulsión a partir de la temperatura exterior, se obtienen los valores de los kWh recuperados en cada intervalo de tiempo durante estos meses.

El total de potencia ahorrada en el intervalo de los meses de noviembre a febrero es de **11.353,38 kWh**.

## 8.2. IMPACTO AMBIENTAL.

A la hora de calcular el impacto ambiental, se busca obtener la disminución de efectos contaminantes a la atmósfera que supone la instalación del recuperador. De esta manera, el principal contaminante es el CO<sub>2</sub>. Si el impacto ambiental se calculase teniendo en cuenta únicamente los kWh de GN ahorrados por la instalación del recuperador (calculados en el *Apartado 8.1*), no se tendría en cuenta la cantidad de energía de GN perdida desde que se obtiene hasta que se utiliza, por lo que se ha de considerar una eficiencia para el GN de tal manera que se obtenga la cantidad de energía de GN primario, *Ecuación (16)*.

$$\frac{\text{Ahorro de Energía [kWh]}}{\text{Eficiencia GN}} = \text{Energía de GN primario [kWh]} \quad (16)$$

Tomando como eficiencia 80% para el GN, se tendrá el siguiente ahorro en consumo de GN primario:

$$\frac{\text{Ahorro de Energía [kWh]}}{\text{Eficiencia GN}} = \frac{11.353,38}{0,8} = 14.191,725 \text{ kWh de GN primario.}$$

Una vez obtenida la energía primaria ahorrada de GN durante la temporada de invierno, obteniendo el factor de emisiones de CO<sub>2</sub> para el GN, se tiene la cantidad de CO<sub>2</sub> que se ha dejado de emitir a la atmósfera.

El factor de emisiones de CO<sub>2</sub> para el GN, según la última publicación del Ministerio de Industria, Energía y Turismo (14), es de 0,252  $\frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$ ,

Por tanto, aplicando el factor de emisiones de CO<sub>2</sub>, tenemos que la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante los meses de noviembre a febrero es de **3.576,31 kg CO<sub>2</sub>**.

### 8.3. CÁLCULO DEL S.C.O.P.

El S.C.O.P., como se mencionó en el *Apartado 4.4.2*, nos da idea de la eficiencia del recuperador en todo su conjunto, relacionando la energía útil recuperada y la energía utilizada para su funcionamiento.

Para el cálculo del S.C.O.P. se parte de la *Ecuación (12)*. Para ello, se necesitan saber tanto las pérdidas de potencia por la pérdida de presión causada por las baterías de recuperación, como la potencia consumida por la bomba.

La pérdida de presión que se produce debido a las baterías de recuperación es de 101 Pa para la de impulsión y de 73 Pa para la extracción, estos datos vienen en la hoja de características técnicas de la UTA, en el Anexo 1 (*Apartado 12.1*). Siendo la potencia debida a esta presión la proporcionada por la *Ecuación (10)*. Tomando como rendimiento del motor y del ventilador un 95%, y usando los valores de pérdida de presión con la *Ecuación (10)* en una tabla de Excel, se obtienen los kWh consumidos por la pérdida de presión en el intervalo de tiempo a estudio, siendo para la impulsión un incremento de consumo de 188,88 kWh y para la extracción 119,92 kWh. En total son 308,8 kWh.

La potencia consumida por la bomba de recirculación se calcula según la *Ecuación (11)*. Siendo el voltaje de esta 200V, la intensidad 0,1 A (medida experimentalmente con un amperímetro), y el factor de potencia 0,95, tenemos que la potencia que consume la bomba del recuperador son 20W, por lo que en total en el intervalo de tiempo a estudio la bomba tiene un consumo de 57,62 kWh.

Por tanto, teniendo el ahorro energético obtenido por el uso del recuperador, las pérdidas de carga de los ventiladores y el consumo de la bomba, todo ello en el intervalo a estudio, y usando la *Ecuación (9)*, tenemos un valor de SCOP de **30,985**.

## 9. ESTUDIO ECONÓMICO.

El estudio económico del recuperador en estudio busca ofrecer una visión del ahorro económico que supone tener el recuperador en funcionamiento en un intervalo de tiempo. De esta manera, se busca ofrecer una idea del interés económico tiene su instalación.

Para su estudio se usa el mismo intervalo de tiempo que en el apartado anterior, es decir, la temporada de invierno

En el estudio económico se tiene en cuenta:

- El ahorro económico que supone la energía útil que se obtiene en el intervalo de tiempo gracias al uso del recuperador.
- El gasto que supone el recuperador debido a su funcionamiento.

Para obtener el ahorro económico a partir de la energía recuperada, se utilizan las tarifas eléctrica y térmica media del HCUVa (*Tabla 9.1*), calculadas a partir de los datos facilitados por el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa, siendo estas obtenidas mediante la división de las facturas eléctricas y térmicas anuales por sus consumos correspondientes.

*Tabla 9.1.- Tarifas eléctrica y térmica medias del HCUVa.*

Tarifa eléctrica media (c€/kWh)	11,31
Tarifa térmica media (c€/kWh)	3,94

De esta manera, se tienen 11.353,38 kWh de energía ahorrada de GN calculados en el Apartado X, por lo que aplicando la tarifa térmica media se tienen **447,32 €** de ahorro.

Para el gasto que supone el uso del recuperador, se tiene en cuenta el gasto que supone el uso de los ventiladores y el gasto de la bomba de recirculación, usando en ambos la tarifa eléctrica media.

El consumo de la bomba del recuperador fue de 57,62 kW, lo que supone un gasto en el intervalo de tiempo elegido de **6,52 €**.

El consumo de los ventiladores fue de 308,8 kWh, por lo que el gasto que suponen las pérdidas de carga por la instalación del recuperador durante el intervalo de tiempo tomado es de **34,93 €**.

Con todo lo mencionado, se tiene que el ahorro económico obtenido a través de la instalación del recuperador en la UTA durante la temporada de invierno es de **405,87 €**.



## 10. CONCLUSIONES.

En el presente TFG se ha llevado a cabo un estudio energético, de impacto ambiental, y económico de lo que supone la instalación de un recuperador de calor en la UTA del quirófano PP S-3.4 del HCUVa. A través del seguimiento de su funcionamiento, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Se han tomado y analizado un total de 92.890 datos, los cuales se obtuvieron por mediciones experimentales, por sondas registradoras y mediante el sistema de control. Dentro de estos datos se pudo ver cómo los que representaban intervalos transitorios iban desfasados con la regulación, por lo que se descartaron, quedando así un total de 51.080 datos.
- Se ha llevado a cabo un análisis de los datos estacionarios, tanto térmico como energético, evaluando su eficiencia a lo largo del tiempo, en el cual se ha podido ver cómo la eficiencia oscila entre valores dentro del intervalo [0,3;0,4], siendo estos cercanos a la eficiencia proporcionada por la empresa Trox, del 43%.
- Se ha obtenido una expresión lineal para relacionar la energía total ahorrada en función de la temperatura exterior.
- Se ha llevado a cabo un análisis de ahorro energético e impacto ambiental, extrapolando los datos al intervalo de tiempo de noviembre a febrero (temporada de invierno), en el cual se ha obtenido un ahorro de energía de 11.353,58 kWh y un ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera de 3.576,31 kg CO<sub>2</sub> debidos a la instalación del recuperador.
- Se ha realizado un estudio económico del sistema, en el cual se ha obtenido, en el intervalo de noviembre a febrero, un ahorro económico de 405,87€ debido a la instalación del recuperador.




## 11. BIBLIOGRAFÍA.

1. NORMA ESPAÑOLA UNE 100713. Instalaciones de acondicionamiento de aire en hospitales. 2005.
2. Soler Palau. Unidad de tratamiento de aire (UTA): tipos y calidad del aire interior. Available from: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/unidad-tratamiento-aire-uta/#:~:text=La unidad de tratamiento de,de calor%2C ventiladores y filtros>
3. UNE-EN 1822-1:2020. Norma Española Filtros absolutos ( EPA , HEPA y ULPA ) y marcado. 2020.
4. López JMC, ATECYR. DTIE 9.06: selección de equipos secundarios según el sistema. ATECYR; 2012. (Documentos técnicos de instalaciones en la edificación: Serie 9). Available from: <https://books.google.es/books?id=ZzA7mQEACAAJ>
5. Fernando Ríos Cabrero. Estudio de la contaminación cruzada en el nuevo área quirúrgica del HCUVa en periodos de uso no estacionarios. 2015.
6. ATECYR., Grupo de Termotecnia U de V. DTIE 8.01. Recuperación de energía en sistemas de climatización. ATECYR; 1996. (Documentos técnicos de instalaciones en la edificación. Serie 8). Available from: [https://books.google.es/books?id=h\\_I7AAAACAAJ](https://books.google.es/books?id=h_I7AAAACAAJ)
7. Casas Ecológicas. Recuperador de calor, qué es. Available from: <http://icasasecológicas.com/que-es-un-recuperador-de-calor/>
8. Universidad de Cantabria. Esquema recuperador rotativo. Available from: <https://personales.unican.es/renedoc/Trasparesias WEB/TraspAA/014 Inter Rotativos.pdf>
9. Perovic P, Trucco C, Tálamo A, Quiroga V, Ramallo D, Lacci A, et al. IDAE: Guía de Ahorro y Recuperación de Energía en Instalaciones de Climatización. 2008.
10. Vent-climat. Available from: <http://www.vent-climat.ru/>
11. Ministerio de Transportes M y A urbana. Código Técnico de la Edificación. Available from: <https://www.codigotecnico.org/>
12. Ministerio de Fomento. Documento Básico HE. Ahorro de Energía con comentarios del Ministerio de Fomento. Available from: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DccHE.pdf>
13. Ahorro de energía. Documentos de descarga CTE. Available from: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html>
14. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Ministerio de Fomento. Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España. Available from: [https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros documentos/Factores\\_emision\\_CO2.pdf](https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros documentos/Factores_emision_CO2.pdf)




## 12. ANEXOS.

### 12.1. HOJA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA UTA PP-S-3.4.


 The art of handling air	Nº de oferta:	15105F0
	Proyecto:	HOSPITAL CLINICO VALLADOLID
	Cliente:	TYPSA
	Fecha:	26/09/2011

## Hoja de características técnicas


### Climatizador: (F029) CL-PP-N-3.2,3.4,3.6, CL-PP-S-3.2,3.4,3.6,3.8,3.10 (imp)

	Unidad de tratamiento de aire TKM 50 con carcasa formada por bastidor autoportante de perfil de chapa de acero galvanizada y pintada, con junta de estanqueidad perimetral. Paneles de cierre tipo sandwich de 30mm. de espesor con chapa galvanizada interior y chapa prelacada exterior. Aislamiento de poliuretano. Puertas de intervención con cierres rápidos.
	NOTAS
	SUPLEMENTOS

Dimensiones aproximadas (Ancho x Alto x Largo): 880x855x7080 mm. Peso aproximado: 807 kg. Ejecución para interior.

FILTROS				Pérdida de carga (Pa)	
ID	Tipo	Accesorios	Q (m <sup>3</sup> /h)	Inicial/Considerada	
C	Prefiltro clase G4 + Filtro compacto clase F7	AF4	2894	103/227	
K	Filtro compacto clase F9	AF4	2894	69/184	

Leyenda: AF4 = Tomas de presión

VENTILADORES				Presión (Pa)		LWA	Motor
ID	Modelo/ Tipo/ Categoría	Accesorios	Q(m <sup>3</sup> /h)/ rpm	Total/Estática/Est. Disp.	dB(A)		
M	TPF25C-2-2200W/ Plug-Fan/ SFP 5	AV8	2894/ 4819	1654/1558/950	93,6	2,20 kW - [top=64 Hz]	

Leyenda: AV8 = Tomas medición caudal

SILENCIADORES				LWA							
ID	Modelo	Q(m <sup>3</sup> /h)/ Dp(Pa)	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	dB(A)
P	MSA200/ L=1000	2894/ 12	75,2	72,0	63,9	61,5	56,6	57,6	63,0	62,7	68,2

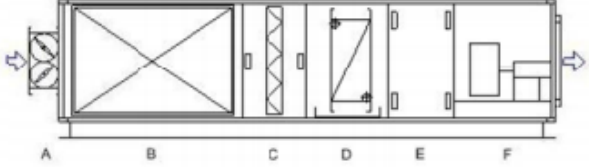
BATERÍAS				Aire		Agua	
ID	Modelo	Potencia (kW)	Q(m <sup>3</sup> /h)/ v(m/s)/ Dp(Pa)	Entrada	Salida	Q(l/h)/ Dp(kPa)	(°C)
D	10T-8R-600A-1"	-	2894/ 2,23/ 101	-	-	-	-
F	24T-2R-600A-3/4"	34,77	2894/ 2,23/ 22	4,0°C/ -	37,7°C/ -	1497/ 8,8	90,0/70,0
H	24T-4R-600A-1 1/4"	15,23	2894/ 2,23/ 39	33,2°C/25,9%	12,7°C/69,8%	2305/ 10,2	6,0/13,0
J	24T-2R-600A-3/4"	40,01	2894/ 2,23/ 22	-5,6°C/ -	31,7°C/ -	1720/ 11	90,0/70,0

HUMECTADORES				Aire	
ID	Modelo/Tipo	Q(m <sup>3</sup> /h)/ Dp(Pa)	Entrada	Salida	
N	Humectador no suministrado	Vapor 17,0kg/h	2894/ -	32,0°C/30,0%	32,0°C/45,8%

ENTRADAS/SALIDAS			
ID	Tipo	Modelo	Regulación
A	Compuerta	JZ-B/400x345	Manual
Q	Marco metu	MM-800x487	-

SECCIONES VACÍAS		
ID	Longitud	Notas
B	500 mm	
E	400 mm	
G	405 mm	
I	400 mm	
L	500 mm	

**Climatizador: (F029) CL-PP-N-3.2,3.4,3.6, CL-PP-S-3.2,3.4,3.6,3.8,3.10 (ret)**

	Unidad de tratamiento de aire TKM 50 con carcasa formada por bastidor autoportante de perfil de chapa de acero galvanizada y pintada, con junta de estanqueidad perimetral. Paneles de cierre tipo sandwich de 30mm. de espesor con chapa galvanizada interior y chapa prelacada exterior. Aislamiento de poliuretano. Puertas de intervención con cierres rápidos. NOTAS SUPLEMENTOS
<b>Dimensiones aproximadas (Ancho x Alto x Largo): 880x855x3060 mm. Peso aproximado: 393 kg. Ejecución para interior.</b>	

**FILTROS**

ID	Tipo	Accesorios	Q (m3/h)	Pérdida de carga (Pa) Inicial/Considerada
C	Filtro de panel clase F6	AF4	2459	57/128

Leyenda: AF4 = Tomas de presión

**VENTILADORES**

ID	Modelo/ Tipo/ Categoría	Accesorios	Q(m3/h)/ rpm	Presión (Pa)		LWA dB(A)	Motor
				Total/Estática/Est. Disp.			
F	TPF25C-2-750W/ Plug-Fan/ SFP 3	AV8	2459/ 3352	580/510/300		85,4	0,75 kW - [fop=58 Hz]

Leyenda: AV8 = Tomas medición caudal

**SILENCIADORES**

ID	Modelo	Q(m3/h)/ Dp(Pa)	Frecuencia (Hz)								LWA dB(A)
			63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	
B	MSA200/ L=1000	2459/ 9	68,4	63,1	54,6	51,7	46,2	46,9	52,1	51,7	57,8

**BATERÍAS**

ID	Modelo	Tipo	Potencia (kW)	Aire			Agua	
				Q(m3/h)/ v(m/s)/ Dp(Pa)	Entrada	Salida	Q(l/h)/ Dp(kPa)	(°C)
D	10T-8R-600A-1"	Recuperación	-	2459/ 1,80/ 73	-	-	-	-

**ENTRADAS/SALIDAS**

ID	Tipo	Modelo	Regulación
A	Compuerta	JZ-B/400x345	Manual
F	Marco matu	MM-487x487	-

**SECCIONES VACÍAS**

ID	Longitud	Notas
E	400 mm	