



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Estudio de mejora del consumo energético de un hospital a través de una estrategia de *setback* en los quirófanos

Autor: D. Victor Matheus de Freitas Barros Galvão

Tutora de la EII: D^a. Ana Tejero González

Tutor de empresa: D. Andrés Manuel Zarzuelo Sánchez

Valladolid, julio 2019



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Estudio de mejora del consumo energético de un hospital a través de una estrategia de *setback*
en los quirófanos

Autor: D. Victor Matheus de Freitas Barros Galvão

Tutora de la EII: D^a. Ana Tejero González

Tutor de empresa: D. Andrés Manuel Zarzuelo Sánchez

Valladolid, julio 2019



RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Máster (TFM) realiza el estudio del posible ahorro energético en el Hospital Clínico Universitario de Valladolid a partir de una estrategia de *setback*, que consiste en la disminución del caudal de ventilación en los quirófanos en periodos de no ocupación. Con ensayos experimentales realizados en dos quirófanos de flujo turbulento entre los meses de marzo y mayo, fue posible comparar configuraciones de caudal y de utilización del recuperador de calor de dos baterías y una bomba (*runaround loop*), estableciendo los consumos energéticos de cada quirófano en dichas condiciones. Además, a través de una extrapolación basada en las condiciones meteorológicas exteriores y en el consumo energético actual del hospital, se ha podido estimar el impacto económico de la adopción de la estrategia estudiada para un año meteorológico tipo de la ciudad de Valladolid.

PALABRAS-CLAVES: Quirófano; Ventilación; Ahorro energético; Estrategia de *setback*; Hospital

ABSTRACT

This Final Master's Project (TFM) carries out the study of possible energy savings in the University Clinical Hospital of Valladolid, based on a setback strategy, which consists in the reduction of the flow of ventilation in the operating rooms during periods of non-occupation. With experimental tests performed in two turbulent flow rooms between March and May, it was possible to compare flow and utilization configurations of the heat recovery of two batteries and a pump (runaround loop), establishing the energy consumption of each operating theater in these conditions. In addition, through an extrapolation based on the external meteorological conditions and the current energy consumption of the hospital, it has been possible to estimate the economic impact of adopting the strategy studied for a typical meteorological year in the city of Valladolid.

KEY-WORDS: Operation theatre; Ventilation; Energy saving; Setback strategy; Hospital



AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Fin de Máster representa no solo la conclusión de un título universitario, pero también el fin de una jornada académica que empezó en Brasil, pasando por España y Francia antes de volver a Valladolid para su cierre.

Por mi fe, agradezco a Dios por no abandonarme y darme valentía a cada nuevo desafío.

A mi familia, agradezco a mi madre Yoná, a mi padre Wderval, a mi hermana Lara y a mi madrina Mary por apoyarme en cada decisión. Ausentes físicamente, pero siempre presentes en los últimos seis años.

Al grupo de investigación, agradezco a mi tutora Ana Tejero González y a los profesores Julio Francisco San José Alonso y Eloy Velasco Gómez, por el soporte técnico y moral, no solo en la realización de este trabajo, pero durante toda la carrera de Ingeniero Industrial.

Al Hospital Clínico Universitario de Valladolid, agradezco a mi cotutor Andrés Manuel Zarzuelo Sánchez y a Lucas Gutiérrez González por haberme abierto las puertas del Hospital en esta colaboración y facilitarme todos los datos necesarios para la elaboración de este estudio.

Finalmente, a mis próximos, agradezco a Mélanie, Marcela, Pablo, Rodrigo, Luiz Eduardo, Renato y Luís Fernando, que me acompañaron especialmente de cerca en esta última jornada de tres años entre la doble titulación y el Máster.

Una vez más, gracias. Estoy seguro de que sólo no llegaría hasta aquí.



TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
1) INTRODUCCIÓN.....	1
1.1) Estado de la Técnica/Antecedentes.....	1
1.1.1) Ahorro energético en hospitales.....	1
1.1.2) Ahorro energético en un quirófano.....	4
1.1.3) Normativa aplicable.....	5
1.1.4) Literatura existente.....	5
1.1.5) Trabajos previos realizadas en el departamento.....	7
1.2) Planteamiento y definición de los objetivos.....	8
1.3) Estructura del trabajo.....	11
2) METODOLOGÍA.....	13
2.1) Caso de estudio: Hospital Clínico Universitario de Valladolid.....	13
2.2) Funcionamiento de la climatización de los quirófanos.....	17
2.3) Organización de los ensayos.....	19
2.4) Tratamiento de los datos.....	21
2.5) Observaciones sobre la toma de datos.....	22
3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
3.1) Evolución temporal de parámetros de interés.....	25
3.2) Ahorro energético en los quirófanos analizados.....	28
3.3) Estudio de impacto económico.....	36
4) CONCLUSIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	43
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.....	45
ANEXOS.....	47

1) INTRODUCCIÓN

1.1) Estado de la Técnica/Antecedentes

El ahorro energético en los edificios no es un tema nuevo. Desde la crisis del petróleo en los años setenta, el miedo de la escasez de energías primarias o el aumento de su precio, hacen con que los gobiernos se preocupen con el ahorro energético a nivel global, estableciendo, por ejemplo, directivas y agencias específicas para los temas energéticos [1]. A partir de ese momento, los estándares energéticos aplicados al sector de la edificación empiezan a ser desarrollados.

Recientemente, siguiendo la tendencia actual de desarrollo sostenible y teniendo en cuenta que el sector de es responsable por casi un tercio de la energía consumida en el mundo [1], esta temática atrae la atención de muchos estudios. Buscando denominaciones como edificios inteligentes, 'verdes' o de alta eficiencia energéticas podemos encontrar inúmeras estrategias y tecnologías para la reducción del consumo energético en un edificio, desde la recuperación de energía de las aguas residuales hasta la implantación de pozos canadienses para un aprovechamiento de la energía del subsuelo en la ventilación.

Según indica la Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR) a través de su Guía Técnica de ahorro y recuperación de Energía [2], los tres motivos fundamentales que justifican la reducción del consumo energético en las edificaciones son:

- 1) Alto coste económico de la energía;
- 2) Perspectiva de escasez energética para las próximas décadas;
- 3) Elevado impacto medioambiental del consumo energético en el planeta

El desafío está entonces en aplicar a través de un desarrollo sostenible las nuevas técnicas y tecnologías disponibles en los equipos y sistemas, para garantizar de forma segura y eficaz, la reducción del consumo energético. La misma Guía Técnica también enumera diferentes líneas generales de abordaje para lograr el ahorro energético esperado:

- a) Disminución de la demanda de energía;
- b) Sustitución de las fuentes de energía convencionales por otras renovables, como pueden ser la fotovoltaica, solar térmica, mareomotriz o biomasa;
- c) Aumento de la eficiencia de sistemas y equipos;
- d) Recuperación de energía residual.

Sin embargo, es importante reiterar que todas esas líneas de trabajo en la búsqueda por eficiencia energética en los edificios no son libres, como bien indica Pérez-Lombardi et al. [3]. Hay regulaciones y estándares que marcan las bases para el diseño y la construcción de edificios e instalaciones, como pueden ser el Reglamento de instalaciones térmicas en edificios (RITE) [4] para España o el ASHRAE Standard 90.1-2007 para E.E.U.U. En Europa, hay todavía una falta de armonía entre los requerimientos de eficiencia energética, pero se intenta seguir el camino de la estandarización para llegar a una homogeneización de los criterios energéticos.

1.1.1) Ahorro energético en hospitales

Aunque aparentemente las soluciones estén concentradas en las instalaciones residenciales, ya que están presentes obligatoriamente en el día a día de los ciudadanos, los dominios de aplicación se extienden también a la industria y al sector

terciario y de servicio. Particularmente, a un tipo de edificio con condiciones bien particulares: el hospital.

Los hospitales se destacan no solo por sus elevadas exigencias en términos de confort e higienización, pero también pero el importante impacto que tienen en la economía de los países por sus elevados consumos de energía y en el medio ambiente por su consecuente contaminación.

Según se indica en [5], los 2100 hospitales alemanes consumen 1,5 mil millones de euros solo en energía, lo que representa un 2,5% de los gastos generales de la salud en Alemania. En Austria, las cifras son similares a las alemanas, con un consumo energético por cama y por año de 5800 kWh de electricidad y 28500 kWh de calefacción. Ya en Inglaterra, los hospitales son responsables por 30% de las emisiones de CO₂ del sector público [6].

Por unidad de superficie, el hospital promedio tiene un consumo energético 2,7 veces superior a un edificio comercial [7]. Un orden de grandeza de los consumos energéticos anuales por metro cuadrado promedio de hospitales en algunos países por el mundo puede ser apreciado en la Figura 1:

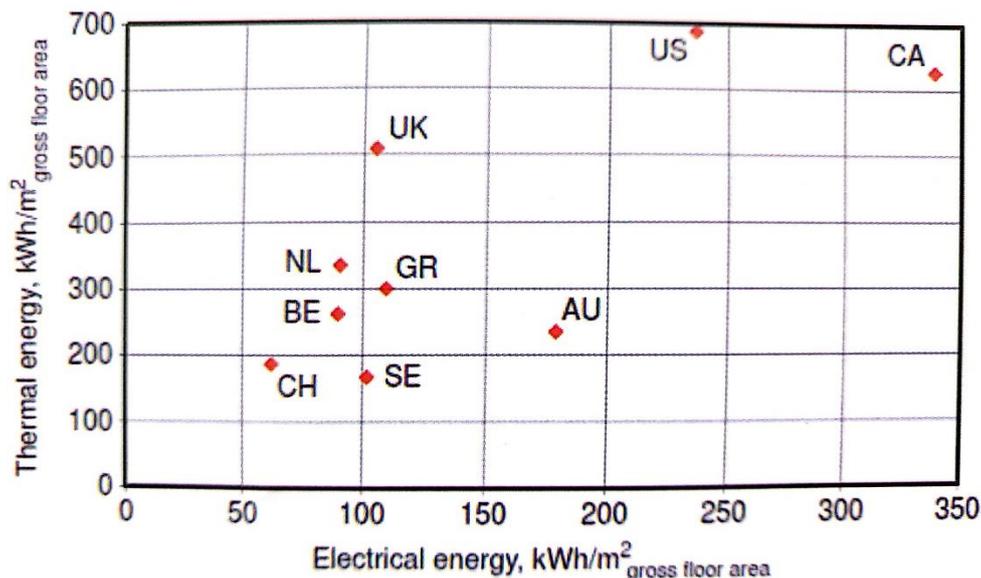


Figura 1: Consumos energéticos por metro cuadrado de los hospitales de diferentes países. Fuente: [7]

El elevado consumo de este tipo de edificios puede ser justificado por cuatro factores, como se expone en [7]:

- 1) Funcionamiento continuo durante las 24 horas de los 365 días al año, lo que representa 8760 horas ininterrumpidas por año;
- 2) Elevados requisitos de ventilación, llegando entre 15 y 20 renovaciones/h en zonas críticas;
- 3) Requisitos de confort térmico restrictos y a veces fuera de parámetros convencionales por necesidades médicas. Esto sugiere la instalación de sistemas flexibles y de elevada potencia;
- 4) Presencia de equipamiento médico, que consume energía y que aporta carga térmica en verano

Con relación al reparto del consumo energético entre las diferentes aplicaciones de un hospital, los valores usuales serían como sigue [8]:

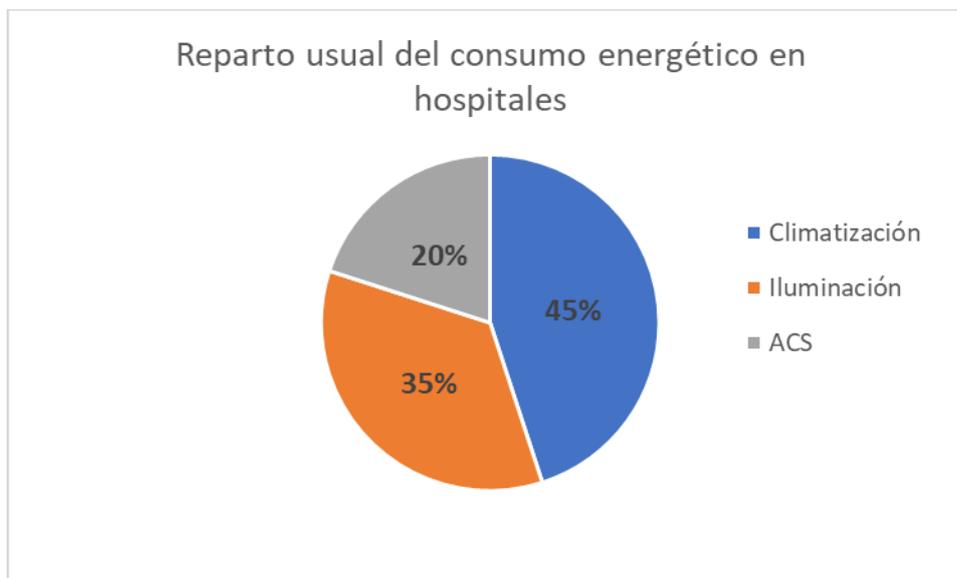


Figura 2: Reparto usual del consumo energético en hospitales

Como apreciado en la Figura 2, la climatización representa el mayor porcentaje del consumo energético con un 45%, seguida de la iluminación con un 35%.

- **El caso específico español**

España tiene actualmente 791 hospitales operacionales, albergando cerca 4350 quirófano y consumiendo 10% de toda la energía del sector terciario [6].

De acuerdo con lo expuesto por García-Sanz-Calcedo et al. [9], en los últimos años el consumo energético del sector público de salud en España ha crecido, mientras que normalmente viene en caída en la mayoría de los países de la Unión Europea (UE). La despesa llega a más de 70 mil millones de euros, lo que representa 6,5% del Producto Interno Bruto (PIB) español en 2017 y 1521€ por habitante.

No obstante, los consumos en los hospitales en España no son homogéneos dado que hay mucha variabilidad de antigüedad, grado de mantenimiento y estado general de las instalaciones, lo que representa una enorme variabilidad en el consumo. Se puede hacer un valor promedio y, comparando con los datos presentados anteriormente, España se sitúa con consumos muy próximos a otros países europeos, con un consumo de aproximadamente 28000kWh-año/cama dentro de un rango muy amplio que oscila entre 20-60000kWh-año/cama [7]. En otra escala, los consumos por unidad de superficie variarían entre 185 kWh/m² y 360 kWh/m², con una media 270 kWh/m² en condiciones normales de operación [6].

Por lo expuesto en este apartado, no solo en España, pero en todo el mundo, es necesario establecer medidas de eficiencia energéticas para el ahorro de energía en los hospitales. Desde la implementación de técnicas muy sencillas de ahorro energético que pueden ahorrar hasta 10% de la energía primaria consumida [9] hasta el diseño optimizado y complejo de los sistemas HVAC (del inglés, calefacción,

ventilación y acondicionamiento de aire), se pueden obtener soluciones de impacto directo a la mejora del consumo energético y disminución de la contaminación de estos edificios.

1.1.2) Ahorro energético en un quirófano

Como se ha visto en la sección anterior, la ventilación, representada principalmente por los sistemas HVAC, es la carga energética más importante en los hospitales. Dentro de las aplicaciones más importantes de la ventilación, está su utilización en los quirófanos, áreas críticas donde se realizan intervenciones quirúrgicas, donde la calidad del aire interior (IAQ, del inglés) tiene una importancia vital.

De esta forma, tal como establece Castro Ruiz, San José Alonos, Villafruela et al. en el Manual de diseño de la climatización y ventilación de quirófanos y habitaciones en centros hospitalarios en Castilla y León [10], son cuatro las principales funcionalidades que deben cumplir un sistema de HVAC para un quirófano, debido a las peculiaridades de este tipo de salas:

Tabla 1: Funcionalidades de los quirófanos y acciones correspondiente para realizarlas

Funcionalidad	Acción/Mecanismo
Diluir gérmenes generados por los ocupantes de la sala y posibles gases fugados de la anestesia	Número adecuado de renovaciones hora de aire
Evitar mezcla de aire contaminado de salas contiguas	Presión diferencial
Desplazar aire contaminado lejos de la mesa de operaciones y de la instrumentación	Patrón de flujo
Proporcionar confort para el equipo quirúrgico y para los pacientes	Control de temperatura, humedad y ventilación

Al aumentar las exigencias de ventilación para estas salas, se aumenta también el consumo energético. Los sistemas HVAC utilizados para los quirófanos son los que más consumen energía, por la necesidad de operación continua (aunque no esté siendo utilizado), por el acondicionamiento completo del aire exterior y por las tres etapas de filtración en la unidad de limpieza del aire [11].

A parte de los parámetros usuales medidos, como pueden ser la temperatura y la humedad relativa, el control de un parámetro es de extrema importancia para el correcto funcionamiento del quirófano sin riesgo de contaminación: la sobrepresión o presión diferencial. Es ella que garantiza, como visto en la Tabla 1, que no haya mezcla de un aire contaminado de un área contigua al quirófano.

De acuerdo con la normativa ISO 14644-4 [12], los valores recomendados para esta presión diferencial estarían entre 5 Pa y 20 Pa. Por otro lado, la ASHRAE recomienda una presurización por encima de 2,5 Pa, pero no establece un valor máximo [13].

Según establecido por García-Sanz-Calcedo et al. [13] dos condiciones son necesarias para asegurar una sobrepresión en una sala. La primera es que el flujo de retorno sea más pequeño que el flujo de entrada y la segunda que las puertas se mantengan cerradas. Con relación a la primera, no hay una relación directa entre el flujo de retorno y el de entrada para lograr una sobrepresión en los valores determinados anteriormente. Ya con relación a la segunda, la entrada y salida de personas hace con que los valores de sobrepresión no sean constantes en el tiempo.

Finalmente, la presurización de los quirófanos debe existir siempre, mismo en los momentos de no utilización, como puede ser por las noches. En estas situaciones de 'espera' la sobrepresión tiene que mantenerse, mismo con una disminución drástica de los caudales de impulsión y extracción del quirófano [7].

1.1.3) Normativa aplicable

Las normas, directivas y guías referentes al ahorro energético en los hospitales y en los quirófanos, especialmente, son diversas y varían de acuerdo con el país de emisión, como expuesto en la primera sección de este trabajo. En [10], hay un recopilado, en una sección reservada, de toda la normativa vigente en España y un resumen con los parámetros que se establecen en la normativa internacional sobre el tema.

Para este trabajo específicamente, además de la norma ISO 14644-4 ya citada para la consulta de la sobrepresión, se ha tenido especialmente en cuenta lo expuesto por la norma UNE 100713:2005 [14] sobre las instalaciones de acondicionamiento de aire en hospitales, principalmente la sección 6.6 (Instalaciones de acondicionamiento de aire en quirófanos. En este apartado se puede apreciar la consigna del mínimo de 20 renovaciones hora de aire para un quirófano en funcionamiento, pero ninguna consigna para periodos de no ocupación.

1.1.4) Literatura existente

Antes del desarrollo de este trabajo, se va a exponer una rápida revisión bibliográfica de estudios realizados sobre el tema de ahorro energético en quirófanos o incluso en salas limpias industriales (se podría hacer un paralelo directo entre estos tipos de salas), a través de la actuación en la ventilación de estos espacios.

Woods [15] en 1986 ya indicaba que manipulando los sistemas de control de la ventilación se podría conseguir reducciones significativas en los quirófanos. Habría que tener cuidado, porque algunas alternativas podrían aumentar el riesgo de infección. Por eso, considera que las alternativas son limitadas cuando se compara los ahorros económicos posibles debido a la reducción de la ventilación con los costes asociados a una nueva infección causada por esta reducción.

Tschudi [16] ha realizado un estudio basado en las horas de no ocupación de dos salas limpias especializadas en semiconductores, suponiendo que las personas son la más importante fuente de contaminación de estas salas. Durante estos periodos de 'espera', el sistema de ventilación fue configurado con la ayuda de temporizadores para proporcionar menos caudal de impulsión y en consecuencia con una velocidad de los ventiladores inferior a la nominal. La reducción en la velocidad de los ventiladores cerca de 30% por las noches ha significado una reducción en el consumo de 72% en la potencia eléctrica. Considerando toda la estrategia propuesta, se estima que los ahorros energéticos ascienden a 125000 kWh al año, a través de una extrapolación de los datos con otras unidades acondicionadoras de aire no medidas.

Lo más importante que ha marcado este estudio es que los ahorros fueran conseguidos sin ningún efecto adverso en nivel de limpieza de la sala. Indica a mayores dos estrategias de control para lograr la disminución de caudal con el control del problema de la contaminación: sensores de presencia y monitorización en tiempo real de partículas.

Utilizando simulaciones transitorias para comprobar la eficiencia de recuperadores de calor en la reducción del consumo energético y del crecimiento de hongos en zonas calientes y húmedas, Yau [17] expone que los recuperadores con tubo de calor (*heat pipe*) es el dispositivo que proporciona más reducción energética en los HVAC. El ahorro en el estudio llegó a ser de 57,85% con un retorno de inversión de menos de un año, siendo el más rápido entre todos los sistemas estudiados. Además, ese Sistema es capaz de solucionar el problema del crecimiento de hongos en zonas cálidas y húmedas.

A través de medidas experimentales en campo en un quirófano de un hospital en Taiwán y de una simulación numérica, en [18] se propuso un estudio de evaluación de la performance de un sistema de HVAC para un quirófano desocupado. Se ha verificado el compromiso entre el ahorro energético y los principales parámetros de funcionamiento de este tipo de sala, como son el número de partículas y microorganismos, presurización, temperatura y humedad. Con una presión variable, se concluye que es posible tener un ahorro energético con la disminución del caudal de impulsión en más de 50% sin pérdida de eficiencia en la eliminación de partículas, ya que se mantiene una presión diferencial superior a 1 Pa.

Con relación a las renovaciones de aire, en [19] se ha demostrado que ni todos los parámetros que envuelven el número de partículas y de microorganismos son beneficiados directamente con el aumento de las renovaciones de aire. En suma, no es porque aumentamos las renovaciones de aire que dejamos el aire más limpio. Además, ha señalado que hay ciertas áreas del quirófano que son más susceptibles a la contaminación, debido a la velocidad de aire en la sala que varía en sitios claves. Todo eso dentro de una perspectiva de reducción de costes y calidad del aire de la sala.

Los impactos económicos y medio ambientales del ahorro de energía en los edificios hospitalarios fueron discutidos en el trabajo de García-Sanz-Calcedo [9]. Dentro de las múltiples líneas de acción, la mejora de los sistemas HVAC como un todo contribuyeron para la reducción de hasta 1,8 kWh/m² en edificios más grandes que

5000 m² con camas con un retorno de inversión de menos de 2,5 años. Las medidas indicadas para ser aplicada en esta área son: a) sustitución de máquinas de baja performance con más de ocho años de antigüedad por nuevas; b) mantenimiento de sistemas HVAC, c) separación por zonas de acuerdo con las unidades de acondicionamiento de aire; d) instalación de sistema de termostatos manualmente ajustables.

Un estudio más teórico ha sido elaborado por Porowski [11] proponiendo la optimización de la ventilación de un quirófano a través de modelo de simulación vectorial, con la presencia de dos modos de funcionamiento principalmente: Modo activo (operación en curso) y modo pasivo (pausa en el funcionamiento), donde el caudal de aire exterior representaba 30% del caudal presente en modo activo). El trabajo indica que la centralización del proceso termodinámico y del subsistema de filtración llevan al aumento del consumo energético del sistema HVAC del quirófano.

Por último, en otra aplicación para salas limpias, una estrategia de ventilación adaptativa desacoplada ha sido propuesta por Zhuang et al. [20] para una sala limpia de una factoría localizada en Hong Kong, una ciudad húmeda subtropical, teniendo en cuenta un estricto control de las condiciones interiores. Consiste básicamente en desacoplar el enfriamiento de la deshumidificación, añadiendo un recuperador adaptativo a mayores. Se pretende incorporar las ventajas de tres de las más avanzadas estrategias de ventilación y se añade un economizador adaptativo para considerar las necesidades de temperatura y humedad en las estaciones frías y calientes.

1.1.5) Trabajos previos realizadas en el departamento

A parte de todos los trabajos anteriores, el grupo de investigación al cual este trabajo pertenece ha creado publicaciones que han servido de base para la reflexión del presente Trabajo de Fin de Máster.

El Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la UVa (IEF-UVa), representados por Julio Francisco San José y José Manuel Villafruela, en colaboración con el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del Hospital Clínico Universitario de Valladolid (HCUVa), cuyo responsable es Andrés Zarzuelo, ha realizado estudios sobre la contaminación de los quirófanos asociadas a los patrones de flujo en la ventilación [21].

El TFM de Ismael Lozano Gabarre (estudiante de la UVa en colaboración con el HCUVa) ha sido realizado también dentro de esta misma línea de investigación, con el fin de caracterizar el patrón de flujo de aire creado en la apertura y cierre de puertas, para tipos diferentes de puertas y flujos de aire [22].

Además, el Manual de diseño de la climatización y ventilación de quirófanos y habitaciones en centros hospitalarios en Castilla y León, citado previamente [10], también es de autoría de este grupo de investigación. El Manual marca las bases de este TFM en el apartado de “Funcionamiento del quirófano fuera de horas de servicio”, donde expone:

“Fuera de las horas de servicio debe asegurarse el funcionamiento de la instalación de acondicionamiento de aire de los quirófanos. Así se evitará su contaminación con aire procedente de otras zonas.

Por el mismo motivo, cuando los quirófanos no estén operativos debe mantenerse en funcionamiento la climatización. Sin embargo, para ahorrar energía, se disminuirá el caudal de impulsión y de extracción de forma simultánea al 50%, garantizando la diferencia de presiones con las salas contiguas. Se denominará funcionamiento “en espera”.

El paso de las condiciones de funcionamiento “en servicio” a las condiciones de “en espera” y viceversa se hará con un conmutador desde el interior del quirófano con indicadores luminosos visibles verde y rojo respectivamente.

Los periodos de limpieza y mantenimiento se considerarán como tiempos operativos. Es importante que durante estos periodos se mantenga la disciplina en cuanto a circulaciones de personas y cierre de puertas y esclusas.

El paro completo de las instalaciones es admisible solamente para realizar tareas urgentes de mantenimiento y reparación y deben limitarse a un periodo mínimo.”

1.2) Planteamiento y definición de los objetivos

Teniendo en cuenta los acuerdos de colaboración mencionados entre el HCUVa y el IEF-UVa, se ha planteado un nuevo estudio de posible ahorro energético en el hospital. Este estudio estaría basado en los quirófanos, específicamente con actuación directa en la ventilación por dos motivos ya elucidados en los apartados anteriores:

- 1) Los quirófanos representan un consumo energético muy importante en el hospital. Son considerados zonas críticas y tienen altas restricciones normativas de renovación de caudal vistas en el apartado de normativa;
- 2) La ventilación es la carga energética más significativa dentro de un quirófano. Actuar aquí sería un eje de trabajo que puede proporcionar ganancias importantes frente a un ahorro de energía global.

Sin embargo, para la ventilación, el hospital ya cuenta con un sistema de ahorro energético: sistema de recuperación de calor de dos baterías y bomba (del inglés, *run-around-loop heat recovery*).

Este sistema es uno de los pocos que se puede utilizar con objetivos de recuperación de energía de corrientes de aire utilizadas en un hospital, ya que imposibilita la contaminación por flujo cruzado. Sin embargo, tiene como inconvenientes principales su reducción de la eficiencia por el doble intercambio térmico aire-líquido-aire y el peligro de oxidación y/o corrosión [2].

Su arquitectura y funcionamiento son muy simples [23]. Una bomba bombea un líquido (generalmente agua o una solución anticongelante) por un circuito cerrado que intercambia calor a través de dos baterías de calor: la primera en contacto con el aire de escape y la segunda en contacto con el aire fresco del exterior que se pretende impulsar en la instalación;

- Dos ventiladores (posicionados en pareja con cada intercambiador) garantizan un mayor intercambio de calor entre las corrientes de aire y el fluido del circuito;
- Una válvula de expansión es utilizada para absorber los posibles cambios de volumen del líquido en el interior del tubo;
- Una válvula de tres vías controla el sentido del flujo, dependiendo de las condiciones meteorológicas: en invierno, recuperamos el calor de la corriente de escape para precalentar el aire frío exterior, mientras que, en verano, hacemos la operación inversa para pré-enfriarlo. También sirve para evitar problemas como el de la congelación durante la temporada invernal, garantizando un caudal suficiente de líquido de manera que la temperatura de este a la entrada de la batería de enfriamiento permanezca suficientemente elevada y pueda evitar la congelación del agua condensado en la corriente de aire de expulsión [2].

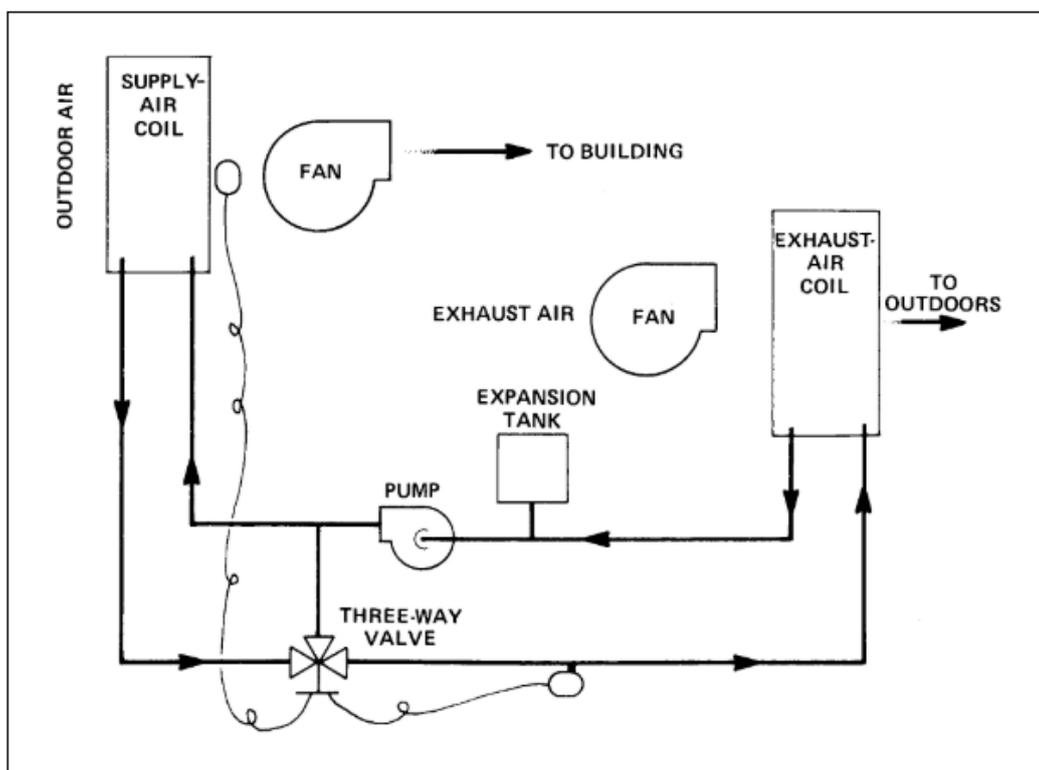


Figura 3: Esquema de recuperación de calor runaround loop utilizada en el HCU. Fuente: [23]

En condiciones de operación de igualdad de caudal de corrientes y sin condensación, podríamos conseguir una eficiencia de recuperación ascendiendo a un 65%. Merece la pena concretar aquí que una alta eficiencia de recuperación no significa directamente un ahorro neto en los costes y que la eficiencia de recuperación de estos dispositivos puede variar fuertemente con las condiciones exteriores [24].

De esta manera, dentro del abanico de soluciones de ahorro energético en la ventilación y considerando este sistema robusto ya implementado en el hospital, se propone un estudio suplementar al instalado en el hospital con la estrategia *setback* de ventilación. Esta es una solución implementada en el Hospital Río Hortega (HRH) en Valladolid, con el cuál el IEF-UVa también cuenta con una c académica.

La estrategia de *setback* (de retroceso, en traducción libre al castellano) es una técnica de ahorro energético que reduce el caudal de ventilación de un recinto en periodos de no ocupación [25]. Se puede también controlar los parámetros de temperatura y de humedad en estos periodos para reducir el coste energético. Es conocido también como estrategia nocturna o de no ocupación.

De inmediato, parece una solución sencilla o incluso obvia, teniendo en cuenta que su implementación supone poco o ningún coste a la instalación (dependiendo del nivel de integración automática que tenga) y que un quirófano puede tener un periodo de no ocupación de 60% o más en una jornada ordinaria. No obstante, la necesidad de mantener las salas en sobrepresión supone estudios rigurosos para proponer un caudal de *setback* o de condiciones de temperatura y humedad, para garantizar condiciones de no contaminación del quirófano, aunque no estemos en las consignas de renovaciones de aire definido por norma.

Se ha procedido entonces a un acuerdo con el HCU para realizar ensayos experimentales en algunos de sus quirófanos con la estrategia *setback* de ventilación. De ahí desplegamos los objetivos globales y específicos que siguen, así como los factores a analizar:

- **Objetivo global:**

Comparación entre la estrategia de recuperación de calor existente frente a la optimización de caudales de impulsión en la ventilación de quirófanos, durante periodos de no ocupación.

- **Objetivos específicos:**

1- Ahorros térmicos: Comparativa entre (por orden de menor a mayor eficiencia esperada):

- Caudal mantenido (V2), recuperador existente pero no operando (R1)
- Caudal mantenido (V2), con recuperación (R2)
- Caudal optimizado (V1), sin recuperación (R1)
- Caudal optimizado (V1), con recuperación (R2)

2- Ahorros eléctricos: Verificación de la respuesta en términos de ahorro eléctrico de los variadores de frecuencia de los ventiladores de impulsión y extracción, frente a la reducción de caudal propuesta. Se mantiene la consigna de sobrepresión, pero necesitamos asegurar que llegamos a los niveles determinados y a que condiciones de consumo energético para tal logro.

3- Sobrepresión: Se quiere garantizar que la sobrepresión del quirófano se mantiene en niveles adecuado para evitar una posible contaminación mientras se aplica el caudal reducido.

- **Factores:**

Tabla 2: Factores de actuación en la ventilación

RECUPERACIÓN	CAUDALES (niveles)
R1 (existe, pero no opera)	V1 (no ocupación)
R2 (existe y opera)	V2 (ocupación)

A través de la combinación de estos factores, se pretende alcanzar los objetivos específicos y consecuentemente el objetivo principal.

1.3) Estructura del trabajo

Con el fin de presentar con objetividad y claridad las etapas de realización de este trabajo, se lo estructurará de la siguiente manera:

- a) **Metodología:** En este apartado, se presentarán las generalidades del hospital (localización, estructura e instalaciones), la elección de los quirófanos de control y como se han organizado los ensayos, especificando las condiciones asumidas, los casos propuestos, tipo de datos adquiridos y el método de cálculo utilizado.
- b) **Resultados y discusión:** Una vez presentada la metodología, se expondrá el análisis de los resultados obtenidos, de manera temporal, estadística y económica, haciendo una discusión concreta del impacto en los objetivos definidos inicialmente. Concretamente, se dividirá en 3 subapartados: a) Evolución temporal de parámetros de interés; b) Ahorro energético en los quirófanos analizados; c) Estudio de impacto económico.
- c) **Conclusiones:** Para finalizar, se resumirán las conclusiones que habrá sido presentadas directa o indirectamente en el apartado anterior, contrastando con las hipótesis de partida del proyecto. Se señalará futuras vías de investigación y de aplicación del trabajo.

2) METODOLOGÍA

2.1) Caso de estudio: Hospital Clínico Universitario de Valladolid

El estudio de este trabajo se desarrolla en el Hospital Clínico Universitario de Valladolid, localizado en la Avenida Ramón y Cajal, 3, en el barrio homónimo de la ciudad. Es uno de los hospitales referentes de la capital vallisoletana, atendiendo a una población de 260 mil personas. Esta cifra puede llegar a 500 mil si consideramos la influencia de algunas de sus especialidades clínicas en la comunidad de Castilla y León. Aunque especializado en los estudios clínico, como bien indica su nombre, la nueva área de urgencias inaugurada en enero de 2015 con sus 3750 m² ratifica también la imagen de un centro de urgencias y quirúrgico.



Figura 4: Imagen de satélite del Hospital Clínico Universitario de Valladolid. Fuente: Google Maps

Específicamente, se ha elegido esta nueva zona de instalaciones para los ensayos, en el área destinada a los centros quirúrgicos de la primera planta. Cuenta con dieciocho quirófanos, repartidos igualmente en tipos A y B, según la normativa actual [14]. Esta clasificación se refiere al tipo de flujo utilizado en la ventilación: flujo laminar si es de tipo A y flujo turbulento si es de tipo B. Es la característica principal de un quirófano y puede tener influencia directa en parámetros como la contaminación o los caudales de impulsión y extracción.

Los quirófanos son organizados por grupos de cuatro o de dos, con los cuales comparten zonas comunes. A saber:

- Hall de entrada;
- Pasillo limpio: acceso para personal sanitario, material limpio y pacientes;
- Pasillo sucio: salida de material utilizados;
- Zona de preparación: compartida a cada dos quirófanos, es la zona para la desinfección del personal antes de una intervención y donde se guarda todo el material limpio.

La distribución de las salas de la primera planta puede ser visualizada en la Figura 5:



Figura 5: Zona quirúrgica de la ampliación del HCUVa. Fuente: Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa

Dentro de la posibilidad de elección de los quirófanos para este Trabajo de Fin de Máster, se buscaban dos quirófanos para poder, a partir de un quirófono de control y otro de ensayo, hacer comparaciones directas utilizando las mismas condiciones exteriores. De esta forma, se han planteado los siguientes criterios para la selección:

- **Volumen equivalente:** garantizar que el volumen de aire en las dos salas sea directamente comparable;
- **Del mismo tipo y funcionalidad:** eliminación de una posible influencia del tipo de flujo en los resultados. Si tienen la misma funcionalidad, tendrán

juegos de equipos equivalentes y se podría garantizar que son quirófanos semejantes;

- **Localización interior:** garantizar que las salas están suficientemente alejadas de muros exteriores y así considerar que la carga térmica es exclusiva de la ventilación;
- **Disponibilidad:** buscar quirófanos que tienen un tiempo de utilización estándar (8 horas al día) y que permitiesen periodos de no ocupación para la realización de los ensayos;
- **Experiencia:** quirófanos que ya fueron utilizados para otros estudios. De esta manera se podría sacar conclusiones directas de resultados anteriores.

Juntamente con el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa, se ha elegido los quirófanos codificados Q37 y Q38, de tipo A.

El primer elegido fue el Q37, por haber sido objeto de estudio de Lozano Gabarre [22], estar aislado de muros exteriores y tener una utilización estándar. Es el quirófano de control. Para elegir su pareja de ensayo, se ha buscado uno con volumen similar ($123,5 \text{ m}^3$ del Q37 contra $124,5 \text{ m}^3$ del Q38) y del mismo tipo y funcionalidad (ambos son de tipo B y de cirugía general), llegando a la opción del Q38. Además de eso, comparten la misma sala de preparación del personal sanitario, y se les podría considerar prácticamente simétricos.



Figura 6: Zona elegida para estudio. Quirófanos Q37 y 38. Fuente: Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa



Figura 7: Quirófano Q37, de tipo A



Figura 8: Zona de preparación entre los quirófanos Q37 y Q38. a) Lavamanos; b) Stock productos quirúrgicos

2.2) Funcionamiento de la climatización de los quirófanos

La climatización de los quirófanos es proporcionada por Unidades de Tratamiento de Aire (UTA's) y controlada telemáticamente a través de un SCADA de la marca *Schneider*.

Las UTA's son responsables por acondicionar el aire en condiciones deseadas a través de transformaciones físicas como puede ser el calentamiento, el enfriamiento y la humidificación. Las del hospital están localizadas en la última planta del edificio, en una instalación de acceso privado al personal técnico.



Figura 9: UTA del quirófano Q37

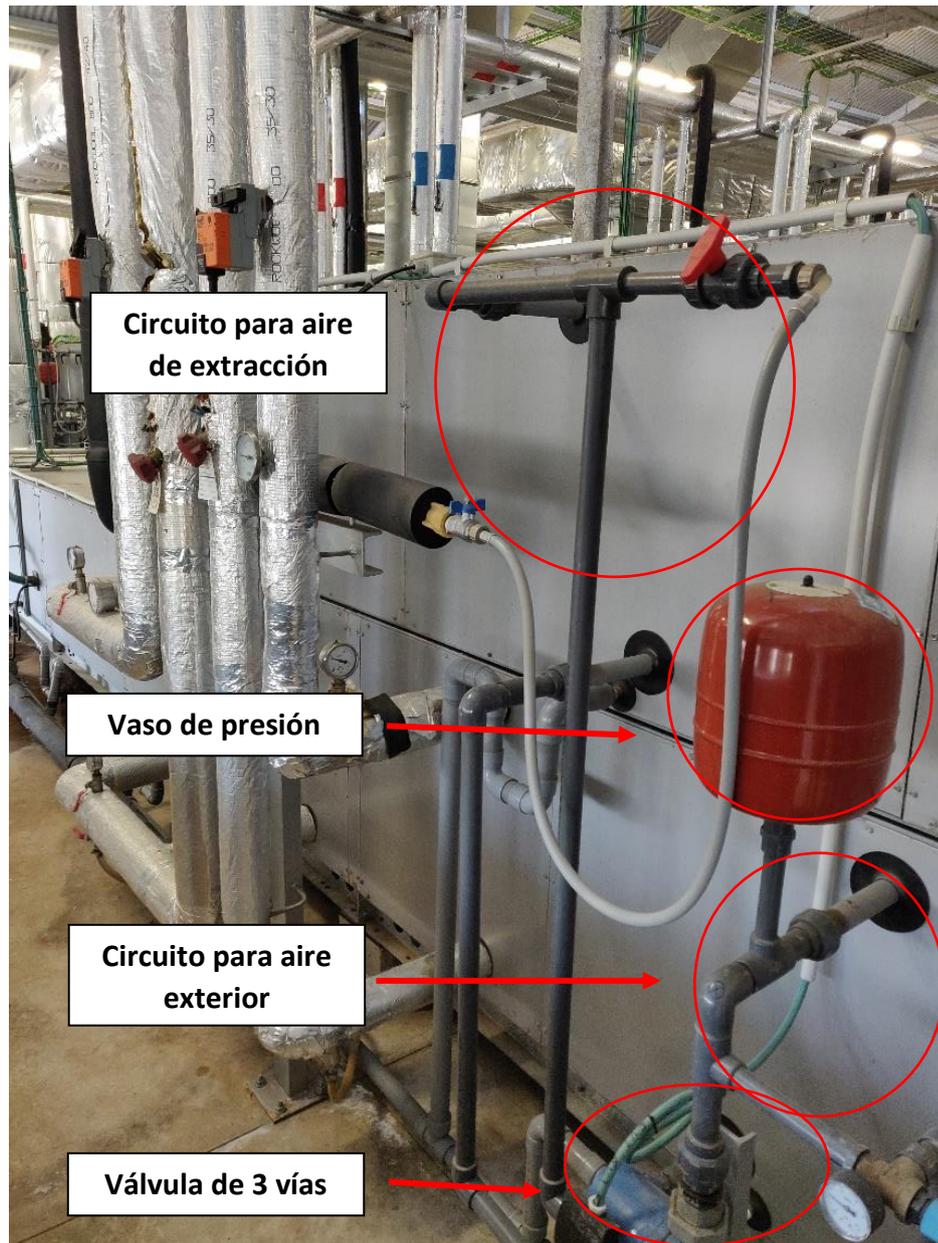


Figura 10: Instalación del sistema de recuperador de calor runaround loop de la UTA del Q37

El control del funcionamiento de la UTA se hace a través de un sistema de control y de adquisición de datos (del inglés, SCADA). Ese sistema permite el seguimiento a tiempo real, el control y la salvaguarda de datos de inúmeros parámetros, no solo de la UTA, pero también de la sala a la cual cada UTA está asociada y de las condiciones climáticas exteriores.

Los principales parámetros que se pueden controlar son los siguientes:

- **Interiores de la sala:** establecimiento de consignas para la temperatura interior y sobrepresión;
- **De funcionamiento de la UTA:** Apagado o encendido del recuperador de calor o de las baterías de calor y control del caudal de impulsión, por ejemplo.
- **Exteriores:** Temperatura, humedad y entalpía exteriores.

El SCADA tiene un *software* que sirve de interfaz para la ejecución de todas las acciones posibles mencionadas anteriormente. Para acciones más complejas, como puede ser el establecimiento de consignas variantes con el tiempo, es necesario una programación especial, pero en general, con simples toques y con una lógica intuitiva, el potente *software* permite al personal técnico del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento de HCUVA un control robusto del sistema de climatización.

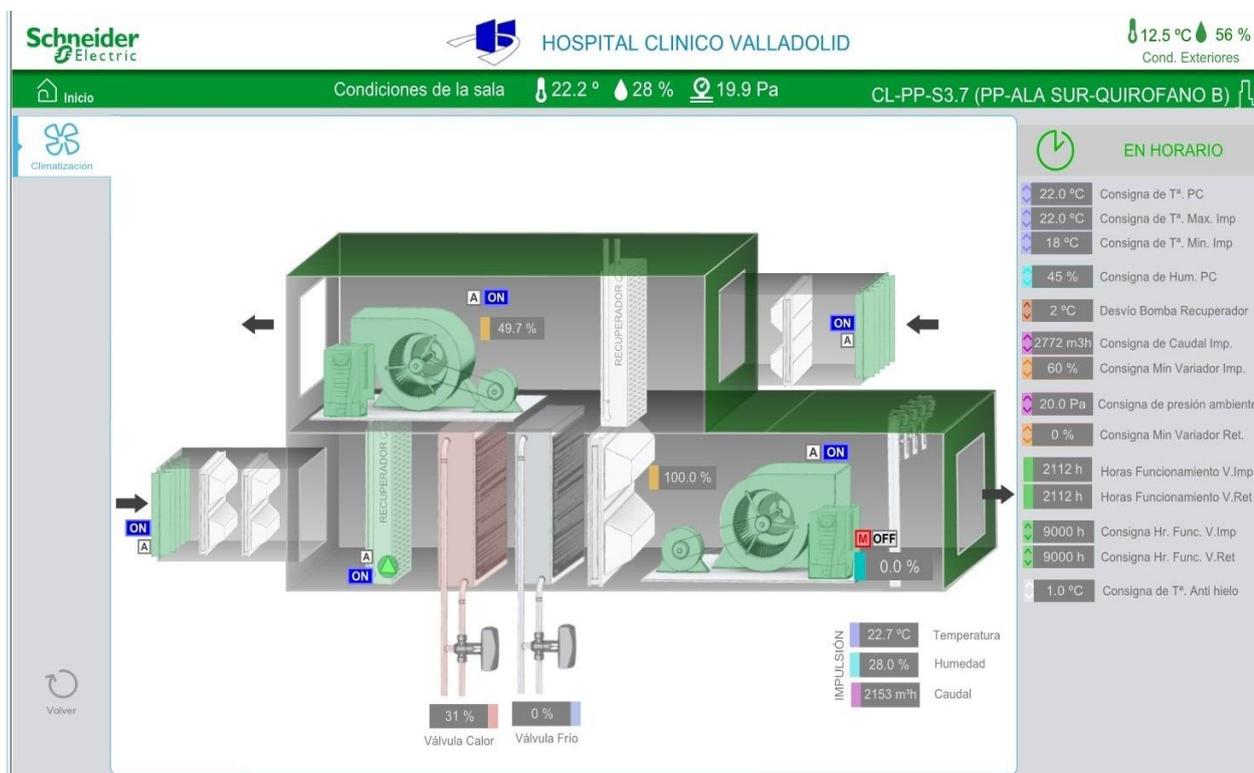


Figura 11: SCADA de la climatización de los quirófanos. Fuente: Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa

2.3) Organización de los ensayos

Con la parte técnica definida, se sigue al establecimiento de la organización de los ensayos, junto al Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVA.

Como es posible controlar todos los parámetros a distancia, no hay necesidad de ninguna acción adicional para la experimentación, como podría ser la instalación de equipos extras o la recogida de datos de forma presencial. De esta forma, para la realización de los ensayos solo hacía falta tres acciones:

- 1) Establecimiento de los parámetros/variables que deben ser grabados;
- 2) Establecimiento de la frecuencia de muestreo a la cual los datos deben ser grabados;
- 3) Cuaderno de cargas de los diferentes casos que deberían ser probados (consignas y tiempo de ensayo).

Para la primera acción, se han pedido los siguientes datos de partida, que servirán de base para los cálculos en la parte de tratamiento de datos:

Tabla 3: Parámetros controlados en los ensayos

	Parámetro	Unidad
Impulsión	Consigna del caudal de impulsión	m ³ /h
	Caudal de impulsión	m ³ /h
	Temperatura de impulsión	°C
	Humedad de impulsión	%
Ventiladores	Potencia del variador de frecuencia de impulsión	kW
	Potencia del variador de frecuencia de retorno	kW
Exterior	Entalpía Exterior	kJ/kg
Sala	Presión manométrica de la sala	Pa
	Temperatura de la sala	°C
	Entalpía de la sala	kJ/kg

En segundo lugar, se ha definido la frecuencia de muestreo de los datos en los ensayos, representando a cada cuanto tiempo se debe almacenar los valores de los parámetros solicitados. Una frecuencia muy alta, de orden de segundos, por ejemplo, proporcionaría un seguimiento más continuo de las variaciones de los parámetros, pero necesitaría un espacio de almacenaje importante en la base de datos del hospital, teniendo en cuenta que el ensayo ocurrirá durante varios días. Buscando una solución de compromiso entre el carácter continuo y el espacio de almacenaje de los datos, se ha acordado una frecuencia de toma de datos de 10 minutos, lo que representa 144 datos instantáneos de cada parámetro por día o 1440 datos en total por día.

Por último, se define un cuaderno de cargas inicial con las consignas y los factores para ensayo. Los casos que se han propuesto se diferencian básicamente por las combinaciones del nivel de caudal de impulsión (normal con 2700 m³/h y reducido 1350 m³/h) con el funcionamiento del recuperador de calor (encendido -ON- o apagado - OFF). La temperatura interior del quirófano se fija a 22 °C y son las diferentes condiciones exteriores que condicionan los resultados obtenidos.

Por decisión del hospital, los ensayos con el caudal reducido solo podrían ser hechos en los finales de semana, por la inseguridad inicial que esta acción conlleva en relación con la sobrepresión residual en el quirófano. De esta forma, a lo largo de tres meses de ensayos, el cuaderno de cargas ha evolucionado según se iban analizando los datos adquiridos. La tabla abajo recompila todos los ensayos realizados:

Tabla 4: Resumen de los casos de análisis en el hospital

Caso	Inicio	Fin	Quirófano Q37		Quirófano Q38	
			Caudal	Recuperador	Caudal	Recuperador
1	01/03/2019	15/03/2019	Normal	ON	Normal	ON
2	15/03/2019	22/03/2019	Normal	OFF	Normal	OFF
3	22/03/2019	25/03/2019	Reducido	ON	Reducido	ON
4	25/03/2019	29/03/2019	Normal	ON	Normal	ON
5	29/03/2019	01/04/2019	Reducido	OFF	Reducido	OFF
6	12/04/2019	15/04/2019	-	-	Reducido	OFF
7	15/04/2019	24/04/2019	-	-	Normal	ON
8	17/05/2019	20/05/2019	Normal	ON	Reducido	ON

2.4) Tratamiento de los datos

Los datos de los ensayos han sido repasados en formato de ficheros Excel para su tratamiento y análisis.

Además de los parámetros obtenidos experimentalmente, hace falta el cálculo de parámetros intermedios para llegar a la potencia energética consumida instantánea, ya que no se puede obtener la entalpía del aire directamente del SCADA. Para tal, se utiliza el cálculo de variables psicrométricas para la impulsión, hasta llegar al dato faltante [26]. Siguiendo un orden lógico de cálculo, hacemos las siguientes operaciones:

Ecuación 1: Presión de vapor de saturación

$$P_{v\ sat} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{(T+273)-37,58}\right) \text{ [Pa]}$$

Ecuación 2: Presión de Vapor

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{v\ sat} \text{ [Pa]}$$

Ecuación 3: Presión de aire seco

$$P_{as} = Pa - P_v \text{ [Pa]}$$

Ecuación 4: Volumen específico

$$v_e = \frac{R_a \cdot (T+273)}{P_{as}} \text{ [m}^3/\text{kg}_{as}]$$

Donde: $R_a = \frac{R}{PM_a} = \frac{8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})}{0,02897 \text{ kg}_{as}/\text{mol}}$

Ecuación 5: Flujo másico

$$\dot{m} = \frac{Q_{imp}}{v_e * 3600}$$

Ecuación 6: Humedad específica

$$x = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P_T - P_v} \text{ [kg}_v/\text{kg}_{as}]$$

Ecuación 7: Entalpía

$$i = (Cp_a + Cp_v \cdot x) \cdot T + x \cdot \lambda \text{ [kJ/kg}_{as}]$$

Donde:

$$Cp_a = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg}_{as} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$Cp_v = 1,9 \text{ kJ}/(\text{kg}_v \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\lambda = 2501 \text{ kJ}/(\text{kg}_v)$$

Con el dato de la entalpía de impulsión, es posible calcular directamente la potencia térmica instantánea multiplicando el flujo másico por la diferencia de entalpía entre la impulsión y el aire exterior.

Ecuación 8: Potencia térmica instantánea de la UTA

$$P_{\text{térmica}} = (i_{\text{impulsión}} - i_{\text{exterior}}) * \dot{m}$$

La potencia eléctrica es calculada con suma simple de las potencias de los variadores de frecuencia de los ventiladores.

Para un análisis más eficaz de los datos, se han creado dos plantillas estándares: una para recibir los datos de un día completo de datos de un quirófano y otra para la comparación entre un día de datos de los dos quirófanos.

Quirófano	37	Caudal	Recuperador	Pa_Valladolid(760m)	9252190820
Día	30/03/2019	Condición de funcionamiento	Reducido	Pa(kJ/kg K)	286,9865378

Hora	Caudal_imp	Ent_Sala	Ent_Ext	Hum_imp	Pot_var_imp	Pot_var_ret	Presión_sala	Temp_imp	Temp_sala	Pv_sel_imp	Pv_imp	Pas_imp	Ve_imp	Fluomas_imp	x_imp	Ent_imp	Pot_cons	Pot_var_tot	
-	m³/h	kJ/kg	kJ/kg	%	kW	kW	bar	°C	°C	Pa	Pa	Pa	m³/kg	kg/s	kg/kgas	kJ/kg	kW	kW	
Imp1	23:50:00	1.357,44	42,40126	20,93197	99,78861	0,2	0	10,43611	17,80121	22,82774	2020,737629	2016,464	90505,4453	0,92210621	0,408896945	0,013866178	53,01823345	13,12083	0,2
Imp2	23:40:00	1.357,44	42,40126	20,93197	99,78861	0,2	0	10,43611	17,80121	22,82774	2020,737629	2016,464	90505,4453	0,92210621	0,408896945	0,013866178	53,01823345	13,12083	0,2
Imp3	23:30:00	1.357,44	42,40126	20,93197	99,78861	0,2	0	10,43611	17,80121	22,82774	2020,737629	2016,464	90505,4453	0,92210621	0,408896945	0,013866178	53,01823345	13,12083	0,2
Imp4	23:20:00	1.348,22	45,215	21,28209	96,8972	0,2	0	19,93676	13,54776	22,91609	1538,327812	1490,512	91011,3963	0,903373477	0,414562088	0,010184383	38,34879495	7,48977019	0,2
Imp5	23:10:00	1.348,22	39,1076	21,18894	94,7243	0,2	0	17,67534	16,95584	22,73293	1751,763267	1616,4771	91915,4321	0,901974394	0,415966106	0,010417709	26,05372016	2,0222014	0,2
Imp6	23:00:00	1.339,60	37,48656	21,53925	93,7243	0,2	0	20,23629	19,0216	22,78716	2261,90922	2175,546	91046,3632	0,927610863	0,40114902	0,010437738	57,11749422	14,222719	0,2
Imp7	22:50:00	1.339,60	44,33989	21,94444	93,73003	0,2	0	21,42964	13,05916	22,79212	1469,993322	1495,561	91035,9484	0,901788023	0,412635995	0,010762776	38,78846413	6,9139451	0,2
Imp8	22:40:00	1.338,27	42,71653	21,44832	95,53816	0,2	0	19,88371	13,54808	22,71106	1538,463026	1009,294	91613,6163	0,898617416	0,413630443	0,008365175	30,93333322	3,9236432	0,2
Imp9	22:30:00	1.372,45	39,32982	20,9983	91,74829	0,2	0	15,70419	19,97479	22,62401	2314,845300	734,947	91706,9623	0,916322294	0,416162242	0,014980443	22,79863451	4,5203786	0,2
Imp10	22:20:00	1.353,49	37,43102	21,57582	94,37383	0,2	0	16,71068	15,20195	22,72373	1712,3018	1688,3037	91533,3259	0,898672718	0,417638532	0,003882224	25,55182933	1,5701053	0,2
Imp11	22:10:00	1.367,25	41,71172	20,88079	99,7473	0,2	0	16,40305	19,25334	22,71438	2215,339681	2207,018	90314,8919	0,932867048	0,408366207	0,016193764	57,3032437	16,14773	0,2
Imp12	22:00:00	1.357,44	42,9464	20,93902	98,0865	0,2	0	4,04204	14,04033	22,64544	6588,513813	890,8473	91631,0619	0,89806809	0,418425769	0,006047163	23,38639771	3,5472325	0,2
Imp13	21:50:00	1.330,92	40,71747	21,35617	98,4409	0,2	0	19,61844	16,91495	22,52454	2167,074793	833,0431	91688,8662	0,913639596	0,404621805	0,006851207	33,34629946	4,854618	0,2
Imp14	21:40:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp15	21:30:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp16	21:20:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp17	21:10:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp18	21:00:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp19	20:50:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp20	20:40:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp21	20:30:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp22	20:20:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp23	20:10:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp24	20:00:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp25	19:50:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3
Imp26	19:40:00	1.341,99	43,40357	24,25373	51,2632	0,2	0,1	19,40726	19,85848	21,86768	2298,209628	1177,058	91444,8508	0,920104882	0,405025419	0,008016016	40,30573961	6,5014719	0,3

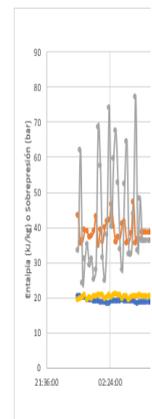


Figura 12: Captura de pantalla de una plantilla para el tratamiento de los datos

En las plantillas, se crean todas las fórmulas y gráficos necesarios para llegar a los resultados requeridos y la dinámica entonces se resume a copiar los datos en los ficheros de base y pegarlos en una pestaña que tiene una de las plantillas como base. Los resultados son sacados de esta forma automáticamente.

2.5) Observaciones sobre la toma de datos

Durante la realización de este trabajo, ha habido un problema en la toma de datos. Por un error en la elección de los transductores, durante muchos ensayos las informaciones del quirófano Q38 han sido copiadas directamente como informaciones del quirófano Q37, obteniendo así datos dobles de un solo quirófano. De esta manera, los datos realmente explotables son los representados en la Tabla 5:

Tabla 5: Casos de ensayos finales

Caso	Inicio	Fin	Quirófano Q37		Quirófano Q38	
			Caudal	Recuperador	Caudal	Recuperador
1	01/03/2019	15/03/2019	-	-	Normal	ON
2	15/03/2019	22/03/2019	-	-	Normal	OFF
3	22/03/2019	25/03/2019	-	-	Reducido	ON
4	25/03/2019	29/03/2019	-	-	Normal	ON
5	29/03/2019	01/04/2019	-	-	Reducido	OFF
6	12/04/2019	15/04/2019	-	-	Reducido	OFF
7	15/04/2019	24/04/2019	-	-	Normal	ON
8	17/05/2019	20/05/2019	Normal	ON	Reducido	ON



3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1) Evolución temporal de parámetros de interés

A partir de los datos adquiridos, se puede hacer un análisis de inmediato sobre la evolución temporal de los parámetros de interés durante el estudio. Para que se pueda centrar en resultados explotables, se define el criterio de presión residual en los quirófanos estipulado por el hospital como la prioridad en esta sección. En suma, se quiere verificar que la presión relativa de los quirófanos no desciende del valor de 20 Pa definido a lo largo de las sucesivas pruebas realizadas.

Es importante especificar que durante los ensayos no teníamos control sobre el acceso al quirófano. Por motivos de limpieza o de mantenimiento, la puerta de la sala puede que haya sido dejada abierta por un periodo de tiempo suficiente entre dos tomas de datos para que la presión caiga a valores próximos del equilibrio. En estos casos específicos, no se considerará la influencia de la caída de presión para los resultados del ensayo.

- **Caso 8: Recuperador ON – Caudal normal (Q37) y caudal reducido (Q38)**

Se empieza con el caso 8, donde es posible comparar, a partir de las mismas condiciones exteriores, la diferencia entre las presiones de los dos quirófanos. Para el primer día completo de ensayo se tiene la siguiente respuesta temporal:

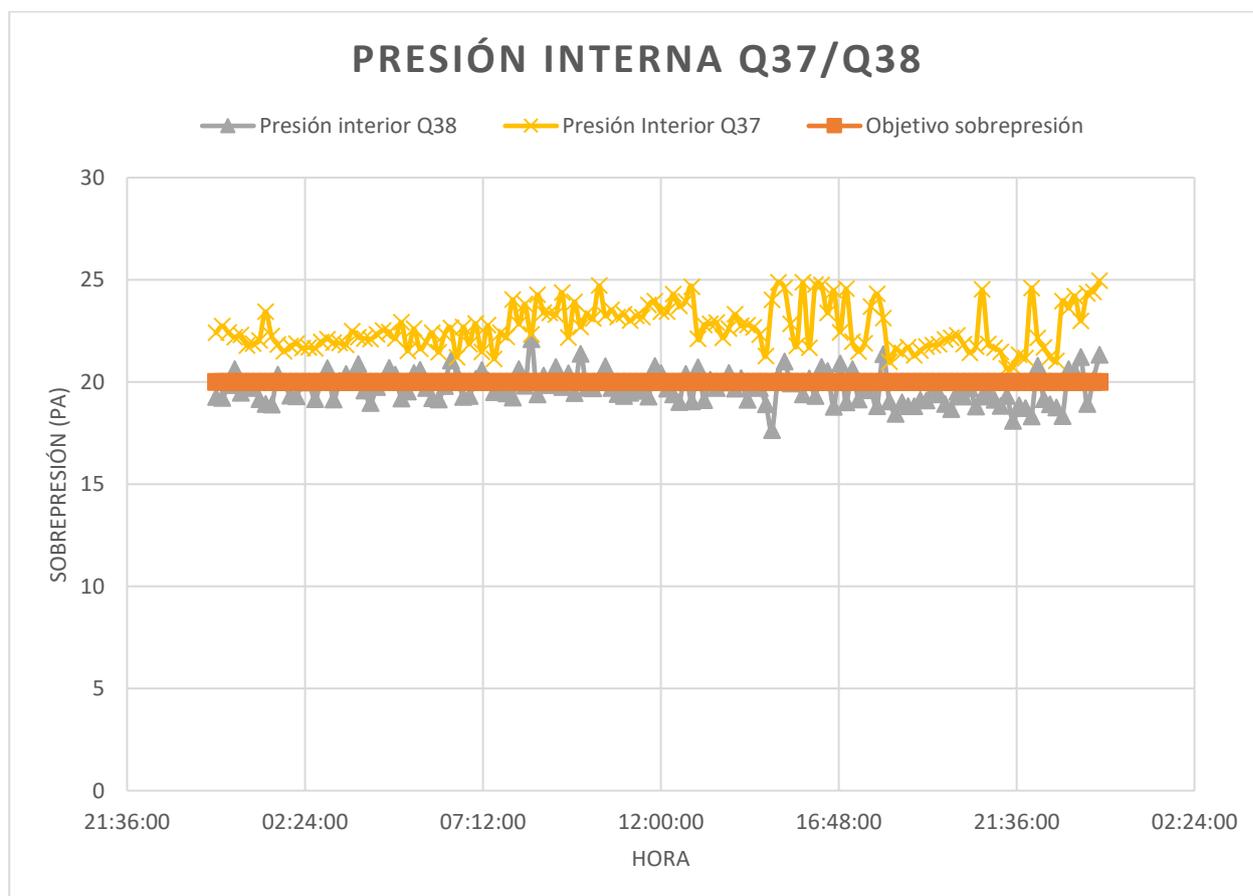


Figura 13: Respuesta temporal de la presión interior para el caso 8 - Día 1

El quirófano 37 (caudal nominal) no experimenta ningún valor de presión interna por debajo de 20 Pa, mientras que en el quirófano 38 (caudal reducido) se aprecia

muchas medidas por debajo del valor limitado. Un análisis estadístico es hecho para cuantificar esta dispersión:

Tabla 6: Análisis estadístico de la variación de presión interna de los quirófanos estudiados en el primer día de ensayos del caso 8

	Q37	Q38
Media Presión (Pa)	22,64	19,71
Desviación estándar (Pa)	1,06	0,74
Valores no conformes (%)	0	67,4
Media de valores no conformes (Pa)	N/A	19,29
Valor mínimo (Pa)	20,65	17,64

Como enseñado en la Tabla 6, la no conformidad de los valores del quirófano 38 llega a 67,4% de los valores, pero con una media de valores no conformes de 19,29 Pa y un mínimo de 17,64 Pa. Esta constatación permite la comprobación que, aunque no se esté en el límite de sobrepresión establecido por el hospital, hay un nivel de sobrepresión importante que podría justificar la correcta aplicación del caudal reducido.

Si se analiza la evolución temporal de la presión en el segundo día completo de ensayos del caso 8 (Figura 14), hay un mismo perfil que en el primer día. Sin embargo, como explicado al principio de este apartado, la imposibilidad de control de la entrada de personas en la sala ha promocionado seis intervalos de caída brusca de presión. En dos de ellos, se llega al equilibrio con la presión exterior. Por ser derivado de variabilidad externa y no de las actuaciones de este trabajo, no se consideran los datos de estos intervalos para el análisis estadístico, porque falsearían las relaciones buscadas entre la ventilación y la sobrepresión interior de los quirófanos. El análisis estadístico de los datos no desechados se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7: Análisis estadístico de la variación de presión interna de los quirófanos estudiados en el segundo día de ensayos del caso 8

	Q37	Q38
Media Presión (Pa)	23,00	19,88
Desviación estándar (Pa)	1,17	0,99
Valores no conformes (%)	0,7	58,33
Media de valores no conformes (Pa)	19,92	19,35
Valor mínimo (Pa)	19,92	16,40

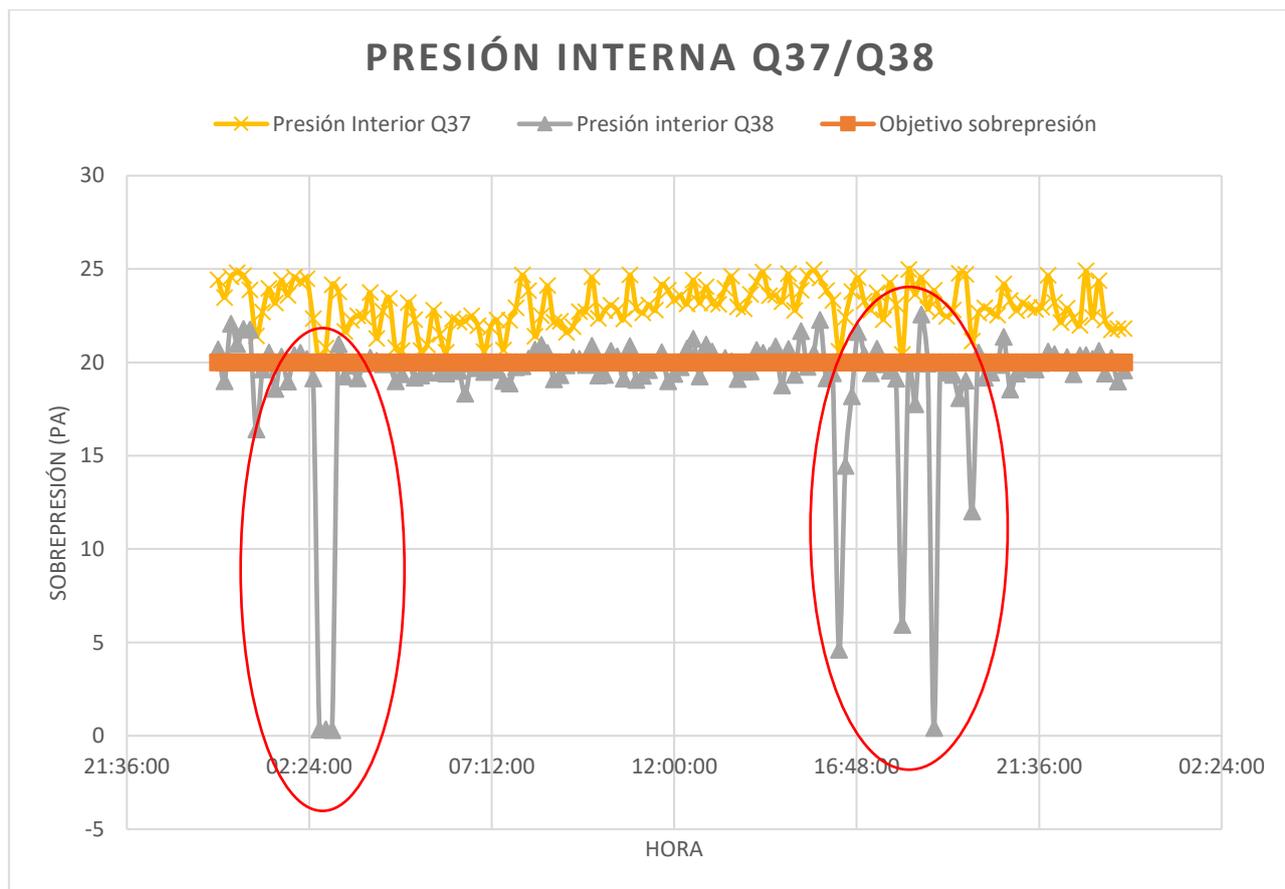


Figura 14: Respuesta temporal de la presión interior para el caso 8 – Día 2. No conformidades.

- **Caso 3: Recuperador ON – Caudal reducido (Q38)**

Para el caso 3, los dos quirófanos estaban en condiciones de caudal reducido. Las condiciones exteriores eran más frías comparadas con las del caso 8. En la Figura 16, se pueden ver no conformidades por acceso al quirófano, pero también un nivel alrededor de los 15 Pa de sobrepresión.

El valor de 15 Pa tiene como posible causa la apertura de la puerta que comunica el quirófano a la zona de preparación quirúrgica. Esta zona está presurizada a una presión inferior, siguiendo la cascada de sobrepresión hasta el equilibrio, como simplificado en el esquema de la Figura 15:

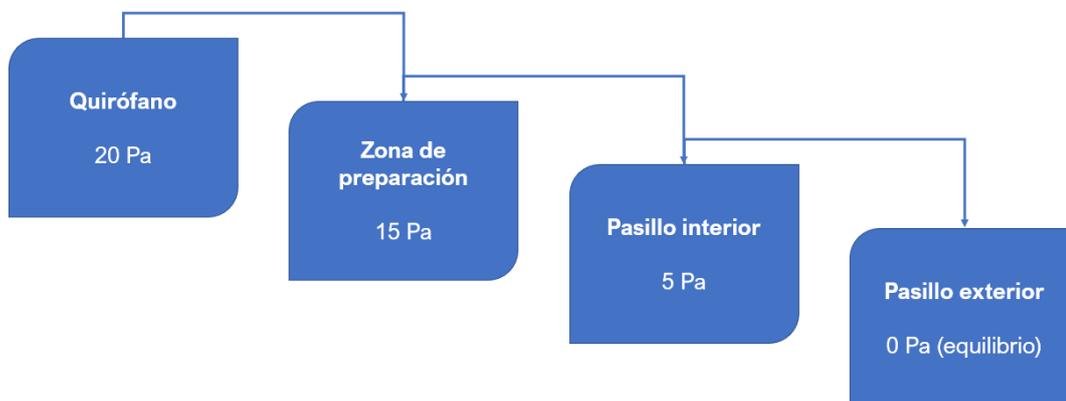


Figura 15: Esquema de cascada de sobrepresión en los quirófanos del HCUVa

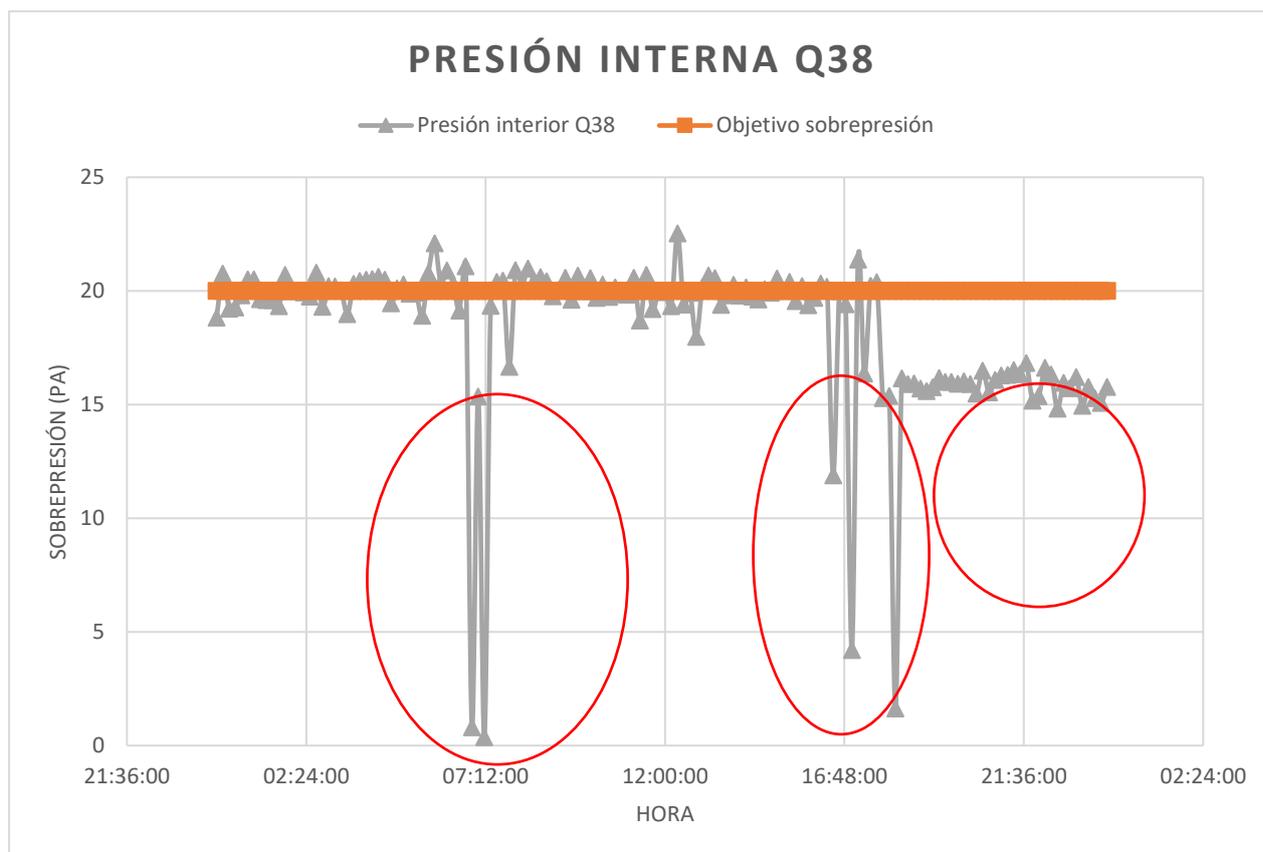


Figura 16: Respuesta temporal de la presión interior para el caso 3- Día 2. No conformidades.

Tabla 8: Análisis estadístico de la variación de presión interna del quirófano Q38 en el segundo día de ensayos del caso 3

	Q38
Media Presión (Pa)	18,89
Desviación estándar (Pa)	0,99
Valores no conformes (%)	59,03
Media de valores no conformes (Pa)	17,85
Valor mínimo (Pa)	14,81

Para los casos de funcionamiento normal del quirófano, este tipo de análisis no puede ser hecho, ya que son las condiciones de operación del centro hospitalario, con entradas y salidas constantes, no siendo las condiciones aptas para el mantenimiento de la sobrepresión. Además, está fuera de lo contemplado con la estrategia de ventilación *setback* y de los objetivos de esta sección.

3.2) Ahorro energético en los quirófanos analizados

Este apartado busca justificar el ahorro energético (térmico y eléctrico) conseguido en los quirófanos analizados, en función de las condiciones exteriores. Se comparará el ahorro energético total conseguido en el caso 8 entre los dos quirófanos

y se enseñará para el Q38 como las diferentes configuraciones utilizadas afectan el consumo energético.

Antes de empezar el análisis de los datos, es importante explicar porque se esperan ahorros térmicos y eléctricos. Los ahorros térmicos son esperados debidos a la disminución de caudal de impulsión, por la propia estrategia de *setback*. Como hay menos caudal impulsado, el flujo másico disminuye. Las cargas térmicas del quirófano a vencer son básicamente las mismas para condiciones de caudal normal o de caudal reducido, teniendo en cuenta que la sala se encuentra desocupada. De esta forma, la potencia térmica instantánea, que se puede calcular con la Ecuación 8, disminuye obligatoriamente.

Ahorros eléctricos también son esperados, por el hecho de que, al impulsar y extraer menos caudal, los ventiladores rotan a menos velocidad y tienen que vencer una pérdida de carga menor, consumiendo así menos.

Empezando el análisis, de acuerdo con los datos obtenidos, el ahorro térmico para el caso 8 en las condiciones exteriores del periodo de 17/05/2019 a 20/05/2019 equivale al área entre las dos curvas de la Figura 17 (área azul):

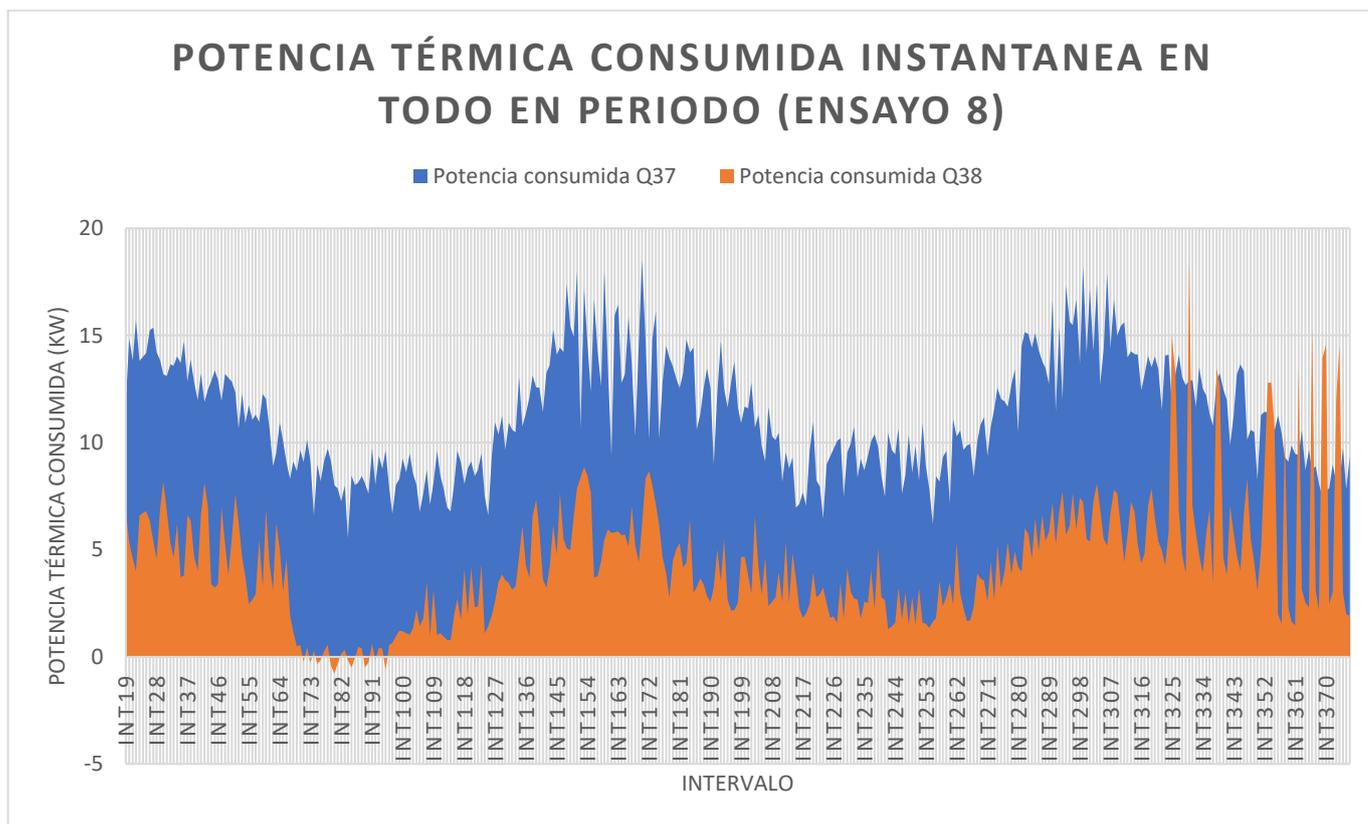


Figura 17: Ahorro térmico en todo el periodo analizado del caso 8

Numéricamente:

$$\frac{\sum_{Caso\ 8} (P_{Q37} - P_{Q38}) [kW] * 600 [s]}{3600 \left[\frac{kJ}{kWh} \right]} = Ahorro [kWh] = 420,1 kWh$$

Siendo P_{Q37} y P_{Q38} las potencias térmicas instantáneas de los quirófanos 37 y 38 respectivamente.

Este ahorro corresponde a un periodo de 60h de ensayo. Se considera que el quirófano Q38 tendría el mismo consumo del Q37, teniendo en cuenta la hipótesis de semejanza entre los dos quirófanos.

Para verificar la influencia del recuperador de calor en los resultados, se comparan dos días de ensayo del quirófano 38 con condiciones exteriores, con el mismo factor de caudal y con la única diferencia de la activación o no del recuperador de calor.

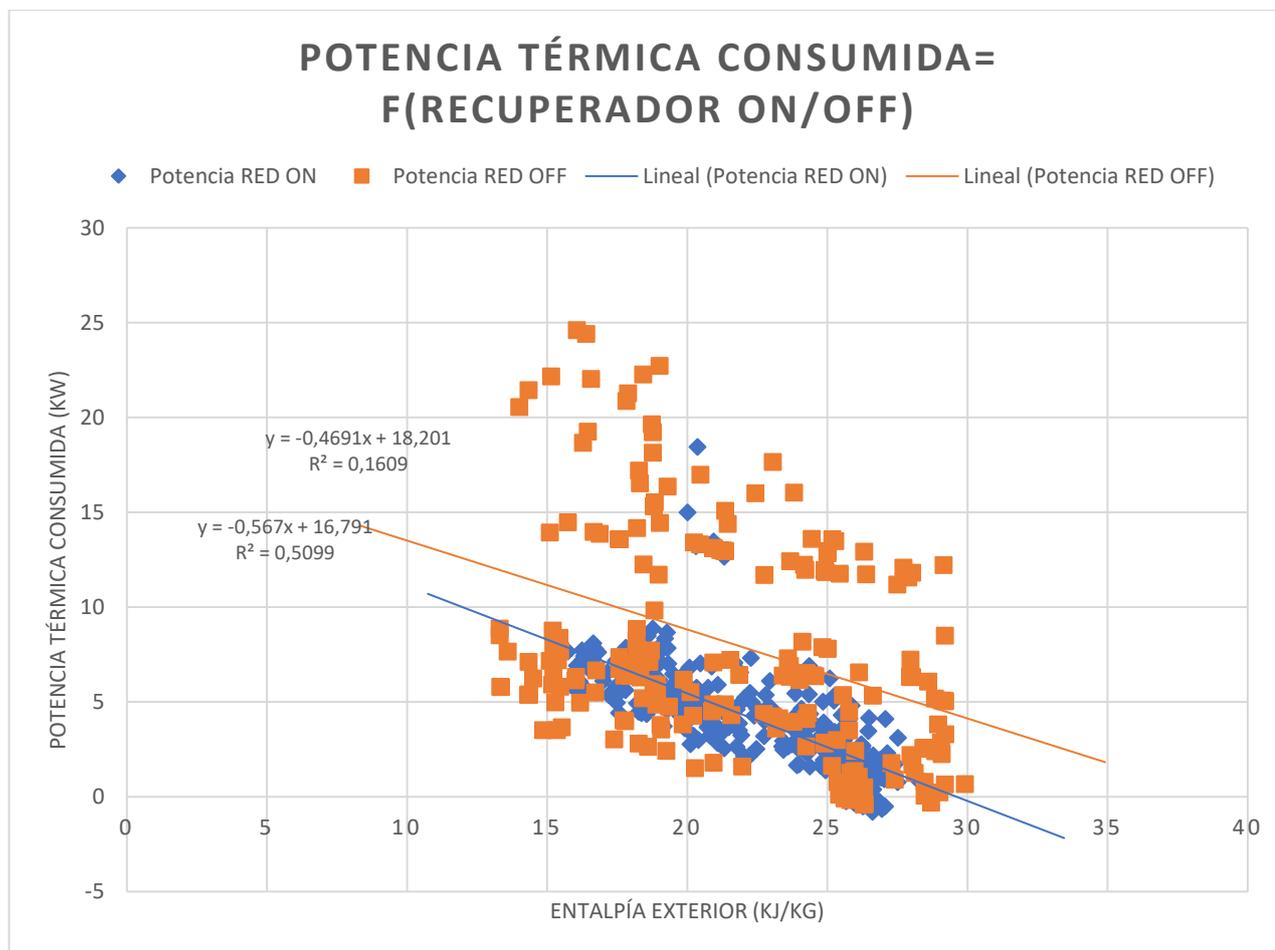


Figura 18: Comparación de potencias térmicas consumidas en función de la presencia o no del recuperador de calor

Mientras que con el recuperador de calor activo se observa una tendencia lineal primitiva, con el recuperador inactivo se nota una dispersión mucho más grande de los datos, lo que no puede ser aproximado a una recta. Otra explicación posible para este efecto es que en este ensayo ha habido una saturación de la base de datos del sistema del hospital y muchos valores no han sido grabados, pero sobrescritos con datos anteriores.

De todos los modos, se llega a la conclusión que el factor del recuperador activo o inactivo se torna secundario para los objetivos de este trabajo, porque como el sistema de recuperación ya está instalado en todas las UTA's del hospital, la estrategia de *setback* sería complementaria al ahorro del recuperador, trabajando en conjunto. Además, aunque esté apagado, no se puede evitar la pérdida de carga de los ventiladores y del circuito de las baterías. Se utilizará a partir de adelante en este trabajo la opción del recuperador de calor activo para los resultados presentados.

Es importante mencionar que el ahorro calculado anteriormente es válido para las condiciones exteriores del caso, con valores de entalpía entre 15,7 y 28,4kJ/kg. Sería interesante conocer como varían las potencias consumidas de los quirófanos analizados en función de la entalpía. En la Figura 19, es posible visualizar la nube de puntos de los dos quirófanos para el caso 8 y una tendencia lineal del factor de caudal (nominal o reducido).

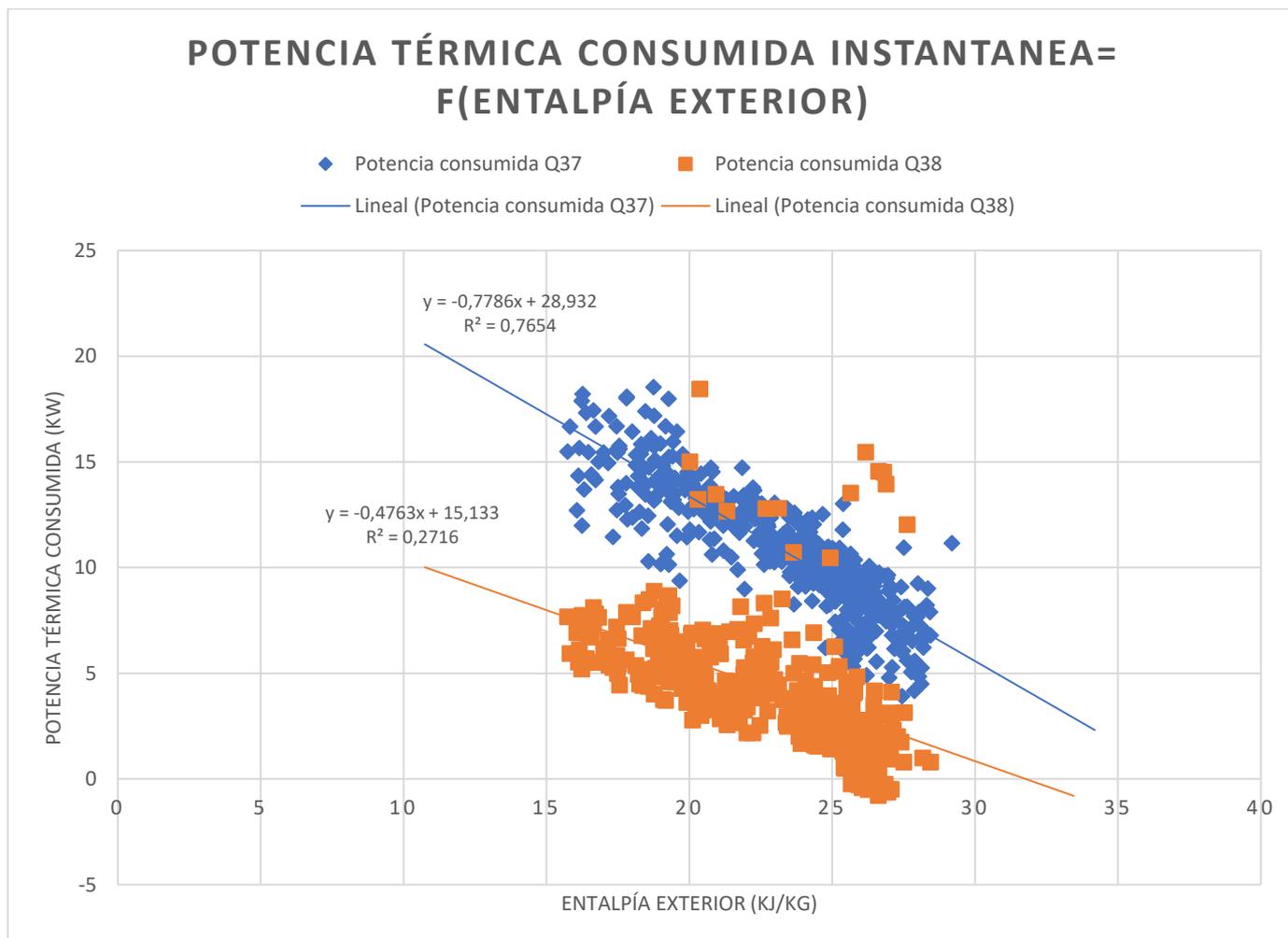


Figura 19: Evolución extrapolada de la potencia térmica consumida en función de la entalpía exterior

Como anomalías, hay dos casos principalmente:

- Algunos puntos del quirófano Q38 salen de la tendencia debido a las aperturas de puertas identificadas en la evolución temporal de las variables
- Potencias negativas: en algunos puntos la entalpía exterior es superior a la entalpía del quirófano

Así como tratado en el apartado anterior, la primera no invalida el análisis. Por otro lado, la segunda tampoco lo invalida, porque estos puntos representan estados transitorios: una vez que la entalpía exterior se iguala a la interior, la tendencia de la UTA es dejar de aportar energía al aire exterior, llevando en seguida el sistema a un consumo cero. Como hay un retardo en este control, tenemos las potencias negativas.

Sin embargo, la tendencia lineal no puede ser calculada directamente con esta nube de puntos, por la R^2 calculada, que no alcanza al menos un valor usual de 0,9 para que sea válida la linealización.

Se grafica entonces los mismos puntos de potencia consumida, pero ahora en función de la temperatura exterior. Esto está basado en el hecho que el recuperador de calor es de tipo sensible, lo que significa que solo intercambia calor sensible (humedad específica constante) y hacer una linealización en función de las temperaturas secas es una idea interesante. Además, ser capaz de estimar directamente a partir de un solo dato de condición exterior la potencia consumida es más robusto dentro de un punto de vista práctico (la entalpía es calculada de forma indirecta a través de dos parámetros, como se ha visto en la Ecuación 7).

Los datos de temperatura seca han sido posteriormente a los ensayos, pero corresponden exactamente a las condiciones exteriores del ensayo: el HCUVa tiene una base de datos anual de las condiciones exteriores.

POTENCIA TÉRMICA CONSUMIDA INSTANTANEA= F(TEMPERATURA EXTERIOR)

- ◆ Potencia consumida Q37
- Potencia consumida Q38
- Lineal (Potencia consumida Q37)
- Lineal (Potencia consumida Q38)

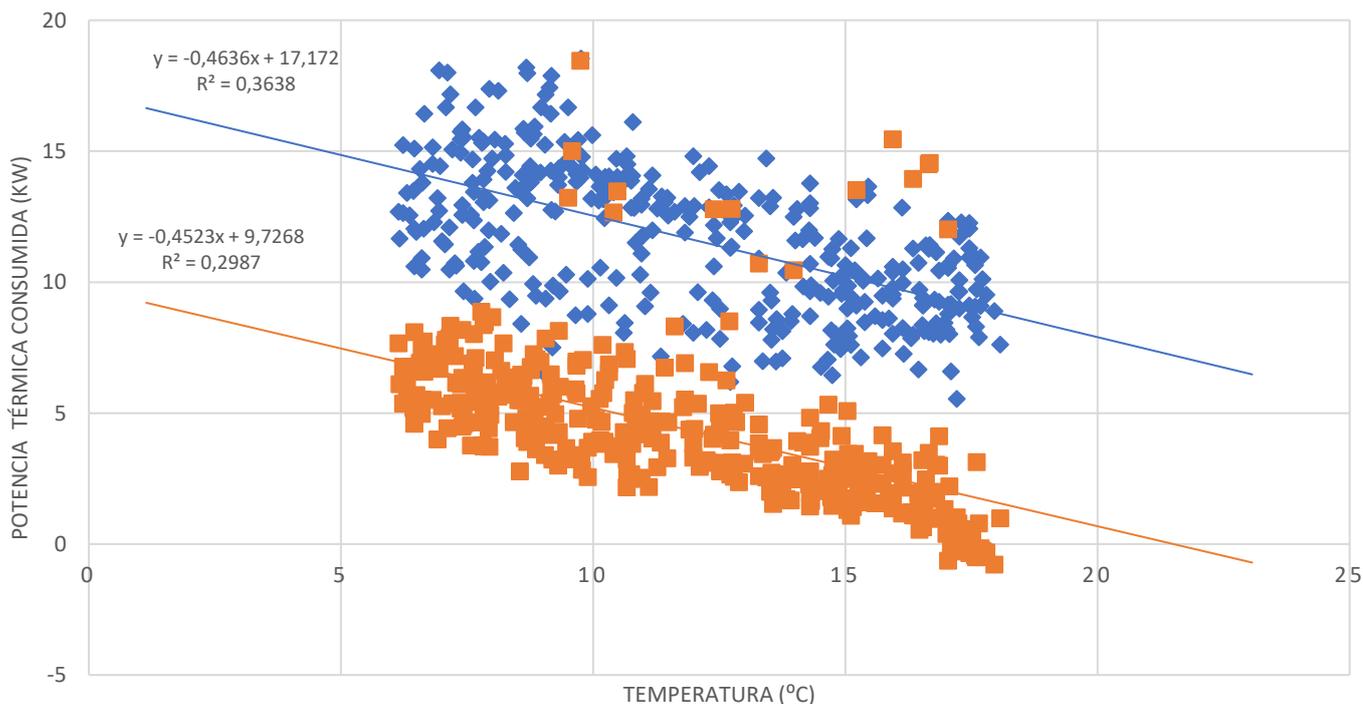


Figura 20: Variación de la potencia térmica consumida en función de la temperatura seca exterior

Como se puede apreciar, el resultado tiene más dispersión todavía que en la Figura 19. Se hace entonces un tercer análisis de datos, reagrupando los datos por intervalos medios de temperatura, a través de un proceso de clasificación. Por ejemplo, los valores de potencia consumida referentes a temperaturas entre 6,5 y 7,5 °C son representadas a 7°C. Para cada intervalo se calcula la media, los valores máximos, mínimos y la desviación estándar de la potencia térmica instantánea. El resultado es el que sigue en la Figura 21 y en Tabla 9:

POTENCIA TÉRMICA CONSUMIDA INSTANTANEA= F(TEMPERATURA EXTERIOR LINEALIZADA)

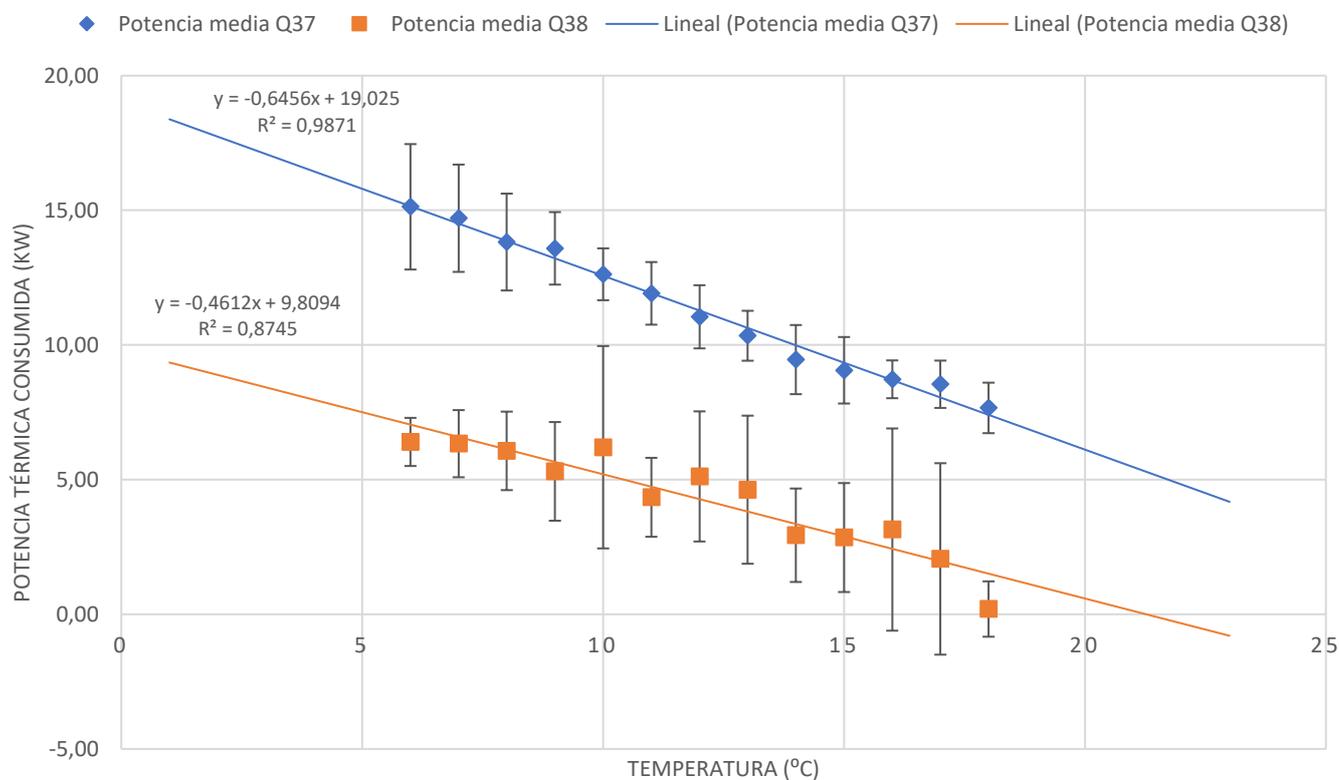


Figura 21: Variación de la potencia consumida media en función de la temperatura en rangos de valores

Tabla 9: Valores medios, máximos, mínimos y de desviación estándar del caso 8, agrupados por rangos de temperatura.

	Temperatura (°C)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Q38	Potencia Media (kW)	6,4	6,3	6,1	5,3	6,2	4,3	5,1	4,6	2,9	2,9	3,2	2,06	0,2
	Potencia Mínima (kW)	5,1	4,0	3,7	2,8	2,6	2,17	2,9	2,4	1,4	1,1	0,6	-0,6	-0,8
	Potencia Máxima (kW)	7,7	8,3	8,9	13,2	18,5	7,33	12,8	12,8	10,5	13,5	15,4	14,6	3,1
	Desviación Estándar	0,9	1,3	1,5	1,8	3,8	1,47	2,4	2,8	1,7	2,0	3,8	3,6	1,0
Q37	Potencia Media (kW)	15,1	14,7	13,8	13,6	12,6	11,9	11,1	10,3	9,4	9,1	8,7	8,5	7,7
	Potencia Mínima (kW)	11,8	10,3	9,4	10,6	10,7	9,0	8,3	8,17	6,61	6,2	7,4	6,7	5,5
	Potencia Máxima (kW)	17,4	18,5	17,2	18,0	14,7	13,8	12,8	11,7	11,3	10,9	10,4	10,1	9,1
	Desviación Estándar	2,3	2,0	1,8	1,4	1,0	1,2	1,17	0,9	1,3	1,2	0,7	0,9	0,9

Con valores de R^2 ascendiendo a 0,9871 y 0,8745 para los niveles de caudal V1 y V2, respectivamente, se puede considerar una linealización válida para el cálculo de la potencia media instantánea consumida en función de la temperatura. Las ecuaciones de las rectas obtenidas son:

Ecuación 9: Potencia térmica consumida sin setback

$$P_{ss} [kW] = -0,6456T + 19,025; T[^\circ C]$$

Ecuación 10: Potencia térmica consumida con setback

$$P_{cs} [kW] = -0,4612T + 9,8094; T[^\circ C]$$

El ahorro energético puede ser calculado directamente por la diferencia entre P_{ss} y P_{cs} :

Ecuación 11: Potencia térmica ahorrada

$$P_a [kW] = -0,1844T + 9,2156; T[^\circ C]$$

La ecuación de la potencia ahorrada es válida para temperaturas más bajas que 21,3°C, temperatura a la cual tenemos el ahorro energético mínimo, teniendo en cuanto que la potencia consumida con el sistema de *setback* sería nulo:

$$\text{Potencia de ahorro mínimo } P_{amin} = 5,293 \text{ kW}$$

Buscando comprobar el error relativo que se obtiene al aplicar la Ecuación 10 a datos reales, se la aplica a los datos extraídos del caso 3, con condiciones exteriores completamente diferentes de las del caso 8, cuando fue obtenida la ecuación. Se calcula la energía térmica real del periodo y se compara con la suma de las potencias térmicas instantáneas estimadas con la ecuación. Los resultados son enseñados en la Tabla 10:

Tabla 10: Aplicación de la Ecuación 10 en datos experimentales del caso 3

Caso 8 (Q38)	Energía térmica real consumida (kWh)	Energía térmica estimada (kWh)	Error de estimación (%)
24/03/2019	78,21	87,84	+12,31%
23/03/2019	104,71	103,68	-0,99%
23/03/2019 – 24/03/2019	182,92	191,52	+4,70%

Se aprecia que en el día 24/03/2019 hay un error de estimación superior a 12%, mientras que en el día 23/03/2019 la recta se ajusta muy bien con un error de -0,99%. En todo el fin de semana, hay un error de estimación de +4,70%, que debe ser llevado en cuenta en la evaluación del impacto económico que esta estrategia puede tener para el hospital. Además, se comprueba que la ecuación se ajusta bien mismo en un rango de temperaturas distinto al que fue calculada, reiterando el buen criterio de la extrapolación.

Esta tendencia lineal con extrapolación va a ser utilizada con más detalle en el próximo subapartado, donde se va a considerar el año meteorológico tipo de Valladolid

a 44,27 kWh por las 60 horas de ensayo. Este valor representa un 11% del ahorro energético, lo que es una cifra considerable y no puede ser despreciada en un cálculo de ahorro económico total.

3.3) Estudio de impacto económico

En este último subapartado de resultados y discusión, se pretende elaborar un planteamiento de cuanto sería el ahorro económico al hospital si se utiliza la estrategia de *setback* durante todo el año en todos los quirófanos. Para esto, se seguirá la siguiente metodología:

I) Utilización del año meteorológico tipo de Valladolid:

- A través del Código Técnico de la Edificación (CTE), en su Documento Base HE de Ahorro de Energía [27], se comprueba la zona climática a la cual pertenece la capital de Castilla y León (D2)
- Descarga de los archivos de datos de todas las zonas climáticas
- Utilización de las ecuaciones que correlacionan la temperatura exterior con la potencia consumida para calcular el ahorro energético total

En esta etapa, se aplica la hipótesis de que solo se va a calcular el ahorro para calefacción, dado que este estudio se ha restringido a las necesidades térmicas durante este período. El cálculo será hecho solo para temperaturas exteriores menores a 21,3°C, que es la temperatura mínima de validez la Ecuación 10. Además, la temperatura mínima que exige la normativa [14] para los quirófanos de tipo A y B es de 22°C, lo que supone que, si la temperatura exterior es mayor que este valor, ya se entra en un régimen de refrigeración.

De inmediato, en esta etapa se calcula el ahorro energético de calefacción máximo teórico anual de un único quirófano en función de la temperatura exterior y dos niveles de caudal (nominal y reducido), considerando el recuperador de calor siempre activo:

Tabla 12: Ahorro energético máximo teórico de calefacción para un quirófano

Consumo sin <i>setback</i> (kWh)	Consumo con <i>setback</i> (kWh)	Ahorro energético estimado (kWh)
90554	37016	53538

II) Determinación del número de horas totales por año de no ocupación para todos los quirófanos del HCUVa:

Normalmente, los quirófanos del HCUVa se utilizan de lunes a viernes (20 días laborables al mes aproximadamente), entre 4,5 y 7,5 horas diarias. Por lo tanto, se pueden considerar tres escenarios prácticos y posibles para la utilización de la estrategia de *setback* sin comprometer el funcionamiento normal del hospital:

- Solo en los fines de semana (desde el viernes a las 18h hasta el lunes a las 06h)
- Entre semana todos los días desde las 18h hasta las 06h del día siguiente más los fines de semana como en a): *setback* de 12h;
- Entre semana todos los días desde las 17h hasta las 09h del día siguiente más los fines de semana como en a): *setback* de 16h;
- Siempre y cuando tengamos un periodo de no-ocupación superior a 20 min

III) Aplicación de las tarifa eléctrica y energética pagadas por hospital en función de su consumo anual:

Aquí se traduce la conversión del ahorro energético a ahorro económico aplicando las tarifa eléctrica y térmica vigentes pagadas por el HCUVa.

El HCUVa tiene la tarifa eléctrica 6.1A y la tarifa térmica (gas natural) 3.5. Pero para facilitar los cálculos y tener una idea global del ahorro, se calculan las tarifas medias por kWh consumido a partir de datos facilitados por el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa. Se dividen las facturas eléctricas y térmicas (gas natural) anuales por sus consumos correspondientes:

Tabla 13: Tarifa eléctrica y térmica medias para el HCUVa

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

IV) Estimación de la inversión necesaria para implementar la estrategia de *setback* en la climatización:

Si se consideran las opciones A, B o C en el grado de utilización del sistema de ahorro energético, el coste de inversión puede ser considerado nulo, ya que la programación del cambio de consigna de caudal sería efectuada por el propio personal técnico del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa.

Con un control a tres turnos de las instalaciones del hospital, si hay la necesidad de utilizar el bloque quirúrgico por una urgencia, se cambia rápidamente la consigna a caudal nominal. En un periodo de orden del minuto desde el cambio de consigna, el quirófano ya estaría listo para recibir el equipo médico y el paciente, sin problemas de contaminación por cuenta de la sobrepresión.

Para lograr hacer el control con la opción D, una opción sería instalar un programa automático para identificar una no-ocupación por un periodo superior a 20 minutos, por ejemplo. Con el mismo detector, cuando se entra en la sala, se restauraría instantáneamente el caudal a condiciones nominales. Esto supondría un coste de implementación adicional, relacionado con la puesta a punto del sistema de detección. Esta opción no será objeto de análisis en este trabajo.

V) Comparación con los consumos actuales del hospital:

Haciendo los cálculos previamente descritos para las opciones A, B y C, y considerando que la tarifa eléctrica se aplica para los ahorros de los ventiladores, que la tarifa de gas natural se aplica para el ahorro energético de las UTA's y que tenemos dieciocho quirófanos en la parte estudiada, tenemos los siguientes resultados recopilados en la Tabla 14:

Tabla 14: Estudio económico con los casos de tiempo de consumo A, B y C

	Caso A – Fin de semanas	Caso B – setback de 12h	Caso C – setback de 16h
Tiempo asociado (h)	3127	5368	6298
Consumo sin setback (kWh)	32675,64	62448,92	74853,99
Consumo con setback (kWh)	13374,42	24312,43	29657,44
Ahorro energético (kWh)	19301,22	38136,49	45196,55
Ahorro energético (€)	760,47	1502,58	1780,74
Ahorro eléctrico (kWh)	2814,3	4831,2	5668,2
Ahorro eléctrico (€)	318,3	546,41	641,07
Ahorro/quirófano (kWh)	22115,52	42967,69	50864,75
Ahorro/quirófano (€)	1078,77	2048,99	2421,82
Ahorro total (MWh)			
	398,08	773,42	915,57
Ahorro/quirófano (€)			
	19.417,78	36.881,75	43.592,72

De las tres hipótesis, la C, con *setback* de 16h, es la que más aporta ahorros energéticos y económicos estimados al hospital, del orden de 900 MWh y 40k€, para los dieciocho quirófanos de la nueva zona de urgencias del HCUVa. Este orden de magnitud de ahorros sería compatible, por ejemplo, con lo presentado por Tschudi [16], que estima economizar 1250 MWh con la utilización de la estrategia nocturna, lo que representa 138k\$, suponiendo un coste de electricidad de 0,11\$/kWh.

Por otro lado, a fin de verificar de factibilidad de la implantación del sistema por el número de horas disponible, a partir de las horas de funcionamiento reales de dos quirófanos del HCUVa (el Q39 de tipo A y el Q38 de tipo B), se puede comparar si el número de horas propuestas es coherente con el número real de horas de no utilización de los quirófanos (Figura 23). Con la estrategia propuesta C, el periodo de *setback* correspondería a casi 72% del año, mientras que los dos quirófanos analizados tuvieron más de 85% de tiempo ocioso en el año de 2018. Sabiendo también que todavía hay el servicio de refrigeración a implementar, se afirma la coherencia de los cálculos efectuados para los quirófanos del HCUVa.

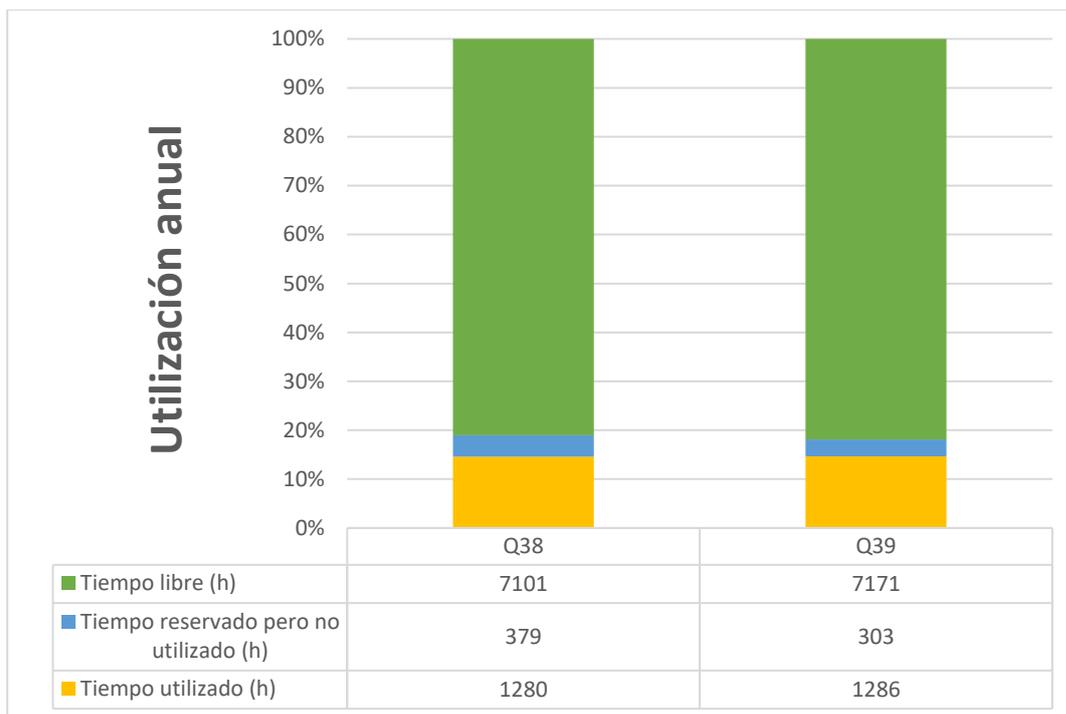


Figura 23: Desglose anual de utilización temporal de dos quirófanos del HCUVa. Fuente: Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa

Es importante reiterar todas las condiciones limitantes asumidas para llegar a estos resultados:

- a) **Cálculos hechos solo para el servicio calefacción;**
- b) **Extrapolación de los datos a través de las ecuaciones Ecuación 9 y Ecuación 10;**
- c) **Cálculo extrapolado también a los quirófanos de tipo A (flujo laminar): según los datos indicados en [28], se puede asumir una relación casi proporcional entre las potencias consumidas entre los dos tipos de quirófanos a condición de caudales de impulsión iguales. Además, la información proveniente del grupo de investigación corrobora esta hipótesis;**
- d) **Utilización del año meteorológico tipo de Valladolid: las condiciones reales varían a cada año.**

A nivel macro del HCUVa: con base a 2018, actualmente el hospital tiene un consumo eléctrico anual de 15.217.633 kWh, que representa un coste de 1.721.361 €, y un consumo térmico anual de 17.435.402 kWh, que representa un coste de 687.421 €. Un ahorro de la magnitud que se estima en este trabajo representaría entonces un **1,90%** del gasto anual del hospital que podría ser reinvertido en otros proyectos o aplicaciones.

Aunque parezca una pequeña aportación, haciendo un cálculo por unidad de superficie y considerando las superficies totales del hospital y de los dieciocho quirófanos analizados de 73400 m² y 831 m² se llega a una conclusión interesante. Mientras que el coste energético del HCUVa asciende a 32,82€/m², el ahorro estimado en este trabajo sería de **54,46€/m²**. Extendiendo también para una aplicación también para refrigeración, se puede considerar que se trata de un ahorro importante respecto a la simplicidad de su aplicación.



4) CONCLUSIONES

Con lo presentado a lo largo de este Trabajo de Fin de Máster, se puede afirmar que los objetivos, tanto el global cuanto los específicos, han sido cumplidos. De manera detallada, se concluye que:

- La estrategia de *setback* en la ventilación es válida si consideramos el criterio de sobrepresión. Aunque no se garantiza en todos los instantes la sobrepresión de 20 Pa demandada por el HCUVa, los valores oscilan en torno a esta consigna y son suficientemente importantes para considerar que la sobrepresión se mantiene en la sala con la utilización de la estrategia;
- Se ha obtenido una economía de 420 kWh en energía térmica en un periodo de prueba de 60h en las condiciones exteriores del periodo;
- La potencia eléctrica, representada en su mayor parte por los variadores de frecuencia de los ventiladores, no es despreciable frente al consumo térmico del acondicionamiento del aire, porque representa un 11% del valor obtenido en ensayo del caso 8;
- Se puede linealizar la potencia térmica consumida media instantánea en función de la temperatura seca exterior. Para tal, los puntos de la nube han sido clasificados en rango de valores de un grado centígrado y se ha tomado la media de los valores de potencia térmica instantánea consumida en cada intervalo;
- Al aplicar la ecuación linealizada de los consumos térmicos con *setback* en otros datos experimentales, se ha observado un error en la estimación de la energía térmica consumida de 4,7%;
- La potencia eléctrica es proporcional al caudal de impulsión. Se observan dos niveles para las condiciones del estudio: 1,1 kW para caudal nominal y 0,2 kW para caudal reducido;
- Para un año meteorológico tipo de la ciudad de Valladolid, el ahorro energético máximo teórico de un quirófano para condiciones de calefacción asciende a 53,5 MWh;
- En condiciones simuladas, el ahorro energético de más impacto para el HCUVa sería la utilización de una estrategia de *setback* de 16h diarias, consiguiendo un ahorro estimado en 915 MWh de calefacción en los dieciocho quirófanos;
- El impacto económico de la simulación previamente mencionada sería del orden de 44k€, considerando las tarifas eléctrica y térmica pagadas por el HCUVa;
- Siguiendo la misma metodología utilizada en este estudio, la estrategia de *setback* podría ser aplicada en otros hospitales. En los que disponen de las mismas facilidades de control del acondicionamiento de aire, el coste de implementación también sería nula. De esta forma, el impacto económico de una utilización a más larga escala sería importante dentro de la lógica de ahorro energético global.

Dichas conclusiones también abren margen para el señalamiento de aspectos de mejora para posibles aplicaciones, así como de futuras vías de investigación.

Por parte de los aspectos de mejora, dos observaciones se destacan:

- La toma de datos es una parte crucial para la obtención de resultados robustos y coherentes. La saturación de datos en el almacenamiento y el error en la

selección de la sonda en el quirófano Q37, aunque no hayan interferido directamente los resultados, han perjudicado el ritmo de avance en el análisis y en la discusión;

- Las ecuaciones linealizadas obtenidas pueden ser mejor ajustadas con una mayor cantidad de datos. En este estudio, debido a la limitación de realización de los ensayos en los fines de semana, la cantidad de datos disponibles ha sido penalizada.

Por parte de los trabajos futuros, se plantean las siguientes vías de avance:

- Estudio de ahorros térmicos con distintos niveles de caudal para obtener datos intermediarios entre los dos niveles previamente estudiados;
- Estudio de ahorros térmicos de refrigeración: planteamiento de toma de datos durante un año completo;
- Comparación de un año meteorológico real con el año ideal propuesto por el año meteorológico tipo;
- Comparación de ahorros térmicos en un quirófano de flujo laminar con uno de flujo turbulento;
- Desarrollo estadístico del mínimo ahorro térmico que se puede conseguir utilizando la estrategia de *setback* en la ventilación para condiciones específicas de utilización;
- Estudio de la hipótesis D para el tiempo de utilización de la estrategia de *setback*, intentando optimizar lo máximo posible el tiempo de no-ocupación del quirófano;
- Estudio de ahorros térmicos en el Hospital Río Ortega, que no tiene sistema de recuperación de calor en la ventilación en los quirófanos. En el actual estudio, el factor de recuperación de calor no es interesante porque el recuperador de calor ya está instalado y, aunque no lo utilicemos, él estará físicamente allí, con el circuito de las baterías imponiendo una pérdida de carga. Eliminado esta variable, se podría plantear el ahorro térmico producido exclusivamente por la estrategia de *setback* en la ventilación.

Finalmente, a la luz de las interesantes conclusiones de este trabajo y de los posibles trabajos futuros, se proseguirá a la redacción de una publicación científica junto al grupo de investigación, cuya base será este Trabajo de Fin de Máster.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. García-Sanz-Calcedo, A. Al-Kassir, and T. Yusaf, "Economic and Environmental Impact of Energy Saving in Healthcare Buildings," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 3, p. 440, Mar. 2018.
- [2] ATECYR, *Guía Técnica de ahorro y recuperación de energía en instalaciones de climatización*. 2016.
- [3] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, J. F. Coronel, and I. R. Maestre, "A review of HVAC systems requirements in building energy regulations," *Energy Build.*, vol. 43, no. 2–3, pp. 255–268, Feb. 2011.
- [4] E. y T. Ministerio de Industria, "Versión Consolidada del Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones Térmicas en los edificios," *Bol. Of. del estado*, pp. 1–87, 2013.
- [5] A. González González, J. García-Sanz-Calcedo, and D. Rodríguez Salgado, "Evaluation of Energy Consumption in German Hospitals: Benchmarking in the Public Sector," *Energies*, vol. 11, no. 9, p. 2279, Aug. 2018.
- [6] G. Sánchez-Barroso Moreno, J. García-Sanz Calcedo, A. G. González, and D. R. Salgado, "Sustainable solutions for thermal energy saving in hospital operating theatres," *E3S Web Conf.*, vol. 85, p. 01002, Feb. 2019.
- [7] P. Pastor Pérez, *Documentos Técnicos de Instalaciones en la Edificación DTIE 1.06: Instalación de climatización en hospitales*. Madrid: ATECYR, 2012.
- [8] Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, "Guía de Ahorro y Eficiencia Energética en Hospitales," p. 65, 2012.
- [9] J. García-Sanz-Calcedo, A. Al-Kassir, and T. Yusaf, "Economic and Environmental Impact of Energy Saving in Healthcare Buildings," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 3, p. 440, Mar. 2018.
- [10] F. Castro Ruiz, J. F. San José Alonso, J. M. Villafruela Espina, and Á. Guijarro Rubio, *Manual de diseño de la climatización y ventilación de quirófanos y habitaciones en centros hospitalarios en Castilla y León*. 2011.
- [11] M. Porowski, "Energy optimization of HVAC system from a holistic perspective: Operating theater application," *Energy Convers. Manag.*, vol. 182, pp. 461–496, Feb. 2019.
- [12] AENOR, "UNE-EN ISO 14644-4: Salas limpias y locales anexos controlados. Parte 4: Diseño, construcción y puesta en servicio." 2001.
- [13] J. García-Sanz-Calcedo, G. S.-B. Moreno, and A. G. González, "Influence of Air Pressure on Unidirectional Flow Operating Theatres," in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Computer Science and Intelligent Control - ISCSIC '18*, 2018, pp. 1–5.
- [14] AENOR, "UNE 100713 - Instalaciones de acondicionamiento de aire en hospitales." AENOR, 2005.
- [15] J. E. Woods, G. L. Reynolds, G. M. Montag, D. T. Braymen, and R. W. Rasmussen, "Ventilation Requirements in Hospital Operating Rooms - Part II: Energy and Economic Implications.," *ASHRAE Trans.*, vol. 92, no. pt 2A, pp. 427–449, 1986.
- [16] W. Tschudi, D. Faulkner, and A. Hebert, "Energy efficiency strategies for cleanrooms without compromising environmental conditions," *ASHRAE Trans.*, vol. 111 PART 2, pp. 637–645, 2005.

- [17] Y. H. Yau and W. K. Ng, "A comparison study on energy savings and fungus growth control using heat recovery devices in a modern tropical operating theatre," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 4, pp. 1850–1860, Apr. 2011.
- [18] F. J. Wang, T. B. Chang, C. M. Lai, and Z. Y. Liu, "Performance improvement of airflow distribution and contamination control for an unoccupied operating room," 2012.
- [19] T. Gormley *et al.*, "Cost-benefit analysis of different air change rates in an operating room environment," *Am. J. Infect. Control*, vol. 45, no. 12, pp. 1318–1323, Dec. 2017.
- [20] C. Zhuang, S. Wang, and K. Shan, "Adaptive full-range decoupled ventilation strategy and air-conditioning systems for cleanrooms and buildings requiring strict humidity control and their performance evaluation," *Energy*, vol. 168, pp. 883–896, Feb. 2019.
- [21] J. M. Villafruela, J. F. San José, F. Castro, and A. Zarzuelo, "Airflow patterns through a sliding door during opening and foot traffic in operating rooms.," *Elsevier (Building Environ.)*, pp. 109:190–198, 2016.
- [22] I. Lozano Gabarre, "Estudio para determinar la contaminación provocada por la apertura de puertas tipo corredera y batiente, en quirófanos con difusión de aire turbulenta y laminar," 2017.
- [23] A. S. H. Rae, B. R. W. Besant, P. Eng, C. J. Simonson, and D. Ph, "Air-To-Air Energy Recovery," no. May, 2000.
- [24] C. Zeng, S. Liu, and A. Shukla, "A review on the air-to-air heat and mass exchanger technologies for building applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. June 2016, pp. 753–774, 2017.
- [25] C. Love, "Operating Room HVAC Setback Strategies," *ASHRAE Monogr.*, 2011.
- [26] R. Lazzarin and L. Nalini, *Air Humidification. Technical, health and energy aspects*. Carel, 2004.
- [27] CTE, "Documento Básico HE. Ahorro de energía," 2017.
- [28] M. Alsved *et al.*, "Temperature-controlled airflow ventilation in operating rooms compared with laminar airflow and turbulent mixed airflow," *J. Hosp. Infect.*, vol. 98, no. 2, pp. 181–190, Feb. 2018.

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1: Consumos energéticos por metro cuadrado de los hospitales de diferentes países. Fuente: [7].....	2
Figura 2: Reparto usual del consumo energético en hospitales.....	3
Figura 3: Esquema de recuperación de calor runaround loop utilizada en el HCU. Fuente: [23].....	9
Figura 4: Imagen de satélite del Hospital Clínico Universitario de Valladolid. Fuente: Google Maps	13
Figura 5: Zona quirúrgica de la ampliación del HCUVa. Fuente: Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa	14
Figura 6: Zona elegida para estudio. Quirófanos Q37 y 38. Fuente: Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa	15
Figura 7: Quirófano Q37, de tipo A	16
Figura 8: Zona de preparación entre los quirófanos Q37 y Q38. a) Lavamanos; b) Stock productos quirúrgicos	16
Figura 9: UTA del quirófano Q37	17
Figura 10: Instalación del sistema de recuperador de calor runaround loop de la UTA del Q37	18
Figura 11: SCADA de la climatización de los quirófanos. Fuente: Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa	19
Figura 12: Captura de pantalla de una plantilla para el tratamiento de los datos	22
Figura 13: Respuesta temporal de la presión interior para el caso 8 - Día 1.....	25
Figura 14: Respuesta temporal de la presión interior para el caso 8 – Día 2. No conformidades.....	27
Figura 15: Esquema de cascada de sobrepresión en los quirófanos del HCUVa	27
Figura 16: Respuesta temporal de la presión interior para el caso 3- Día 2. No conformidades.....	28
Figura 17: Ahorro térmico en todo el periodo analizado del caso 8	29
Figura 18: Comparación de potencias térmicas consumidas en función de la presencia o no del recuperador de calor	30
Figura 19: Evolución extrapolada de la potencia térmica consumida en función de la entalpía exterior	31
Figura 20: Variación de la potencia térmica consumida en función de la temperatura seca exterior	32
Figura 21: Variación de la potencia consumida media en función de la temperatura en rangos de valores	33
Figura 22: Potencia eléctrica de la climatizadora del Q38 en función del caudal de impulsión.....	35
Figura 23: Desglose anual de utilización temporal de dos quirófanos del HCUVa. Fuente: Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del HCUVa	39



Tabla 1: Funcionalidades de los quirófanos y acciones correspondiente para realizarlas 4

Tabla 2: Factores de actuación en la ventilación 10

Tabla 3: Parámetros controlados en los ensayos 20

Tabla 4: Resumen de los casos de análisis en el hospital 21

Tabla 5: Casos de ensayos finales 23

Tabla 6: Análisis estadístico de la variación de presión interna de los quirófanos estudiados en el primer día de ensayos del caso 8 26

Tabla 7: Análisis estadístico de la variación de presión interna de los quirófanos estudiados en el segundo día de ensayos del caso 8 26

Tabla 8: Análisis estadístico de la variación de presión interna del quirófano Q38 en el segundo día de ensayos del caso 3 28

Tabla 9: Valores medios, máximos, mínimos y de desviación estándar del caso 8, agrupados por rangos de temperatura. 33

Tabla 10: Aplicación de la Ecuación 10 en datos experimentales del caso 3 34

Tabla 11: Potencia eléctrica consumida en función de los niveles de caudal 35

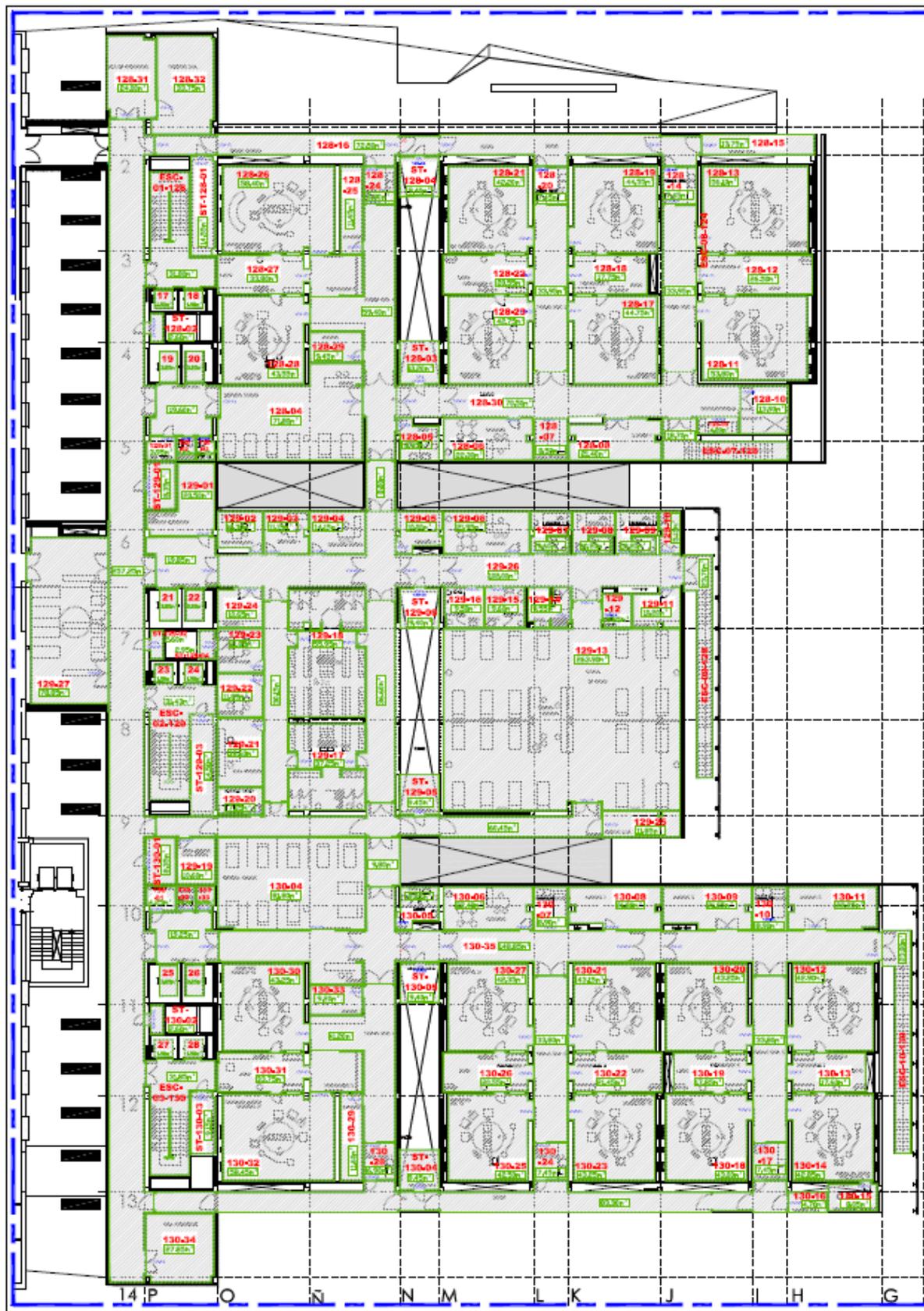
Tabla 12: Ahorro energético máximo teórico de calefacción para un quirófano 36

Tabla 13: Tarifa eléctrica y térmica medias para el HCUVa 37

Tabla 14: Estudio económico con los casos de tiempo de consumo A, B y C 38

ANEXOS

A) Plano de la primera planta de las nuevas urgencias del HCUVa



B) Ficha técnica de los quirófanos Q37 y Q38

QUIRÓFANO 37						
Tipo de sala		QUIRÓFANO CONVENCIONAL				
Clase de sala (ISO)		ISO 7	Superficie (m ²)		-	
Estado de la sala		En Reposo	Altura (m)		-	
Fecha de realización		04-05-18	Volumen (m ³)		123,5	
PARÁMETRO		REFERENCIA	VALOR MEDIO	CONFORME		
ENSAYOS AMBIENTALES						
Partículas 0,5 µm ambiente		partículas/m ³	352.000	671	SI (< ISO 6)	
Partículas 5 µm ambiente		partículas/m ³	2.930	0	SI (< ISO 6)	
Temperatura	min	°C	22	21,5	Valor informativo	
	max		26			
Humedad relativa	min	%	45	29,7	Valor informativo	
	max		55			
Ruido ambiental		dBA	40	42,3	Valor informativo	
ENSAYOS RELATIVOS A LA INSTALACIÓN						
Presión diferencial	Quirófano – Pasillo Limpio		Pa	6	23,9	SI
	Quirófano – Lavamanos – Pasillo Limpio				9,3 / 16,7	
Caudal de impulsión	Difusor 1		m ³ /h	No aplica	693	Flujo uniforme entre difusores
	Difusor 2				669	
	Difusor 3				585	
	Difusor 4				474	
	TOTAL				-	
Factor de corrección		-				
Instrumento de medida		Balómetro				
Tasa de renovación		Ren/h	15	19,6	SI	
Caudal de extracción		m ³ /h	Inferior al caudal de impulsión	1.299	Valor informativo	
ENSAYO MICROBIOLÓGICO						
Aerobios mesófilos en ambiente	BAC 4	ufc/m ³	Suma <100	0	0	SI
Hongos en ambiente	HAC 4			0		
Hongos oportunistas en ambiente (<i>Aspergillus sp.</i> , <i>Rhizopus sp.</i> , <i>Mucor sp.</i>)	HAC 4	ufc/m ³	AUSENCIA	Ausencia	SI	
Aerobios mesófilos en impulsión	BIC 4	ufc/m ³	Suma <100	3	3	SI
Hongos en impulsión	HIC 4			0		
Hongos oportunistas en impulsión (<i>Aspergillus sp.</i> , <i>Rhizopus sp.</i> , <i>Mucor sp.</i>)	HIC 4	ufc/m ³	AUSENCIA	Ausencia	SI	

QUIRÓFANO 38						
Tipo de sala		QUIRÓFANO CONVENCIONAL				
Clase de sala (ISO)	ISO 7	Superficie (m ²)		-		
Estado de la sala	En Reposo	Altura (m)		-		
Fecha de realización	04-05-18	Volumen (m ³)		124,5		
PARÁMETRO		REFERENCIA	VALOR MEDIO	CONFORME		
ENSAYOS AMBIENTALES						
Partículas 0,5 µm ambiente		partículas/m ³	352.000	6.489	SI (ISO 6)	
Partículas 5 µm ambiente		partículas/m ³	2.930	633	SI (ISO 7)	
Temperatura	min	°C	22	21,4	Valor informativo	
	max		28			
Humedad relativa	min	%	45	31,4	Valor informativo	
	max		55			
Ruido ambiental		dBA	40	43,1	Valor informativo	
ENSAYOS RELATIVOS A LA INSTALACIÓN						
Presión diferencial	Quirófano – Pasillo Limpio		Pa	6	19,9	SI
	Quirófano – Lavamanos – Pasillo Limpio				9,6 / 16,7	
Caudal de impulsión	Difusor 1		m ³ /h	No aplica	498	Flujo uniforme entre difusores
	Difusor 2				528	
	Difusor 3				725	
	Difusor 4				779	
	TOTAL				-	
Factor de corrección		-				
Instrumento de medida		Balómetro				
Tasa de renovación		Ren/h	15	19,6	SI	
Caudal de extracción		m ³ /h	Inferior al caudal de impulsión	1.299	Valor informativo	
ENSAYO MICROBIOLÓGICO						
Aerobios mesófilos en ambiente	BAC 5	ufc/m ³	Suma <100	3	3	SI
Hongos en ambiente	HAC 5			0		
Hongos oportunistas en ambiente (<i>Aspergillus sp.</i> , <i>Rhizopus sp.</i> , <i>Mucor sp.</i>)	HAC 5	ufc/m ³	AUSENCIA	Ausencia		SI
Aerobios mesófilos en impulsión	BIC 5	ufc/m ³	Suma <100	0	0	SI
Hongos en impulsión	HIC 5			0		
Hongos oportunistas en impulsión (<i>Aspergillus sp.</i> , <i>Rhizopus sp.</i> , <i>Mucor sp.</i>)	HIC 5	ufc/m ³	AUSENCIA	Ausencia		SI