



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Estudio de la viabilidad y el potencial de
ahorro energético del control de la ventilación
en la climatización de quirófanos**

Autor:

López Pérez, Héctor

Tutor:

**Tejero González, Ana
Ingeniería energética y
fluidomecánica**

Valladolid, Noviembre 2021.

AGRADECIMIENTOS

Hace 4 años empecé esta carrera universitaria y, el camino, aunque haya estado lleno de obstáculos, ha merecido la pena. Finalmente, he completado cada uno de los retos a los que me he enfrentado y puedo afirmar con orgullo que lo hice siempre dando el máximo esfuerzo.

Ahora que me encuentro al final de este recorrido, me gustaría agradecer especialmente a mis padres y amigos que estuvieran ahí en todo momento, siempre animándome y confiando en que lo conseguiría, por difícil que pareciera en ocasiones.

Por otro lado, me gustaría agradecer a mi tutora Ana todo el esfuerzo y dedicación para ayudarme a realizar este trabajo. Nos ha llevado mucho tiempo, ¡pero lo hemos conseguido!

También me gustaría agradecer a mis amigos Fernando y César todos y cada uno de los momentos que hemos pasado estudiando juntos, las risas y, sobre todo, las ganas que me habéis transmitido de seguir dando el máximo cuando las cosas salían mal.

Y, por último, al apoyo del Ente Regional de la Energía de Castilla y León, que ha hecho posible este trabajo a través del proyecto: "Alternativas de Recuperadores de Calor en el Diseño de Edificios Próximo a Cero Energía (nZEB) y rehabilitación de edificios" [Ref.: EREN_2019_L2_UVA].

Resumen

La eficiencia energética y el aprovechamiento de los recursos se han convertido en pilares fundamentales del progreso tecnológicamente. Concretamente, en el campo de la climatización se están produciendo grandes avances y por ello, en el presente trabajo de fin de grado, se va a exponer el funcionamiento de la estrategia de *setback* con la que se reduce la demanda energética en hospitales, espacios de elevado consumo.

Siempre teniendo en cuenta los criterios de higiene y salubridad, se ha procedido al estudio empírico de esta estrategia en quirófanos del Hospital Universitario Pío del Río Hortega de la ciudad de Valladolid. Finalmente, a partir de las condiciones de un año climático tipo se ha procedido a hacer extrapolaciones sobre ahorros de electricidad, gas natural y reducción de emisiones.

Palabras clave: Ventilación controlada, quirófanos, eficiencia energética, climatización, unidad de tratamiento de aire

Abstract

Energy efficiency and the good use of resources have become fundamental pillars of the technologic progress. Focusing on air-conditioning systems, there has been great breakthroughs and that is why this final degree project is going explain the functioning of the setback strategy, which reduces the energy requirement in hospitals, high consuming places.

Always maintaining the sanitary and health condition standards, an empirical study has been developed to evaluate the effect of the mentioned strategy in the Hospital Universitario Pío del Río Hortega. Finally, the electricity and gas consumption, as well as the CO₂ emissions, have been estimated through the typical meteorological year data.

Keywords: Setback, operating rooms, energy efficiency, heat ventilation and air conditioning, air handling unit

ÍNDICE

Introducción	11
Problemática energética actual	11
Caracterización del consumo energético en la edificación.....	12
Consumo energético en hospitales.....	16
Medidas de eficiencia energética en hospitales	17
Objetivos	19
Estado de la técnica	21
Criterios de seguridad en instalaciones hospitalarias. Quirófanos.....	21
Evaluación de riesgos por la implantación de estrategias de mejora en la eficiencia energética	22
Caso de estudio y metodología	25
Condiciones exteriores.....	25
Condiciones requeridas en el interior del quirófano	25
Unidad de tratamiento de aire (UTA)	26
Hipótesis simplificadoras.....	27
Gas ideal.....	27
Aire impulsado completamente del exterior.....	28
Procedimiento de toma de datos	28
Parámetros medidos.....	28
Parámetros controlados	29
Cálculo de las variables psicrométricas.....	30
Presión total.....	30
Entalpía específica	30
Humedad específica.....	30
Presión de vapor de saturación	30
Presión de vapor	31
Volumen específico.....	31
Cálculo de ahorros energéticos.....	32
Deshumidificación incontrolada	33
Ahorro térmico	35
Ahorro eléctrico	36
Emisiones de CO ₂	37
Resultados y discusión	39
Comprobación de los criterios de seguridad	39

Cálculos y resultados.....	42
Ahorros de energía	42
Reducción de emisiones de CO ₂	44
Estimación anual de ahorro	46
Extrapolación a todo el hospital	47
Conclusiones	53
Conclusión general.....	53
Conclusiones específicas.....	53
Bibliografía	55
Anexos.....	57
Anexo : Sobrepresión en cada experimento.....	59

Índice de gráficos

Gráfico 1: Emisiones de CO2 y su previsión hasta el 2050 en Estados Unidos.	11
Gráfico 2: Consumo energético y previsión hasta 2050 en Estados Unidos. Obtenido de Annual Energy Outlook 2021 (AEO2021)	11
Gráfico 3: Consumo anual por calefacción en España. Elaboración propia. Fuente de datos BPIE	12
Gráfico 4: Etiqueta medioambiental de los edificios de nueva construcción (Ministerio para la transición ecológica, 2019)	13
Gráfico 5: Evolución del etiquetado medioambiental de los edificios de nueva construcción (Ministerio para la transición ecológica, 2019)	14
Gráfico 6: Etiquetas de calificación ecológica del parque edificatorio nacional (Ministerio para la transición ecológica, 2019)	15
Gráfico 7: Evolución de la calidad ecológica del parque edificatorio español (Ministerio para	15
Gráfico 8: Consumo energético en hospitales (Fundación de la Energía de la	16
Gráfico 9: Comportamiento de los gases que componen el aire frente a la presión	27
Gráfico 10: Comportamiento del nitrógeno frente a la presión para ciertas temperaturas ...	28
Gráfico 11: Quirófano 1 en enero del 2020. Consultar el resto de fechas en el anexo 1.	41
Gráfico 12: Quirófano 8 en enero del 2020. Consultar el resto de fechas en el anexo 1.	41
Gráfico 13: Comparativa de la ocupación en quirófanos del modelo teórico y el real.....	48

Índice de tablas

Tabla 1: Comparativa de consumos y ahorros energéticos de las diferentes etiquetas de calidad medioambiental (Comunitat Valenciana, 2021).....	13
Tabla 2: Calidad del aire en quirófanos.....	21
Tabla 3: Requerimientos de ventilación en hospitales	22
Tabla 4: Características de los principales tipos de intercambiadores.....	23
Tabla 5: Condiciones termo-higrométricas en hospitales y quirófanos.....	26
Tabla 6: Parámetros medidos	28
Tabla 7: Parámetros controlados	29
Tabla 8: COP de la enfriadora para los diferentes estados de carga (Rey Martínez et al., 2020).....	37
Tabla 9: Conformidad de la estrategia de setback.....	40
Tabla 10: Ahorros térmicos y eléctricos.....	42
Tabla 11: Comparativa de las emisiones de CO ₂ para diferentes fuentes primarias de energía, tanto para energía térmica como eléctrica (IDAE, 2012).....	44
Tabla 12: Recopilación de las emisiones reducidas en los diferentes quirófanos	45
Tabla 13: Estimación del ahorro anual con la estrategia de setback.....	46
Tabla 14: Ocupación de los quirófanos del hospital universitario Pío del Río Hortega	48
Tabla 15: Ahorros anuales por quirófanos.....	50
Tabla 16: Gastos energéticos y económicos por gas natural en 2019 en el hospital Río Hortega.....	51
Tabla 17: Gastos energéticos y económicos por electricidad en 2019 en el hospital Río Hortega.....	51

Índice de figuras

Figura 1: Comparativa de los rendimientos para los diferentes tipos de calderas (Ministerio de	18
Figura 2: Interfaz de monitorización de las UTAs de los quirófanos.....	26
Figura 3: Diagrama psicométrico de la ciudad de Valladolid	33
Figura 4: Capa límite térmica	34
Figura 5: Comportamiento real del proceso debido a la capa límite térmica.....	35

Introducción

Problemática energética actual

La actual preocupación por la falta de sostenibilidad en el consumo energético nos lleva a la búsqueda constante de modelos más eficientes que nos permitan un mejor aprovechamiento de los recursos. Para mostrar la evolución del consumo actual de energía, sus fuentes de obtención y su previsión en las próximas 3 décadas, se presentan a continuación dos gráficos extraídos del informe anual de energía del departamento de energía de Estados Unidos (U.S. Energy Information Administration, 2021).

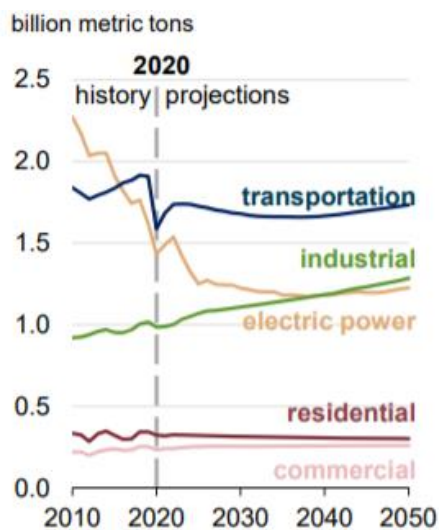


Gráfico 1: Consumo energético y previsión hasta 2050 en Estados Unidos. Obtenido de Annual Energy Outlook 2021 (AEO2021)

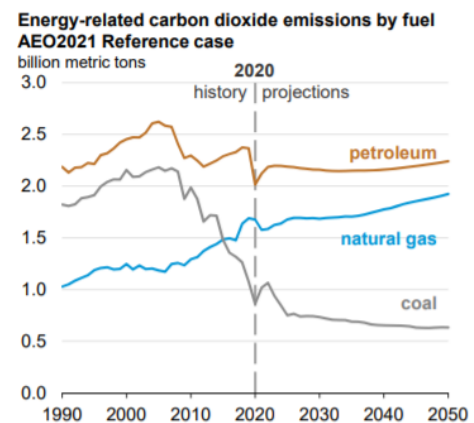


Gráfico 2: Emisiones de CO₂ y su previsión hasta el 2050 en Estados Unidos. Obtenido de Annual Energy Outlook 2021 (AEO2021)

Como se puede apreciar en el Gráfico 1 y el Gráfico 2, las emisiones de CO₂ están consiguiendo estabilizarse debido principalmente a la reducción generalizada en el uso de carbón. Esto se debe al compromiso internacional rubricado en el acuerdo de París 2016, en el cual se pone de manifiesto la intención de limitar los efectos del cambio climático en el corto plazo. Además, se consigue reducir en gran medida el fenómeno de la lluvia ácida, pues el carbón es más rico en compuestos como azufre o nitrógeno, que forman los ácidos presentes en esta.

Caracterización del consumo energético en la edificación

Uno de los sectores que más energía consumen y sobre el que se está actuando mucho es la edificación, por su rango de capacidad de mejora y por lo grande que es el sector.

A continuación, en Gráfico 3 presenta un gráfico de cómo ha ido evolucionando el consumo energético en sector servicios en el ámbito de la salud en España en las últimas décadas.

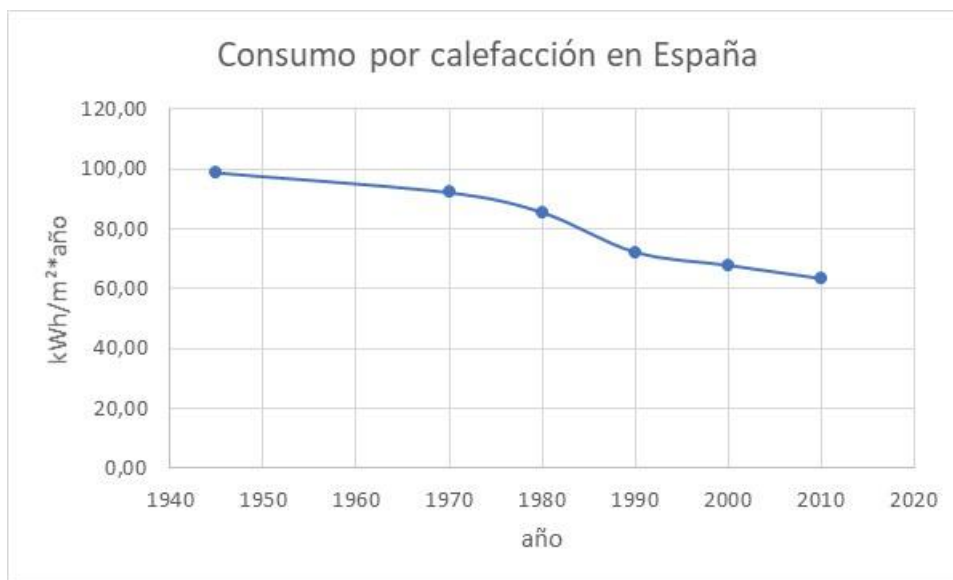


Gráfico 3: Consumo anual por calefacción en España. Elaboración propia.
Fuente de datos BPIE

Se puede apreciar una clara tendencia descendente, que se debe a varios aspectos, como la instalación de equipos de calefacción con mayor rendimiento, un mayor control del gasto energético, la mejora en el aislamiento... todo ello ha supuesto una mejora en la calificación que tienen los edificios españoles dentro del sistema de clasificación de etiquetas ecológicas. Este etiquetado está regulado por el Real Decreto 235/2013, que, aunque no obliga con carácter general a todos los propietarios de inmuebles a certificar la calidad energética de este, sí que exhorta a hacerlo cuando se produzca su compraventa, por ello, es especialmente interesante conocer la valoración de los edificios de nueva construcción, puesto que van a ser un fiel reflejo de la evolución en términos de eficiencia energética del parque edificatorio español.

Tal como se puede ver en la Gráfico 4, los edificios de nueva construcción de tipos F y G son casi inexistentes, lo que es una muestra clara de los esfuerzos por mejorar la eficiencia energética y reducir la demanda energética. Destaca muy positivamente que el 44% de las viviendas de nueva construcción tengan etiqueta A o B, lo cual, tal como indica Tabla 1, supone un ahorro energético de más del 90% respecto a si los edificios

tuviesen la categoría G (la que más emisiones de CO₂ produce) (Comunitat Valenciana, 2021).

Tabla 1: Comparativa de consumos y ahorros energéticos de las diferentes etiquetas de calidad medioambiental (Comunitat Valenciana, 2021).

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA EMISIONES CO ₂	CONSUMO MEDIO ENERGÍA FINAL (kWh/m ² .año)	AHORRO ENERGÉTICO RESPECTO A "G"
A	10,26	95 %
B	20,71	90 %
C	35,60	84 %
D	57,64	73 %
E	117,31	46 %
F	172,42	21 %
G	217,28	0 %

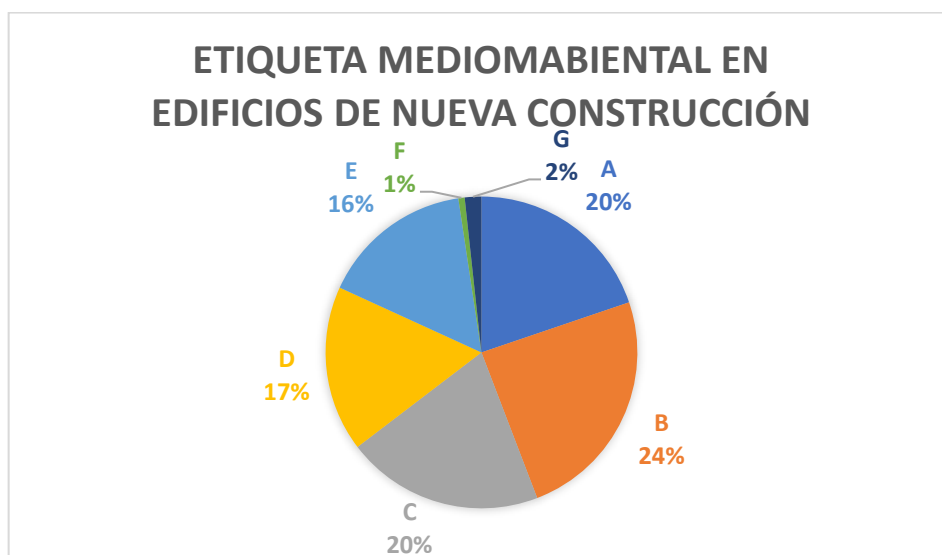


Gráfico 4: Etiqueta medioambiental de los edificios de nueva construcción (Ministerio para la transición ecológica, 2019)

El Gráfico 5 muestra la evolución del etiquetado energético de los últimos 4 años, donde destacan dos aspectos principales: por un lado, las etiquetas de tipo A y B crecen de manera muy pronunciada y de manera muy estable, siguiendo una tendencia bastante lineal. La calificación de tipo C es la inflexión entre la tendencia creciente y decreciente, puesto que la evolución es bastante constante. Por otro lado, las calificaciones de tipo D y E caen abruptamente y pasan de ser las más habituales a perder ese terreno en favor de las de tipo A y B. Finalmente, aquellas de tipo F y G, son en todo momento muy inferiores al resto de etiquetas.

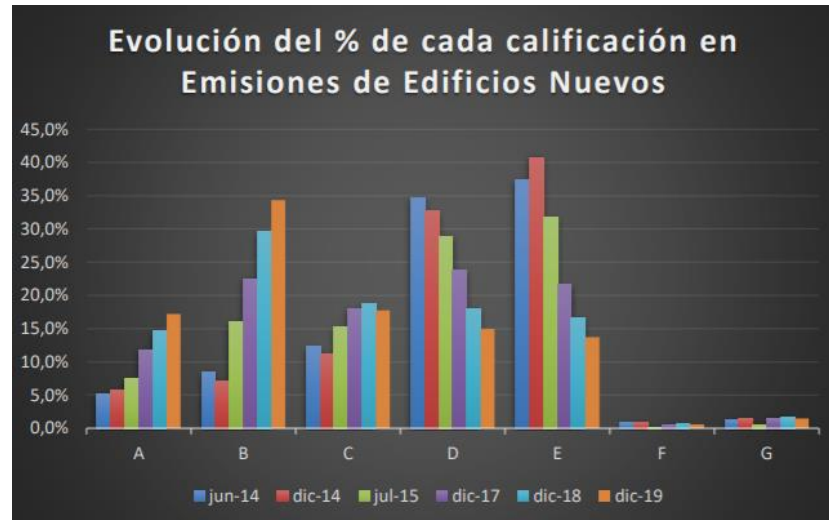


Gráfico 5: Evolución del etiquetado medioambiental de los edificios de nueva construcción (Ministerio para la transición ecológica, 2019)

Sin embargo, a pesar de estos datos tan positivos, la realidad en cuanto a calidad energética es otra. Estas tendencias, aunque favorables, no son suficientes para hacer variar en el corto plazo la calidad energética del parque edificatorio nacional, pues en la actualidad, casi un tercio de los edificios tiene etiqueta F o G (Gráfico 6), lo que dista mucho de los objetivos marcado para el 2030 por la Unión Europea.

La Comisión Europea afirma que el 40 % del consumo energético y el 36 % de las emisiones de CO₂ en la Unión Europea corresponden a la edificación. Además, destaca la importancia de renovar el parque edificatorio europeo, puesto que alrededor del 35 % de este, supera el medio siglo de antigüedad. La mejora de la eficiencia energética, se intuye un aspecto fundamental hacia la transición energética, puesto que se estima que se podría reducir entre 5 y el 6 % el consumo del todo el conjunto de la Unión Europea, y que además, desembocaría en el consiguiente descenso del 5 %, aproximadamente, de las emisiones totales de CO₂. (Parlamento Europeo, n.d.)

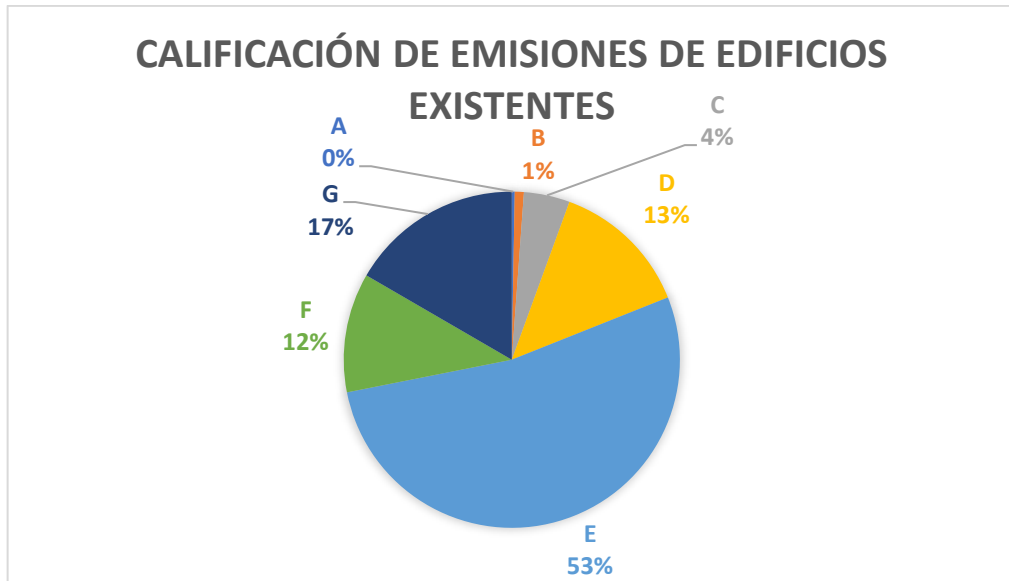


Gráfico 6: Etiquetas de calificación ecológica del parque edificatorio nacional (Ministerio para la transición ecológica, 2019)

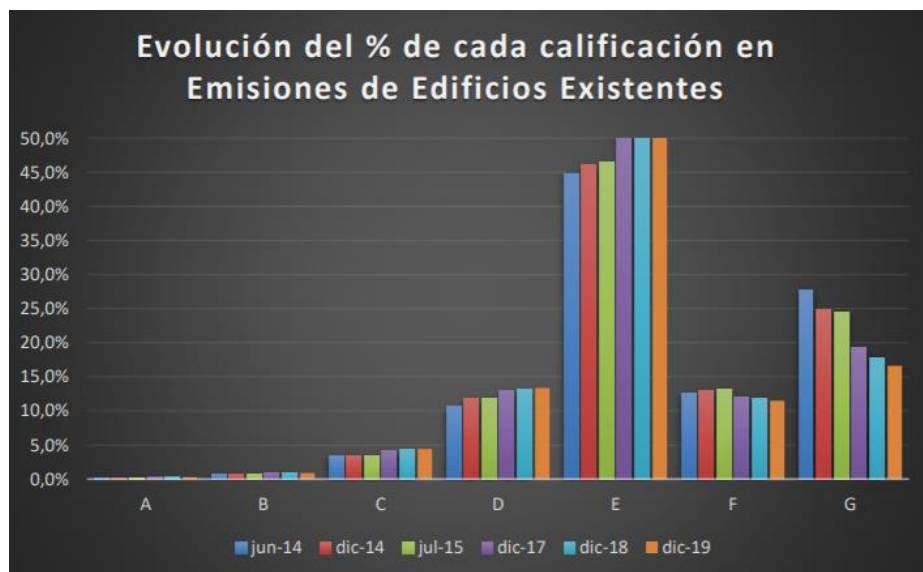


Gráfico 7: Evolución de la calidad ecológica del parque edificatorio español (Ministerio para la transición ecológica, 2019)

El Gráfico 7 muestra claramente que a pesar de que se están reduciendo significativamente los edificios con etiqueta G, los de tipo F siguen casi constantes, al igual que aquellas calificaciones medioambientalmente más positivas, que no presentan grandes aumentos en los últimos 4 años.

Consumo energético en hospitales

Específicamente en las salas de quirófano de los hospitales, existe una gran demanda energética debida a la estricta normativa en materia de salubridad e higiene. Esto es así porque el objetivo principal en este tipo de instalaciones es velar por la seguridad de los profesionales, así como la de los pacientes, siendo esta la prioridad frente al gasto energético.

Para contextualizar el consumo energético de los hospitales y mostrar la importancia de optimizarlo, cabe destacar que, en países como Estados Unidos, el consumo de energía medio por metro cuadrado es de 738,5 kWh/m² anualmente (Bawaneh et al., 2019). Por otro lado, en España es considerablemente más bajo siendo de 270 kWh/m² (González González et al., 2018). Sin embargo, hay 791 hospitales y cerca de 4350 salas de quirófano, lo que supone un consumo del 10% del total de energía de todo el sector terciario nacional (Sánchez-Barroso Moreno et al., 2019).

De acuerdo con la guía de ahorro y eficiencia energética de la comunidad de Madrid (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2010), el 45% de toda la energía consumida en hospitales de esta comunidad, se debe a la climatización (Gráfico 8). Por ello, buscar formas de ahorro energético para incidir en el mayor foco de consumo de este tipo de instalaciones, supondrá un cambio sustancial en nuestro modelo energético.

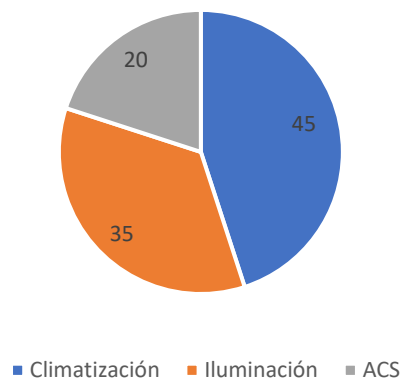


Gráfico 8: Porcentaje de consumo energético por sectores en hospitales (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2010)

Más concretamente, en quirófanos se requiere una media de 1685 kWh/m² anualmente en España (Cacabelos-Reyes et al., 2020), es decir, más de 6 veces la media de consumo global en hospitales. Teniendo en cuenta que los quirófanos tienen que estar operativos los 365 días del año pero que se recomienda un uso máximo de 47 horas por semana y quirófano (Ministerio de Sanidad Gobierno de España, 2009), se puede buscar una regulación más laxa de los caudales de ventilación en los periodos de no ocupación que mantenga las condiciones de salubridad requeridas pero que permita

reducir la energía aportada. Sobre este punto es sobre el que se va a trabajar en el presente trabajo de fin de grado, en el cual, se va a proponer la utilización de la estrategia de ventilación reducida, que consiste en actuar sobre los periodos de no actividad, aminorando el caudal de entrada y, manteniendo cerrada la salida, consiguiendo mantener la sobrepresión en el interior. La importancia de este último aspecto radica en que no va a haber infiltraciones que introduzcan partículas que contaminen el quirófano, pues el aire circulará desde el interior del quirófano hacia el exterior. Según (González-Gil et al., 2018) el 80% del consumo energético en los quirófanos corresponde con los periodos de no ocupación, luego una buena regulación durante estos grandes espacios de tiempo permitiría una reducción muy importante de los recursos energéticos empleados. En el año 2017, apenas el 17,5% de la energía que se consumió en España procedía de fuentes renovables, que coincide con la media europea (INE, 2019). De acuerdo con estos datos, un uso eficiente de la energía en quirófanos podría reducir drásticamente las emisiones de CO₂ en hospitales sin disminuir la calidad de las condiciones de temperatura y humedad a las que se encuentran los pacientes y profesionales.

Medidas de eficiencia energética en hospitales

Centrándonos más concretamente en hospitales, se están siguiendo actualmente unas líneas generales para mejorar su eficiencia. Las medidas adoptadas en hospitales (Ministerio de Fomento, 2019) son:

- Suministros:
 - Optimización del término de potencia
 - Monitorización y gestión de los consumos energéticos
 - Instalación de paneles fotovoltaicos
 - Instalación de plantas de microgeneración
- Iluminación
 - Instalación de detectores de presencia
 - Sustitución de luminarias convencionales por tecnología LED
- Climatización:
 - Instalación de variadores de frecuencia en las bombas de impulsión de agua climatizada
 - Centralizar el sistema de climatización
 - Sustitución de bombas de calor con refrigerante R22
 - Sustitución de los quemadores actuales por quemadores modulantes con control de O₂ continuo
 - Sustitución de calderas actuales por calderas de condensación
 - Instalación de variadores de frecuencia en motores de las climatizadoras

- Aislamiento térmico de los intercambiadores de placas
- ACS:
 - Parada de bombas de recirculación de ACS por control de la temperatura de red
 - Instalación de un sistema solar térmico para ACS
 - Aislamiento de la red de recirculación de ACS
- Otros:
 - Apagado nocturno de las máquinas de vending de bebidas frías y calientes
 - Utilización de agua precalentada en trenes de lavado y lavaperolas de cocina

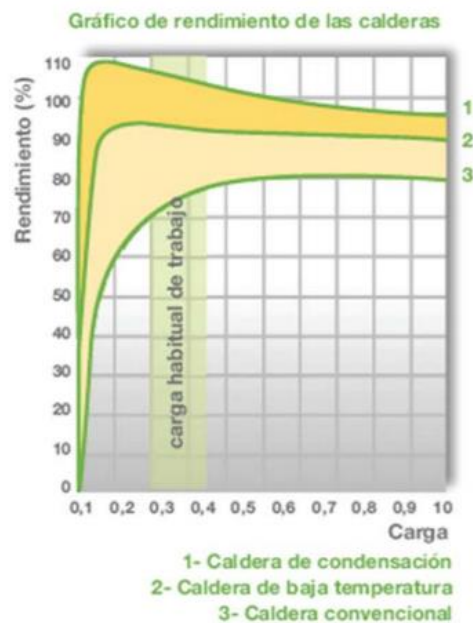


Figura 1: Comparativa de los rendimientos para los diferentes tipos de calderas (Ministerio de Fomento, 2019)

Una de las principales mejoras mencionadas es la instalación de calderas de condensación (Figura 1), puesto que consiguen condensar los gases de combustión y con ello aprovechan su calor latente. Esto se debe a los materiales con los que están construidas, puesto que son resistentes a la corrosión, a diferencia de las calderas convencionales que se estropean frente a esta, reduciendo enormemente su rendimiento. En el punto medio estarían las calderas de baja temperatura, que, al poder variar la temperatura, evita arranque y paradas innecesarios, pero que no va a permitir llegar al rendimiento de las calderas de condensación.

Aunque estas estrategias tienen un efecto positivo, su aplicación por sí misma no es suficiente para poder solucionar el gran problema que supone el efecto invernadero, por lo que será necesario desarrollar diversas estrategias de optimización.

Los enfoques que se pueden adoptar frente a este problema son variados, los más frecuentes son:

- Cambiar los equipos por otros más eficientes.
- Cambiar las fuentes de energía por otras más respetuosas con el medio ambiente.
- Recuperar la energía disipada.
- Reducir la demanda energética.

De todas estas opciones, el presente documento se va a centrar concretamente en la última a través de la estrategia *setback* o ventilación reducida.

Objetivos

Tras plantear la situación energética con sus correspondientes líneas de acción para mejorar la eficiencia y teniendo en cuenta los límites que hay por la exigencia de los estándares de higiene requeridos, se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de fin de grado es la valoración, en cuanto a ahorros energéticos y criterios de seguridad, del método de ventilación reducida en períodos de no ocupación (“*setback*”).

Objetivos específicos

- Comprobar los resultados existentes en la literatura sobre la aplicación de esta estrategia en espacios sanitarios.
- Justificar que no hay riesgo de infiltraciones por el uso de *setback*.
- Estimar el ahorro energético conseguido, así como los beneficios medioambientales que aporta.

Estado de la técnica

Los quirófanos son salas altamente seguras debido a su uso crítico, es por ello que se hace indispensable poder clasificarlos según las características de las actividades que se van a llevar a cabo en su interior y así poder estudiar no solo las medidas y criterios de seguridad necesarios para mantener las condiciones requeridas, sino también ser capaces de estudiar posibles formas de mejorar su eficiencia energética, así como riesgos que puedan suponer su implantación.

Criterios de seguridad en instalaciones hospitalarias. Quirófanos.

La norma (*UNE 100713:2005, 2005*) establece dos clases de locales dentro de un hospital: La clase I corresponde a zonas en las que hay que tener un control exhaustivo sobre la aparición de gérmenes que puedan provocar infecciones, y es donde se encuentra nuestro caso de estudio, los quirófanos. Por otro lado, se encuentran los locales de clase II donde las exigencias son las habituales. A su vez, la Tabla 2, extraída de (*Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo, 2010*) Diferencia los tipos de quirófano en función de sus requerimientos de limpieza del aire, reflejados en la norma (*UNE-EN ISO 14644-1:2000, 2000*).

Tabla 2: Calidad del aire en quirófanos

Tipo quirófano	UNE 100713:2005	UNE-EN ISO 14644	Denominación quirófano	Tipo de intervención
A	Clase I	ISO Clase 5	Quirófanos de alta tecnología. Cirugía especial	Transplantes de órganos, cirugía vascular...
B	Clase I	ISO Clase 7	Quirófanos convencionales	cirugía convencional y de urgencias
C	Clase I	ISO Clase 8	Quirófano de cirugía ambulatoria	Cirugía ambulatoria. Salas de partos

La norma (*UNE-EN ISO 14644-1:2000, 2000*) establece el tipo de flujo y la cantidad de renovaciones de aire que tiene que haber en un quirófano dependiendo del tipo que sean:

- Clase A: se admite que el flujo sea unidireccional o turbulento y que haya recirculación siempre y cuando provenga del mismo quirófano. La norma recomienda al menos 35 renovaciones de aire por hora.
- Clase B: el flujo puede ser turbulento y se recomiendan 20 renovaciones a la hora con un flujo que venga por completo del exterior.

- Clase C: al igual que la clase B permite que el flujo sea turbulento, pero es algo más laxa en cuanto a las renovaciones de aire por hora, donde la recomendación está en 15, viniendo también el flujo completamente del exterior.

En la Tabla 3 (Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo, 2010), se presentan los requerimientos de ventilación según el tipo de quirófano.

Tabla 3: Requerimientos de ventilación en hospitales

Tipo de quirófano	Caudal mínimo de aire impulsado	Movimientos/hora	Temperatura y humedad	Presión	Filtros
Clase A	2400m ³ /h, 1200m ³ /h (aire exterior)	Mínimo 30	18°C-26°C, 45%-55% de humedad	+20Pa a	F5/F9/H14
Clase B		Mínimo 20	22°C-26°C, 45%-55% de humedad	+25Pa	
Clase C	1200m ³ /h (aire exterior)	Mínimo 15			F5/F9/H13

Nuestro caso de estudio va a consistir:

- Quirófano 1: Es un quirófano de urgencias que está dotado tanto de variador del ventilador en la impulsión como en la extracción.
- Quirófano 8: Es de tipo general, por lo que solo tiene variador del ventilador en la impulsión.

Evaluación de riesgos por la implantación de estrategias de mejora en la eficiencia energética

Hay dos aspectos que, aunque no vayan a ser estudiados en el presente documento porque se salen del objeto de estudio, son tenidos en cuenta en otras investigaciones más extensas:

Por un lado, con el fin de aprovechar parte de la energía del aire que extraemos del interior del quirófano durante la renovación, podríamos hacerlo pasar por un intercambiador y así calentar el aire que entra al quirófano. Aunque es una idea interesante, hay que tener precaución con el tipo de intercambiador que se coloca, pues si su comportamiento no es ideal, puede contaminar el aire de entrada. Según Uno de los riesgos de los intercambiadores es la posibilidad de que existan fugas. En instalaciones como quirófanos, donde, como se ha mencionado anteriormente, lo primordial es la seguridad de pacientes y profesionales, hay que evitar a toda costa este tipo de riesgos. Por ello, a continuación, se presenta en la Tabla 4 (Valverde Lorenzo et al., 2020) los principales tipos de intercambiadores y sus características que más intervienen en nuestro estudio:

Como se puede comprobar, solo podrían ser instalados intercambiadores tipo: heat pipe, termosifón, dos baterías con bomba y por recirculación y rociado, que son los que no presentan riesgo de fugas.

Tabla 4: Características de los principales tipos de intercambiadores

	De placas sensible	De placas latente	Sensible rotativo	sensible entálpico	Heat pipe	Termosifón	Dos baterías con bomba	Por circulación y rociado
Efectividad sensible(%)	50-75	55-75	65-80	65-80	40-60	40-60	45-65	40-60
Efectividad latente (%)	0	25-60	0	50-80	0	0	0	50-75
Efectividad total(%)	20-50	35-70	25-60	55-80	15-35	-	-	40-75
Rango de temperaturas (°C)	(-60)- 800	(-40)-60	(-55)-800	(-55)-800	(-40)-93	(-40)-40	(-45)-500	(-40)-46
Velocidad del aire(m/s)	1-5	1-3	2-5	2,5-5	2-4	2-4	1,5-3	1,5-2,2
Pérdida de presión(Pa)	100-1000	100-500	100-300	100-300	150-500	150-500	150-500	170-300
Posibilidad de fugas	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No

Por otro lado, es interesante destacar el estudio del filtrado de aire exterior. Como se ha podido ver en la Tabla 3, todos los filtros en quirófanos de acuerdo con la norma (EN 779:2012, 2012), son de tipo M (F5 y F6) y F (F7 a F9). Esto se refiere al tamaño del filtro, siendo más finos cuanto mayor es el número que hay después de la F. Sobre esta norma, se han diseñado los quirófanos existentes, sin embargo, los nuevos quirófanos que se construyan deberán estar regulados por la norma (UNE-EN 16798-3, 2018), pendiente de trasposición a la reglamentación nacional.

En este documento, vamos a tomar como hipótesis que el aire que entra está perfectamente limpio y que no vamos a instalar un intercambiador. De esta manera, el estudio que directamente focalizado a la regulación de caudal que entra o sale del quirófano.

Artículos recientes como (Cacabelos-Reyes et al., 2020), ya estudian la implementación de la estrategia de *setback* en hospitales españoles. En este artículo, han profundizado en los requerimientos energéticos de un quirófano en su funcionamiento habitual durante dos periodos distintos del 2019 y con los datos recogidos, han procedido a modelar el funcionamiento anual del quirófano mediante el software TRNSYS. La conclusión es que se podría ahorrar un 50% de la energía como máximo, que sería en el caso extremo en el que se mantuviera todo el año el quirófano en modo *setback* respecto a tenerle todo el año en el modo de funcionamiento habitual. Además, si se recirculara el 80% del aire interior (frente al 0% que se plantea), se podría llegar a reducir en un 70% la demanda energética.

Siguiendo con esta última idea de aumentar la recirculación, el estudio (Sánchez-Barroso Moreno et al., 2019), valora los diferentes ahorros en función de la cantidad de aire recirculado. Para ello se simuló el funcionamiento a lo largo de un año de un quirófano, cuyas condiciones interiores estaban basadas en registros históricos. Es especialmente interesante saber que las condiciones interiores son muy parecidas a las de la experimentación de este trabajo, pues se centran en mantener una sobrepresión de entre 5 y 20 Pa, una temperatura entre 20 y 24°C y una humedad relativa de entre el 40 y el 60% además de impulsar la misma consigna de aire de 2400m³/h. El estudio concluye con que simplemente recirculando un 25% del aire extraído se reduce la demanda energética en un 24,1% y que, si se llega al 50%, se reduce en un 44,31%. Finalmente, se trata el interés económico y medioambiental que supondría la implantación de esa estrategia, pues se produce un descenso importante de los costes y de CO₂ emitido.

Estrategias distintas de ahorro energético son las introducidas por (Chen, 2018), que estudia cómo en el hospital chino de Wenzhou (Zhejiang), ciertas medidas como mejorar la distribución de los espacios, dividir el sistema de acondicionamiento (entre las particiones interiores del quirófano con requerimientos energéticos más exigentes y las exteriores, que dan a las zonas adyacentes al quirófano y precisan menos energía) o recircular aire pueden reducir en un tercio la demanda energética e incluso mejorar la calidad del aire. La principal novedad que incluye es introducir tres modos de operación: para verano, invierno y para el periodo entre estaciones. Esta distinción consiste en variar la cantidad de aire que se impulsa y la cantidad recirculada, siendo máxima en verano e invierno que es cuando más demanda energética hay.

En cuanto a similitud con este trabajo, es especialmente interesante el estudio de (Tejero-González et al., 2021), el cual, además de ser muy reciente, se desarrolla en la misma ciudad que este, en Valladolid. Las previsiones de ahorro energético son altamente notables, llegando a 29MWh en calefacción y 262MWh en electricidad, lo que supone nada menos que el 2% del consumo eléctrico del hospital Clínico Universitario, en el que se realizaron los ensayos.

Caso de estudio y metodología

En este capítulo se va a presentar el escenario en el que se ha desarrollado el estudio, centrándonos tanto en las condiciones exteriores del hospital, de las que se toma el aire que se va a impulsar, como las condiciones interiores, indicando cuales son las condiciones requeridas en un quirófano, la forma de actuar de manera directa sobre ciertos parámetros y también se señalarán aquellos que solo van a ser monitorizados. Además, se va a explicar un caso especialmente interesante de estos últimos parámetros, que es la deshumidificación incontrolada.

Condiciones exteriores

Los quirófanos que se van a estudiar se encuentran el hospital universitario Río Hortega, situado en la calle Dulzaina 2 (47012 Valladolid). Este hospital está conformado por 115.354m² construidos, alberga 600 camas y tiene unos 3000 empleados(Rey Martínez et al., 2020), con lo que da cobertura a 17 zonas básicas de salud de la provincia de Valladolid(SACYL, 2021). Esto lo convierte en el tercer hospital de toda Castilla y León en número de personas asignadas por hospital público, llegando a las 261.632 personas (A. Díaz, 2019).

En cuanto las condiciones exteriores, en la ciudad de Valladolid se han llegado a alcanzar mínimos históricos de temperaturas de -11,5°C y máximas de 40,2 °C (AEMET, 2021). Esto quiere decir que será interesante disminuir todo lo posible la cantidad de aire impulsado desde el exterior siempre que se cumplan los requisitos de higiene, puesto que se necesitará menos energía para reacondicionar el aire del interior que acondicionar el aire del exterior. Esto cobra especial importancia en los meses de invierno, ya que las temperaturas exteriores se alejan mucho más de las condiciones operativas del interior que en verano.

Condiciones requeridas en el interior del quirófano

En la Tabla 5, se muestran las condiciones higrotérmicas a las que tiene que encontrarse el hospital en general y los quirófanos en particular (Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo, 2010).

Tabla 5: Condiciones higrotérmicas en hospitales y quirófanos

Local	UNE 100713:2005				ASHRAE			
	Temperatura		Humedad Relativa(HR)		Temperatura		Humedad Relativa(HR)	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
En todo centro sanitario	26	24	55%	45%	24	21	60%	30%
Quirófanos	26	22	55%	45%	24	20		

Como se puede apreciar en la Tabla 5, y teniendo en cuenta los registros históricos, queda claro que, en los meses de verano, por mucho que las temperaturas se aproximen a las máximas históricas, nos vamos a encontrar mucho más cerca de las condiciones que exige (UNE 100713:2005, 2005) para hospitales y quirófanos que en invierno.

Unidad de tratamiento de aire (UTA)

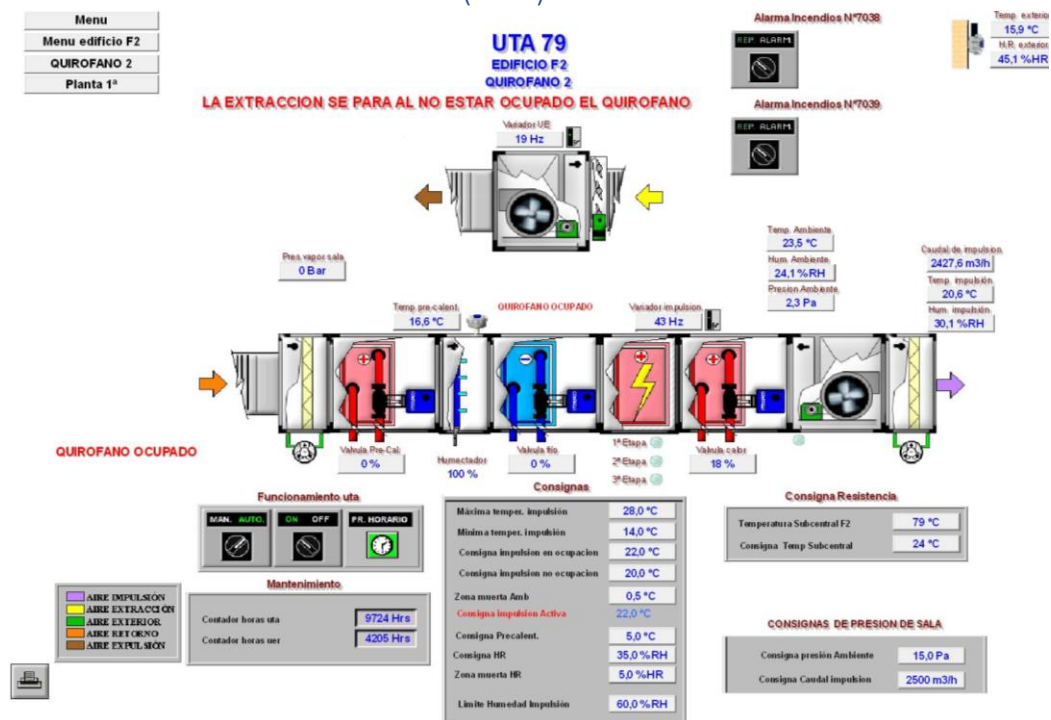


Figura 2: Interfaz de monitorización de las UTAs de los quirófanos

La figura 2, muestra la interfaz de monitorización de unidad de tratamiento de aire empleada para climatizar las salas de quirófono. La UTA consta de:

- Unidad principal de calor: que va a funcionar con energía térmica procedente de la combustión de gas natural. El rendimiento de esta es del 97% y, además, se va a considerar que no hay pérdidas en el transporte. Cabe destacar que esta caldera ha sido optimizada desde el 92% que tenía en su instalación, por lo que el estudio que se hace continua en la dinámica de mejorar la eficiencia energética de este hospital.
- Enfriadoras por compresión mecánica: que funciona con energía eléctrica.

-Red de vapor: de la que se obtiene el vapor requerido a inyectar para conseguir las condiciones de consigna interiores en humedad relativa.

Se utiliza para inyectar humedad en la impulsión. Por motivos ajenos al estudio, no ha estado en funcionamiento en ningún momento durante la recogida de datos.

Hipótesis simplificativas

Gas ideal

Como es habitual en psicrometría, vamos a trabajar con el aire como gas ideal, ya que las presiones a las que trabaja el sistema están en torno a un bar y la temperatura máxima histórica es de 40,2°C.

$$Z = \frac{PV}{nRT}$$

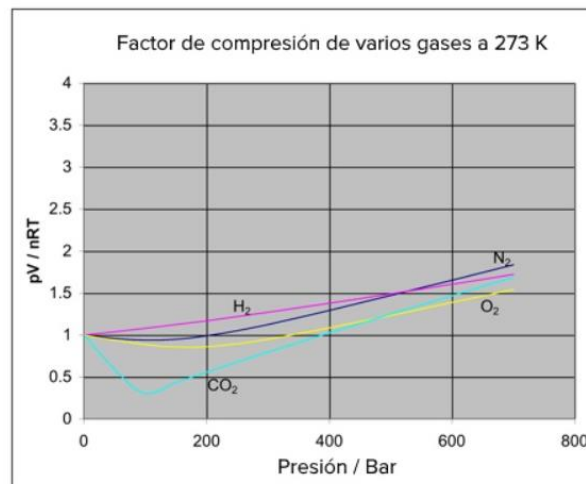


Gráfico 9: Comportamiento de los gases que componen el aire frente a la presión (Academy, n.d.)

Cuando el factor $Z=1$ podríamos afirmar que las fórmulas de gas ideal describen perfectamente el comportamiento del aire. Como se muestra en el Gráfico 9 (Academy, n.d.), los principales componentes del aire se sitúan en torno a ese valor para las presiones en las que nos movemos, luego el error que se cometería es completamente despreciable.

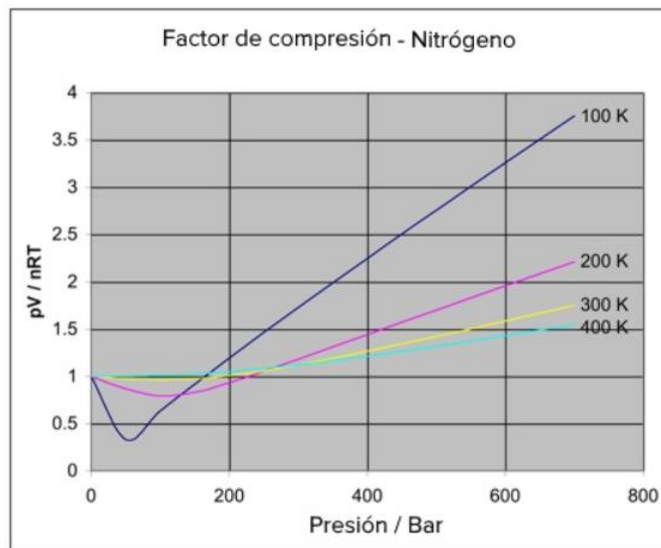


Gráfico 10: Comportamiento del nitrógeno frente a la presión para ciertas temperaturas (Academy, n.d.)

Por otro lado, para mostrar que la influencia de la temperatura en el proceso es también mínima, se presenta en el Gráfico 10 el comportamiento del nitrógeno, componente mayoritario del aire, para un amplio rango de temperaturas frente a la presión. Tal y como se puede apreciar, la influencia sigue siendo despreciable.

Aire impulsado completamente del exterior

El aire que se va a impulsar en todo momento al quirófano va a provenir del exterior, no habiendo recirculación en ningún momento. Además, se va a suponer que los filtros funcionan perfectamente y que, por ello, no va a haber en ningún momento entrada de partículas que comprometan la higiene del quirófano.

Procedimiento de toma de datos

A la hora de analizar los parámetros que entran en juego a la hora de este estudio, se ha hecho una clasificación entre aquellos que son controlados (Tabla 7) y los que son medidos (Tabla 6).

Parámetros medidos

Tabla 6: Parámetros medidos

Condiciones de operación	Frecuencia del ventilador en la impulsión [Hz] Frecuencia del ventilador en la extracción [Hz] Humidificador
--------------------------	--

Condiciones interiores	Temperatura de bulbo seco [°C] Humedad relativa [%] Sobrepresión [Pa]
Condiciones de suministro	Caudal de impulsión [m ³ /h] Temperatura de bulbo seco [°C] Humedad relativa [%]
Condiciones exteriores	Temperatura de bulbo seco [°C] Humedad relativa [%]

Parámetros controlados

Tabla 7: Parámetros controlados

Caudal en la impulsión	Modo <i>setback</i> : 1000 m ³ /h Modo estándar: 1500 m ³ /h
Sobrepresión interior	15 Pa
Temperatura de bulbo seco en la impulsión	Periodo de ocupación: 22 °C Periodo de no ocupación: 20 °C
Humedad relativa en la impulsión	60%
Humedad relativa interior	35% (si funciona el humidificador)

Cálculo de las variables psicrométricas

Presión total (Lazzarin & Narini, 2015)

$$P_t = 101325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot z)^{5,2559} \quad [\text{Pa}] \quad [1]$$

z: altitud [m]

La presión del aire atmosférico es una variable psicrométrica que viene dada únicamente por la altitud del lugar en el cual se realizan las mediciones, es decir, la del hospital universitario Río Hortega.

Entalpía específica (Lazzarin & Narini, 2015)

$$i = (C_{p_a} + C_{p_v} \cdot x) \cdot T + x \cdot C_L \quad [\text{kJ/kg}_{\text{as}}] \quad [2]$$

Considerando:

Calor específico del aire: $C_{p_a} = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg}_{\text{as}} \text{ } ^\circ\text{C})$

Calor específico del vapor: $C_{p_v} = 1,9 \text{ kJ}/(\text{kg}_v \text{ } ^\circ\text{C})$

Calor latente de fusión del agua: $C_L = 2501 \text{ kJ}/(\text{kg}_v)$

La entalpía específica de un gas consta de tres términos. Por un lado, tenemos los calores los calores específicos a presión constante del gas y del líquido multiplicado por la cantidad de este (título de vapor) y todo ello multiplicado por la temperatura. Por otro lado, tenemos el término debido al calor latente de vaporización que está multiplicado por el título de vapor, ya que este término solo afecta al agua líquida.

Humedad específica (Lazzarin & Narini, 2015)

$$x = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P_T - P_v} \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_{\text{as}}] \quad [3]$$

Esta variable psicrométrica nos permite trabajar directamente con los flujos másicos de vapor y gas en vez de emplear un número adimensional que caracterice la humedad como la humedad relativa. P_t es la presión total calculada anteriormente y P_v la presión de vapor. A lo largo del presente documento, esta variable psicrométrica también será llamada título de vapor.

Presión de vapor de saturación (Lazzarin & Narini, 2015)

$$P_{v \text{ sat}} = \exp \left(23,5771 - \frac{4042,9}{(T+273)-37,58} \right) \quad [\text{Pa}] \quad [4]$$

Esta variable psicrométrica nos permite obtener la presión de vapor, que es necesaria para sacar la humedad específica explicada anteriormente. Es únicamente función de la temperatura, T , con lo que se puede obtener $P_{v \text{ sat}}$ para la impulsión y extracción introduciendo la correspondiente a cada caso.

Presión de vapor (Lazzarin & Narini, 2015)

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{v\ sat} \quad [\text{Pa}] \quad [5]$$

Depende únicamente de HR (humedad relativa) y de $P_{v\ sat}$ (presión de vapor saturada). A partir de esta variable, podremos trabajar con flujos másicos de vapor y gas mediante la humedad específica

Volumen específico (Lazzarin & Narini, 2015)

$$v_e = \frac{R_a \cdot (T+273)}{P_{as}} \quad [\text{m}^3/\text{kg}_{as}] \quad [6]$$

Donde R_a es una constante de los gases: $R_a = \frac{R}{PM_a} = \frac{8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})}{0,02897 \text{ kg}_{as}/\text{mol}}$ [7]

Es el inverso de la densidad, es decir, el volumen que tiene el gas por unidad de masa.

Cálculo de ahorros energéticos

A modo de introducción a este capítulo, se presenta un esquema que simplifica la comprensión de los procesos que van a desarrollarse dentro de la unidad de tratamiento de aire, así como las fuentes de energía primaria necesarias para que sean llevados a cabo.

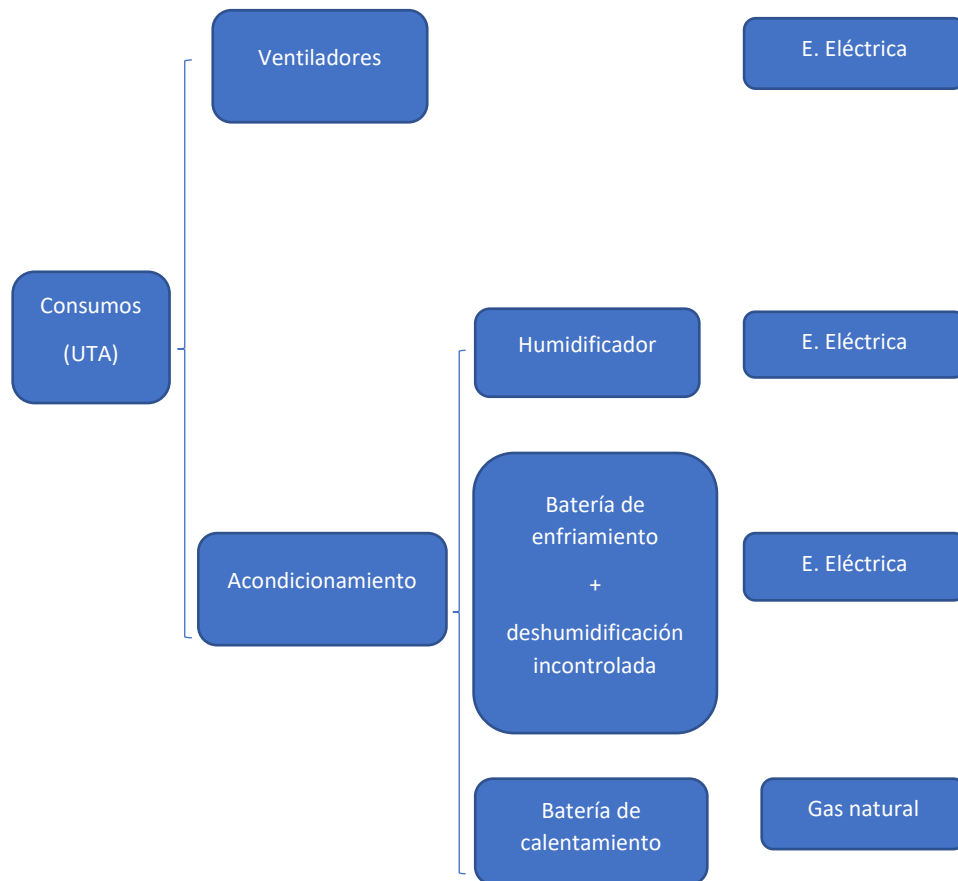


Figura 3: Esquema de los procesos que intervienen en la climatización de los quirófanos y sus fuentes de energía primaria

Primeramente, cabe destacar tal y como ya ha sido mencionado anteriormente, que por motivos ajenos a la experimentación la red de vapor encargada de la humidificación no entró en funcionamiento en ningún momento, y por tanto no ha tenido ningún efecto en los cálculos, lo que supone una mayor reducción de la demanda energética real frente a lo reflejado en los cálculos teóricos del presente documento.

Deshumidificación incontrolada

Uno de los parámetros que no se puede controlar es la humedad en el interior del quirófano, por dos razones: por un lado, tal y como ya se ha mencionado, por problemas ajenos al estudio la red de vapor no ha sido conectada en ningún periodo de la recogida de datos y, por tanto, no se puede inyectar ese vapor cuando se requiera. Esto afecta a todas las estaciones excepto al verano, pues, aunque hubiese estado operativo, en esa época no está activado por no producirse necesidades de humidificación. Por otro lado, durante el verano será muy frecuente el uso de la enfriadora, que además de reducir la temperatura del aire de impulsión, va a dar lugar a una deshumidificación incontrolada de este. La problemática de este proceso radica en que una parte de la energía eléctrica que hay que suministrar a la enfriadora, va a utilizarse para condensar agua que hay en el aire, lo que quiere decir que en la realidad se va a necesitar más energía eléctrica de la teórica para enfriar el aire.

Para ejemplificarlo mejor se presenta la Figura 4 en la que se muestra el diagrama psicrométrico a 750m de altitud sobre el nivel del mar, es decir, donde se encuentra la ciudad de Valladolid.

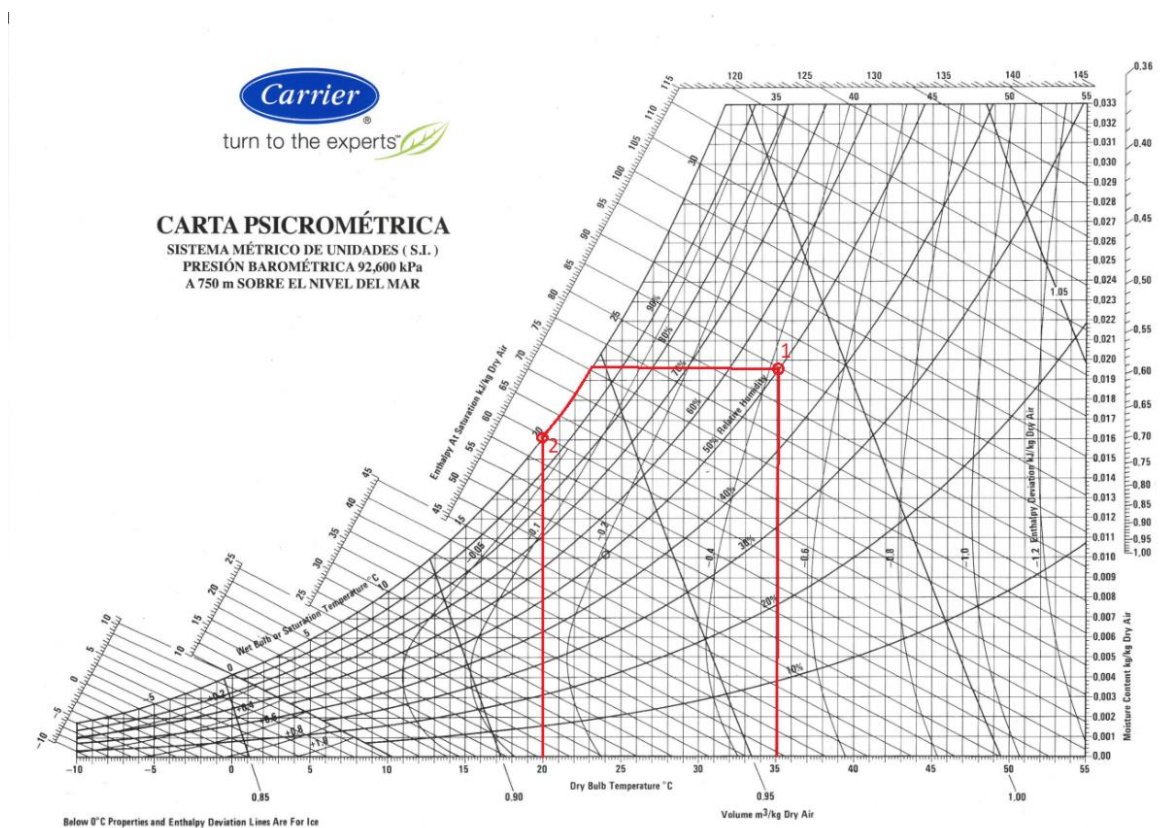


Figura 4: Diagrama psicrométrico de la ciudad de Valladolid

Pongamos que como punto de partida se tiene un día muy caluroso de verano en el cual, hay una temperatura exterior de 35°C y una humedad relativa del

50%. A ello le corresponde una humedad específica de $0,01955 \text{ kg agua/kg aire}$. Por otro lado, se pretende enfriar sensiblemente el aire hasta los 20°C . Para ello, trazamos una horizontal en el punto 1, pero nos topamos con el punto de rocío antes de llegar a 2, por lo que habrá que descender por la curva del punto de rocío hasta llegar a este, que tiene una humedad específica de $0,016 \text{ kg agua/kg aire}$.. Sería por tanto sencillo obtener el caudal de agua que precipita, ya que se basta con multiplicar el caudal de aire de impulsión por la diferencia de humedades específicas.

Como se puede comprobar, este fenómeno puede ser monitorizado indirectamente a partir de otras variables psicrométricas sin necesidad de equipos de medición directa. Sin embargo, no vamos a poder controlarlo, ya que lo que hacemos es fijar las condiciones de operación de la batería de enfriamiento en función de la temperatura de impulsión del aire deseada, de forma independiente a la humedad específica del aire exterior.

Esta descripción del proceso sin embargo es ideal, puesto que hay que tener en cuenta que existe una capa límite térmica. Este fenómeno consiste en que al estar en contacto un fluido con una superficie a una cierta temperatura, la parte del fluido que está directamente en contacto con esta se encuentra a la misma temperatura y, por lo tanto, por debajo de su temperatura de rocío; a partir de ahí seguirá una tendencia con una cierta distribución dependiente principalmente de la velocidad del flujo hacia la temperatura media del flujo, que es la que se mantiene constante independientemente de cuanto nos alejemos de la superficie de contacto (Çengel, 2007).

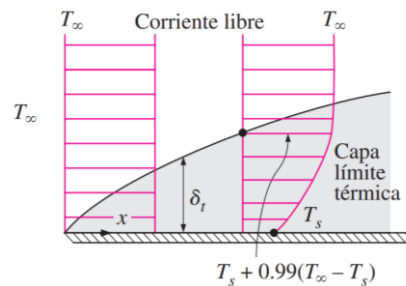


Figura 5: Capas límite térmica y dinámica. (Çengel, 2007)

De acuerdo con el ejemplo explicado anteriormente, la capa límite térmica hace que en todo momento vaya a haber una parte del aire de impulsión que por estar en contacto con una superficie a 20°C , esté condensando parcialmente el vapor de agua presente originalmente en el aire. fijándonos en el diagrama psicrométrico de la Figura 6, se puede ver que ya no hay una horizontal en el enfriamiento sensible, pues desde el primer momento hay una ligera pendiente negativa, que muestra la caída de humedad absoluta del aire de impulsión. Una vez que todo el aire llega a la temperatura de rocío, todo este ya se empieza deshumidificar, aunque dependiendo de la temperatura a la que se encuentre

cada zona de aire, tendrá una cantidad de agua distinta y por tanto deshumidificará de manera diferente.

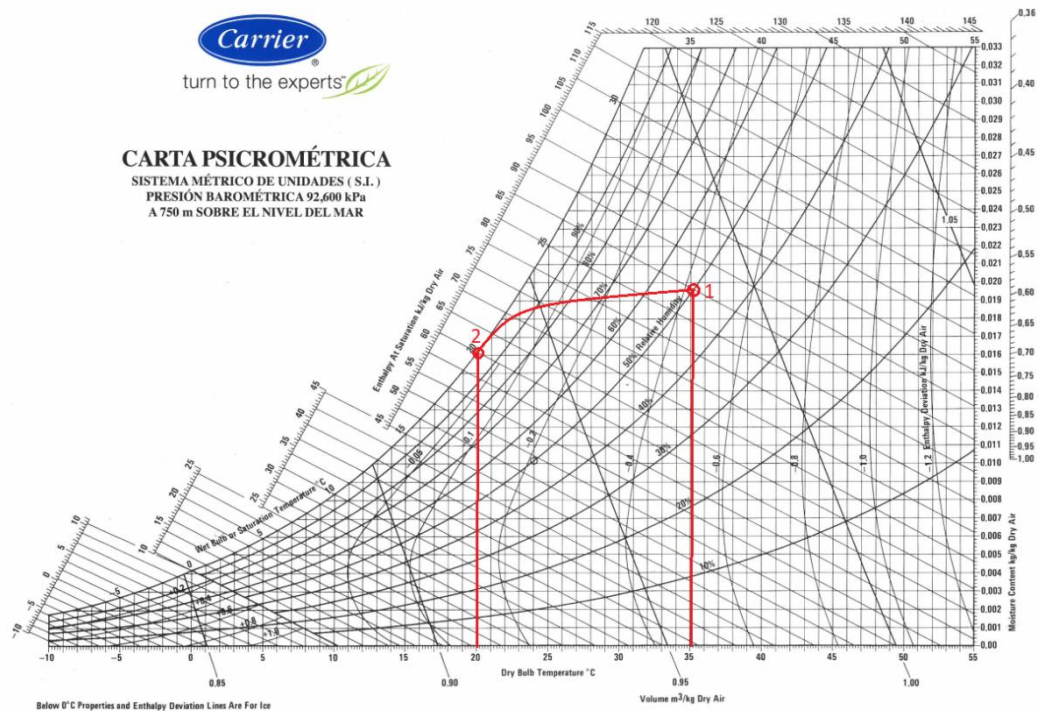


Figura 6: Comportamiento real del proceso de enfriamiento y deshumidificación incontrolada del aire en contacto con una batería de enfriamiento, debido a la capa límite térmica

Ahorro térmico

El ahorro térmico debido a la estrategia de *setback*, se debe a que, al impulsar menor cantidad de aire en los periodos de no ocupación, será necesario calentar menos cantidad de este. Además de esto, que sería la energía ahorrada en el caso de que el rendimiento de la caldera fuese perfecto y que además no hubiese pérdidas en el transporte, hay que introducir el término del rendimiento de la caldera, que incrementará el ahorro, puesto que la energía que hay que introducir en la caldera para obtener una cierta energía es mayor que esta debido a la irreversibilidad del proceso. Por otro lado, no se va a tener en cuenta las pérdidas en el transporte, puesto que habría que hacer un estudio exhaustivo de la instalación y este no es el objetivo de este trabajo de fin de grado.

$$\text{Ahorro térmico} = \Delta i_{cal_{sensible}} * (\dot{V} - \dot{V}_{imp}) * \frac{1}{v_e} * \Delta t * \frac{1}{\eta} \quad [\text{kWh}] \quad [8]$$

Siendo:

$\Delta i_{cal_{sensible}}$: Variación de entalpía sensible entre la impulsión y el exterior siempre que sea positiva, en caso contrario este valor será 0.

\dot{V} : Caudal de referencia en los periodos de ocupación del quirófano, es de 2400m³/h.

\dot{V}_{imp} : Caudal que se impulsa en cada momento [m³/s].

v_e : Volumen específico en la impulsión en ese instante [m³/kg].

Δt : Intervalo de tiempo desde una toma de datos hasta la siguiente [s].

η : rendimiento de la caldera, en este caso será del 97%

Ahorro eléctrico

El ahorro eléctrico introducido por la estrategia de *setback* se debe a dos partidas independientes. Por un lado, la reducción del caudal de impulsión y la anulación del caudal de extracción, posible gracias al variador de frecuencia de los ventiladores, supone un ahorro en la energía eléctrica consumida por estos. Adicionalmente, el menor flujo másico de aire impulsado reduce las necesidades de acondicionamiento de este, las cuales, en verano, están asociadas al funcionamiento de enfriadoras convencionales basadas en la compresión mecánica de un refrigerante y, por lo tanto, del consumo eléctrico asociado al accionamiento de estas.

$$\text{Ahorro eléctrico} = E_{enfriamiento} + E_{ventiladores} \quad [9]$$

Donde:

$$E_{enfriamiento} = \Delta i_{enfriamiento} * \dot{V}_{imp} * \frac{1}{v_e} * \Delta t * ESEER \text{ [kWh]} \quad [10]$$

$\Delta i_{enfriamiento}$: es la variación de entalpía al enfriar el quirófano, es decir, la de impulsión menos la exterior siempre que esta sea negativa, en caso contrario será 0. Este sumando se introducirá en valor absoluto. [kJ/kg]

\dot{V}_{imp} : Caudal de impulsión [m³/s]

v_e : volumen específico en la impulsión [m³/kg]

Δt : intervalo de tiempo entre una toma de datos y la siguiente [h]

ESEER: ratio de eficiencia energética estacional. Refleja el coeficiente de eficiencia energética para los diferentes estados de carga, es decir, que será un número adimensional. Para este caso ESEER será de 4,83 por la incorporación de un panel de refrigeración (Rey Martínez et al., 2020).

$$ESEER = (EER \text{ a } 100\% \text{ carga} \times 0.03) + (EER \text{ a } 75\% \text{ carga} \times 0.33) + (EER \text{ a } 50\% \text{ carga} \times 0.41) + (EER \text{ a } 25\% \text{ carga} \times 0.23) \quad [11]$$

Tabla 8: COP de la enfriadora para los diferentes estados de carga (Rey Martínez et al., 2020)

% carga	COP
100	3,45
75	4,2
50	4,95
25	5,7

Aplicando la ecuación 11 con los datos de la tabla 8, se obtiene un ESEER de 4,83. Este valor va a ser el que se va a utilizar en los cálculos de consumo eléctrico de la enfriadora en todo momento, ya que es un coeficiente que ya no va a variar con el estado de carga como pasaría con el COP.

Ahorro eléctrico de los ventiladores

Durante el funcionamiento en *setback*, la frecuencia de los ventiladores en la impulsión será la mitad, mientras que será nula en la extracción. Conociendo esto, y habiendo hecho un registro de la energía consumida a lo largo de un periodo en el que el quirófano entra en ambos modos de operación, se puede ver que se consume de media 5 Wh en cada minuto de funcionamiento normal y 0,82 cuando el modo es *setback*. A partir de aquí, se ha tomado: (NOMBRAR FÓRMULA)

$$Energía_{consumida} = tiempo_{setback} * C_{setback} + tiempo_{normal} * C_{normal} \quad [Wh] \quad [12]$$

Siendo:

$$C_{setback}: 0,82Wh/minuto$$

$$C_{normal}: 5Wh/minuto$$

$$Energía_{sinsetback} = tiempo_{total} * C_{normal} \quad [Wh]$$

Siendo esta la energía total que se habría consumido si no hubiera habido *setback* en ningún momento.

Por tanto, el ahorro obtenido en los ventiladores será la diferencia entre ambas energías: $Energía_{ahorrada} = Energía_{sinsetback} - Energía_{consumida}$ [Wh]

Emisiones de CO₂

$$kgCO_2 = Ahorro\ térmico * C_{gasnatural} + Ahorro\ eléctrico * C_{energía\ eléctrica} \quad [kg\ CO_2] \quad [13]$$

Donde:

$C_{gas_{natural}}$: es la cantidad de CO₂ que se emite por cada kWh de energía proveniente del gas natural que se emplea. En este caso es $0,204 \frac{kgCO_2}{kWh \text{ de energía térmica}}$ (IDAE, 2012).

$C_{energía_{eléctrica}}$: es la cantidad de CO₂ que se emite por cada kWh de energía eléctrica consumida. En este caso es de $0,331 \frac{kgCO_2}{kWh \text{ de energía eléctrica}}$ (IDAE, 2012).

Resultados y discusión

Comprobación de los criterios de seguridad

Tal y como ha sido expuesto anteriormente, en instalaciones hospitalarias conservar las condiciones de higiene y salubridad es prioritario frente al posible ahorro energético. Es por ello, que el punto de partida de los cálculos energéticos sea asegurar que la implantación del sistema *setback* no supondrá un riesgo para los pacientes y profesionales que se encuentran en el hospital.

Para ello, lo más importante es que se mantenga la sobrepresión en todo momento, ya que esto evita la entrada de aire desde las zonas circundantes al quirófano, lo que comprometería su higiene. Para poder estudiarlo con más claridad, se han estudiado los valores de todos los intervalos de tiempo, de manera que en aquellos casos en los que la sobrepresión baje de 5 Pa, se va a considerar que son no conformes, es decir, peligrosos. Es de especial interés conocer cuáles son los valores medios de esas caídas, así como la desviación típica y los valores mínimos, puesto que recogen la información necesaria para valorar la idoneidad en términos de seguridad de aplicar la estrategia *setback*. La tabla 7 recoge toda esta información y, como se puede ver, aun rozando en algunos casos el 100% del tiempo en *setback*, no se recogen valores negativos de sobrepresión y los valores no conformes corresponden con momentos aislados de tiempo, lo que nos hace pensar que son debidas a aperturas de las puertas del quirófano, lo cual es necesario para realizar las limpiezas pertinentes.

Tabla 9: Conformidad de la estrategia de setback

			sobre- presión media	sobre- presión estandar	valores no conformes	%valores no conformes	valor medio no aceptables	valor mínimo no aceptables	%setback
ENSAYO 1-Enero 2019	Q1	normal	15,9	5,1	7	0,7	1,1	0,01	65,6
		setback	15,7	1,9	0	-	-	-	
	Q8	normal	15,0	4,3	5	0,6	1,0	0	90,1
		setback	14,8	4,3	0	-	-	-	
ENSAYO 2-Marzo 2019	Q1	normal	15,1	4,0	24	2,4	1,1	0,02	0,0
		setback	-	-	-	-	-	-	
	Q8	normal	14,6	4,5	19	2,4	1,1	0,02	54,8
		setback	15,5	4,1	5	0,6	0,8	0,02	
ENSAYO 3-Enero 2020	Q1	normal	15,8	1,9	5	0,6	1,2	0,02	71,6
		setback	15,0	1,9	0	-	-	-	
	Q8	normal	15,3	4,1	3	0,4	0,5	0,04	89,3
		setback	14,9	0,9	-	-	-	-	
ENSAYO 4-Julio 2019	Q1	normal	15,0	4,8	8	1,0	1,1	0	69,5
		setback	15,1	2,2	0	-	-	-	
	Q8	normal	16,5	3,8	0	-	-	-	93,0
		setback	14,8	0,6	0	-	-	-	
ENSAYO 5-Agosto 2019	Q1	normal	15,3	5,2	21	2,7	0,7	0,01	54,5
		setback	15,2	2,7	0	-	-	-	
	Q8	normal	15,1	4,9	6	0,8	0,9	0,05	89,7
		setback	14,8	0,5	0	-	-	-	
ENSAYO 6-Diciembre 2019	Q1	normal	15,6	4,7	4	0,5	1,5	0,03	61,6
		setback	15,5	2,6	0	-	-	-	
	Q8	normal	18,9	9,1	0	-	-	-	99,5
		setback	14,9	0,4	0	-	-	-	

Tal y como se puede observar en la Tabla 9, con la estrategia *setback* apenas se producen valores no conformes, siendo cinco la mayor cantidad de intervalos de tiempo medidos en un quirófano no conformes. Como los intervalos son de 5 minutos, quiere decir que incluso en el caso más desfavorable que sería que todos estos intervalos fueran seguidos, supondría un total de 25 minutos, tiempo más que razonable para poder considerar que es de limpieza. Además, cabe destacar que el valor mínimo es positivo, por lo que no habrá infiltraciones. Gracias a ello, se puede afirmar que la estrategia utilizada es segura y por tanto los cálculos realizados tienen sentido. Para ejemplificar mejor este caso (Enero de 2020), se muestran las imágenes 5 y 6, donde se representa la sobrepresión y los modos de operación para cada uno de los intervalos de 5 minutos del estudio, asignando el valor 1 cuando se está en modo *setback* y 0 cuando funciona de manera estándar.

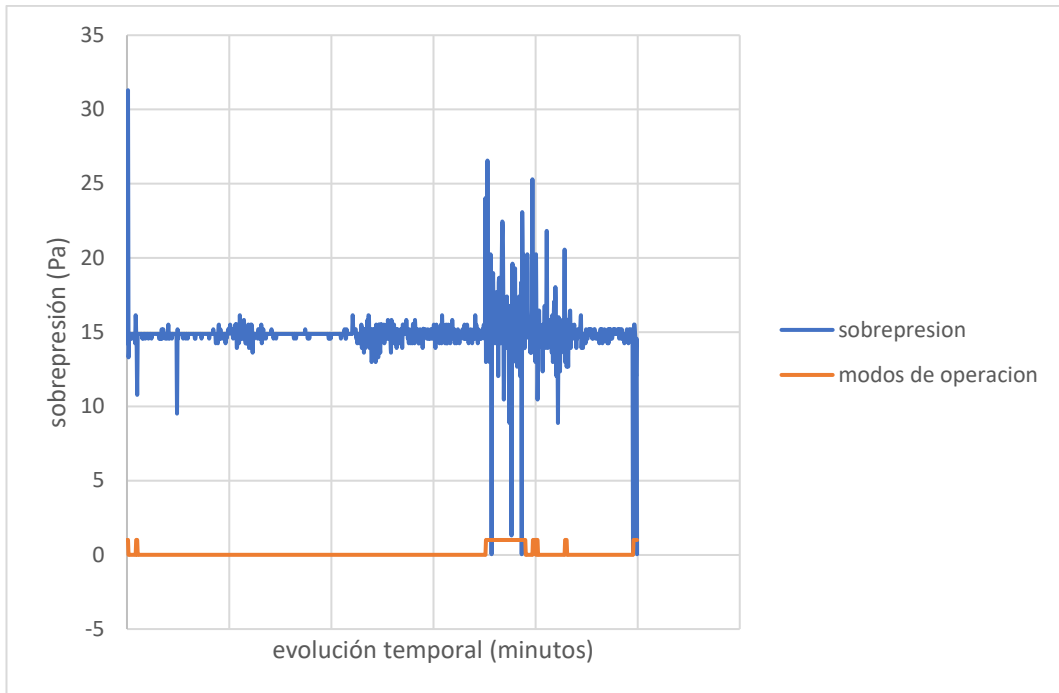


Gráfico 11: Quirófano 1 en enero del 2020. Consultar el resto de fechas en el anexo 1.

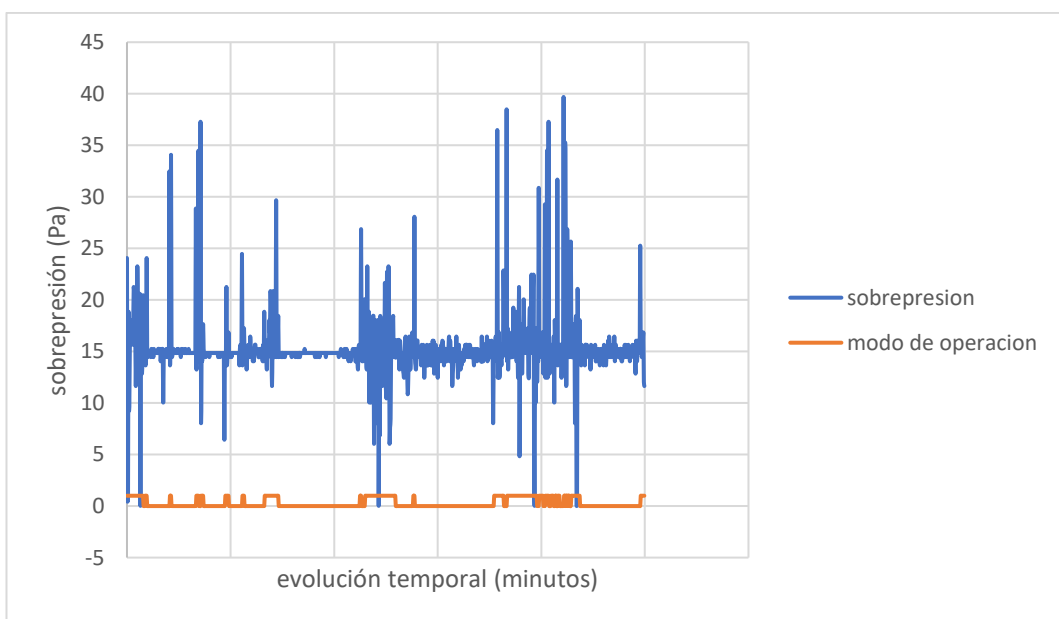


Gráfico 12: Quirófano 8 en enero del 2020. Consultar el resto de fechas en el anexo 1.

Como se puede apreciar, en ambos casos apenas hay dos o tres caídas aisladas de presión, que se deben a aperturas puntuales de las puertas y que no van a suponer un riesgo para el correcto funcionamiento del quirófano.

Cálculos y resultados

Ahorros de energía

Tabla 10: Ahorros térmicos y eléctricos

			total termico (kWh)	ahorro ventiladores	ahorro enfriamiento (kWh)	total electrico (kWh)	emisiones totales (kgCO ₂)
ENSAYO 1-Enero 2019	Q1	normal	408	11	0	96	115
		setback					
	Q8	normal	274	15	0	15	61
		setback					
ENSAYO 2-Abril 2019	Q1	normal	0	0	0	0	0
		setback					
	Q8	normal	39	9	0	9	11
		setback					
ENSAYO 3-Enero 2020	Q1	normal	253	12	0	12	56
		setback					
	Q8	normal	224	15	0	15	51
		setback					
ENSAYO 4-Julio 2019	Q1	normal	75	11	160	45	30
		setback					
	Q8	normal	52	15	117	39	24
		setback					
ENSAYO 5-Agosto 2019	Q1	normal	104	9	340	79	48
		setback					
	Q8	normal	102	15	276	72	45
		setback					
ENSAYO 6-Diciembre 2019	Q1	normal	361	10	0	10	77
		setback					
	Q8	normal	644	16	0	16	137
		setback					

Como el ahorro térmico se debe en exclusiva al uso de calefacción, va a ser especialmente acuciado en los meses más fríos del año. Como se puede ver en la Tabla 10, los meses de diciembre y enero son mucho mayores que en julio y agosto (en verano también hay calefacción ya que por las noches la temperatura cae por debajo de la que se requiere en el interior). Además, el mes de marzo que estaría entre ambos casos extremos, tiene un valor intermedio, ya que, aunque sea necesaria la calefacción en todos los momentos del día, el salto térmico va a ser menor que en invierno.

Por otro lado, el ahorro eléctrico va a constar de dos elementos: los ventiladores y la enfriadora, que va a tener un efecto inverso al del ahorro térmico, ya que en los meses de invierno es 0 porque no hay que enfriar en ningún momento del día mientras que en los meses de verano si alcanza un consumo considerable. Por otro lado, siempre que se entra en modo *setback* habrá un ahorro en los ventiladores, pues al disminuir el aire impulsado al interior, bajará su frecuencia de giro y con ello su consumo energético.

Como puntualización, en el quirófano 1 del ensayo 2 no hubo ningún ahorro de energía ya que mientras se registraron los datos no se entró en ningún momento en modo *setback*.

Por razones ajenas a este estudio, la recogida de datos del experimento dos (abril 2019) se produjo con intervalos de un minuto, por lo que en ese experimento se presentan los ahorros energéticos en un periodo de tiempo cinco veces menor al del resto de experimentos (en el resto los intervalos son de cinco minutos).

Reducción de emisiones de CO₂

La Tabla 11 (IDAE, 2012) muestra la cantidad de CO₂ que se emite en relación a la energía primaria consumida dependiendo de cuál sea esta. Es especialmente interesante para poder poner en contexto la disminución de emisiones de CO₂ gracias a la utilización de *setback*, que es uno de los puntos de más interés a la hora de estudiar estrategias de ahorro de energía y que, por tanto, refuerza el interés y la importancia de este trabajo.

Tabla 11: Comparativa de las emisiones de CO₂ para diferentes fuentes primarias de energía, tanto para energía térmica como eléctrica (IDAE, 2012)

		Energía primaria (kWh/kWh)	Emisiones de CO ₂ (g CO ₂ /kWh)
Energía térmica	Gas natural	1,01	204
	Gasóleo C	1,081	287
	GLP	1,081	244
	Carbón (doméstico)	1	347
	Biomasa	neutro	0
	Biocarburantes	neutro	0
	Solar térmica	0	0
Energía eléctrica	Convencional peninsular	2,603	649
	Convencional insular	3,347	981
	Solar fotovoltaica	0	0
	Horas valle peninsular	2,022	517
	Horas valle insular	2,247	981

La Tabla 12 presenta las emisiones totales que se han reducido con la implantación del sistema *setback*. Este cálculo se ha hecho aplicando la ecuación 13 en la cual, a partir de la energía que se ahorra en el acondicionamiento del aire y la variación de la frecuencia de giro de los ventiladores, y teniendo en cuenta la energía primaria de estos procesos, se multiplican las cantidades de energía que no ha sido necesario utilizar por el correspondiente factor *emisión de CO₂/Energía* de la Tabla 11.

Al ser gas natural la fuente de energía primaria para obtener energía térmica, se emitirán 204g de CO₂ por cada kWh de energía requerida. Por otro lado, las emisiones debidas al consumo eléctrico son de 331 g CO₂ por cada kWh de energía requerida (IDAE, 2012). Para poder comparar entre sí los resultados de cada experimento, todos los tiempos de experimentación fueron 787 periodos de 5 minutos.

Por razones ajenas a este estudio, la recogida de datos del experimento dos (abril 2019) se produjo con intervalos de un minuto, por lo que en ese experimento se presentan los kilogramos de CO₂ no emitidos en un periodo de

tiempo cinco veces menor al del resto de experimentos (en el resto los intervalos son de cinco minutos).

Tabla 12: Recopilación de las emisiones reducidas en los diferentes quirófanos

Caso de ensayo		Reducción total de emisiones (kgCO ₂)
ENSAYO 1-Enero 2019	Q1	115,10
	Q8	60,80
ENSAYO 2-Abril 2019	Q1	0,00
	Q8	10,90
ENSAYO 3-Enero 2020	Q1	55,60
	Q8	50,50
ENSAYO 4-Julio 2019	Q1	30,10
	Q8	23,70
ENSAYO 5-Agosto 2019	Q1	47,50
	Q8	44,6
ENSAYO 6-Diciembre 2019	Q1	77,00
	Q8	136,70

Destacan principalmente los meses de invierno (diciembre y enero), donde el ahorro por calentar menor cantidad de aire es especialmente alto, con lo que se consigue una reducción importante del gas natural quemado en la caldera y con ello, de las emisiones de CO₂ emitidas. Por otro lado, se encuentran los meses de verano, en los cuales, la reducción de emisiones se va a deber al uso de las enfriadoras y aunque los valores son claramente inferiores, no son en ningún caso despreciables.

Estimación anual de ahorro

Tras haber hecho un estudio en quirófanos reales, se plantea ir un poco más allá y tratar de dar una estimación anual. Para ello, había distintas opciones, como registrar todas las medidas durante o incluso plantear un escenario futuro en el que se muestren los efectos del cambio climático, sin embargo, se ha decidido extraer las características de un año tipo en la zona climática de Valladolid, que es la D2 (CTE, 2021) y se han planteado diversas hipótesis:

Primeramente, se ha decidido que el quirófano fuese de urgencia, por lo que se plantea que funcione 8 horas todos los días del año, incluso los festivos, ya que este va a ser el escenario más restrictivo al que podríamos enfrentarnos, porque va a estar el quirófano el mayor tiempo posible ocupado. Se van a suponer unos horarios de funcionamiento de 7:00 a 15:00, ya que refleja el efecto tanto de las horas con temperaturas más frías de primera hora de la mañana, como el de las horas centrales del día que son las más calientes.

Como segunda hipótesis, se considera que cuando el quirófano está operativo, la impulsión es de 2400m³/h mientras que cuando no esté operativo, se estará en *setback* (impulsión de 1500m³/h).

Como tercera y última hipótesis, al ser todos los cerramientos de los quirófanos interiores, y al impulsarse todo el aire desde espacios contiguos (donde se estima que supone unas características del aire constantes de 23°C de temperatura y un 40% de humedad relativa) se va a estimar que estas van a ser también las características de la impulsión en todo momento.

A partir de estas hipótesis se han repetido los cálculos hechos en los ensayos y, a partir de ellos, se ha elaborado la Tabla 13, que recoge los datos de ahorros térmicos y eléctricos, así como las emisiones reducidas de CO₂ a lo largo de un año por quirófano.

Tabla 13: Estimación del ahorro anual con la estrategia de setback

ahorro térmico[kWh]	26517,3513
ahorro eléctrico[kWh]	461,776535
emisiones [kgCO ₂]	6144,91137

Una de las estimaciones más interesantes de la tabla 10 es el ahorro térmico, pues supone más de 26.000kWh. Para contextualizarlo, se ha hecho el cálculo del consumo total que se produciría anualmente en un quirófano si no hubiera *setback*, es decir, la cantidad de energía térmica que habría que suministrar para calentar el quirófano de forma que la temperatura que llega del exterior se impulse al interior del quirófano a la temperatura de consigna de 23°C (véase en la fórmula 14).

$$\text{Consumo térmico} = \sum \Delta i_{cal_{sensible}} * (\dot{V}_{imp}) * \frac{1}{v_e} * \Delta t * \frac{1}{\eta} \quad [\text{kWh}] \quad [14]$$

Se calcula entonces que serían necesarios un total de 111516 kWh sin *setback*, es decir, que el ahorro supone nada menos que un 23,78% de la energía requerida en la calefacción de cada quirófano, o lo que es lo mismo, la estimación teórica dice que casi un cuarto de la energía que se emplea para calentar el quirófano no sería necesaria, con el consiguiente ahorro económico, en energía primaria, y medioambiental, por la reducción de emisiones de CO₂. Otro aspecto positivo además de que estos datos sean tremendamente favorables a la implantación de esta estrategia es que hay que tener en cuenta que este es un caso extremo en el que el quirófano funciona 8 horas diarias durante todos los días del año, lo cual no se ajusta al comportamiento real del quirófano, cuya ocupación dependerá fundamentalmente de las necesidades puntuales en cada momento. Esto claramente beneficia la implantación de la estrategia *setback*, puesto que, con el modelo propuesto, al estar más horas operativas el quirófano, habrá menos en modo *setback* y, por tanto, los cálculos muestran ahorros menores a los que se van a producir en la realidad. Dicho de otra manera, los beneficios reales de aplicar esta estrategia van a ser superiores a los cálculos teóricos.

Por otro lado, cabe destacar una reducción en emisiones de CO₂ superior a las 6 toneladas. Para contextualizar la magnitud de este ahorro, y teniendo en cuenta que en el 2020 la media de emisiones por kilómetro que emite un coche en la Unión Europea son 123g (Europapress, n.d.), la reducción de emisiones de CO₂ sería el equivalente a recorrer casi 50.000 kilómetros en línea recta.

Extrapolación a todo el hospital

Después de haber planteado una estimación anual de la demanda energética en un quirófano hipotético, se va a tratar de hacer un estudio más pormenorizado. El hospital universitario Río Hortega cuenta con:

- 12 quirófanos "normales"
- 4 quirófanos "normales" pero que se usan para cirugía menor ambulatoria
- 1 quirófano de obstetricia
- 1 quirófano de quemados.

Se ha registrado la ocupación en intervalos de 10 minutos en 14 de los quirófanos durante una semana completa entre el 20 y el 27 de julio de 2021 y con ello se va a tratar de comprobar si el quirófano tipo se adapta al funcionamiento real.

Tabla 14: Ocupación en intervalos de 10 minutos de los quirófanos del hospital universitario Pío del Río Hortega

Quirófano	Periodos	Lunes	martes	miércoles	jueves	viernes	sabado	domingo
Q1-1	547	93	75	86	102	80	30	81
Q1-2	157	40	13	22	41	37	2	2
Q2-1	374	55	72	76	63	64	19	25
Q2-2	194	40	37	46	48	19	2	2
Q3-1	334	57	52	57	50	47	18	53
Q4-1	291	51	47	60	52	41	9	31
Q4-2	261	51	40	47	53	48	2	20
Q5-1	236	30	44	49	40	44	4	25
Q6-1	261	42	46	61	51	48	5	8
Q8-1	239	43	51	49	50	42	1	3
Q9-1	245	44	49	52	50	47	0	3
Q10-1	307	57	43	69	69	34	8	27
Q11-1	317	60	65	60	76	52	1	3
Q12-1	287	40	52	65	65	58	1	6

Una ocupación de 8 horas diarias como la que se supuso en el apartado anterior supondría 48 periodos de 10 minutos diarios siendo un total de 336 periodos a lo largo de una semana. Como se puede comprobar en la Tabla 14, varios de estos quirófanos responden aproximadamente a este funcionamiento, aunque hay que destacar, en durante los fines de semana la ocupación es mucho menor que durante los días laborables y por tanto esa diferencia de tiempo es absorbida el resto de los días de la semana. Además, las horas a las que los quirófanos están ocupados, sí que se asemejan al horario planteado, puesto que se empieza a entrar en funcionamiento entre las 7 y las 8 de la mañana.

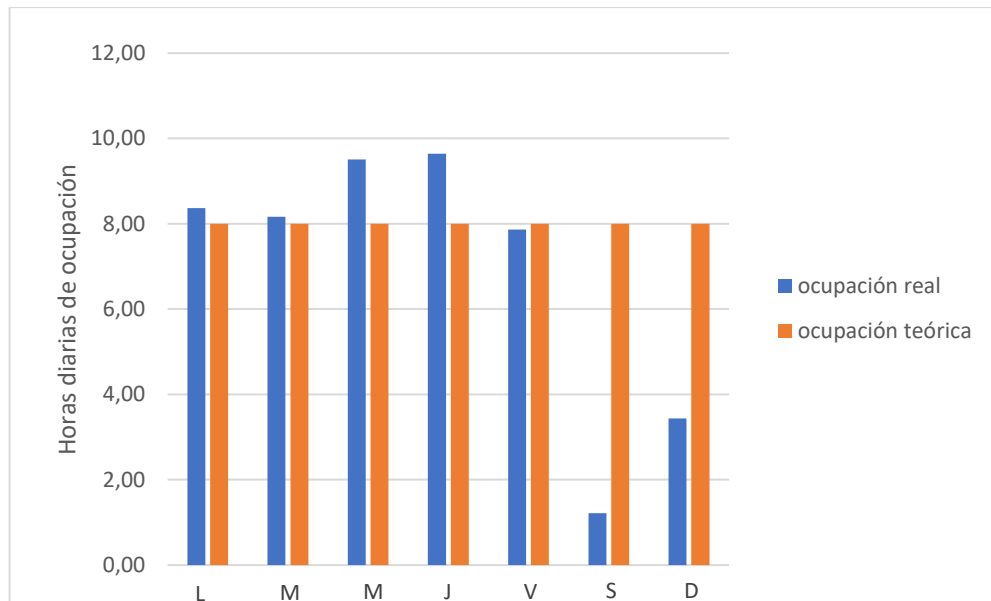


Gráfico 13: Comparativa de la ocupación en quirófanos del modelo teórico y el real

El Gráfico 13 muestra un histograma donde se representa la ocupación de los quirófanos a lo largo de la semana. En naranja, se muestra el modelo teórico, donde se comprueba que todos los días se ocupa exactamente 8 horas. Por otro lado, en azul, se representa la media de horas que están ocupados los quirófanos cada día de la semana. Claramente, de lunes a viernes hay una coincidencia horaria muy buena, por lo que el modelo se ajusta al funcionamiento real de manera satisfactoria. Los fines de semana, no se ajustan bien al modelo real, sin embargo, esto no es un problema, puesto que al estar ocupados los quirófanos más tiempo, habrá *setback* durante menos y, por tanto, en todos los cálculos representados, se estarán subestimando ahorros, por lo que la implantación de *setback* reducirá la demanda energética siempre más o como mínimo igual a lo presentado en los próximos cálculos.

Con estos datos, se va a tratar de extrapolar el comportamiento del quirófano tipo al resto de quirófanos y ver así el efecto global en todo el hospital. Para ello, lo primero que se va a hacer es comprobar que la media semanal de horas por quirófano sea comparable a las del quirófano tipo. La media de los 14 quirófanos es de 48,2 horas semanales, lo cual es aceptable porque el modelo tipo correspondería a 56 horas semanales, o lo que es lo mismo, menos de una hora de media diaria de diferencia. En este estudio, se va a suponer que esa diferencia es aceptable, ya que, en este aspecto, seguimos subestimando ahorros, y por tanto los reales seguirán siendo mayores.

Centrándonos en cada quirófano de manera particular, sí que se pueden encontrar grandes diferencias: En primer lugar, hay un día en concreto que el quirófano 9 no funciona en ningún momento y esto puede deberse a cuestiones de limpieza, reparaciones... en cualquier caso, por razones ajenas a nuestro estudio.

Por otro lado, el quirófano 1 llega a estar operativo semanalmente más del doble de tiempo que otros, lo que podría comprometer la validez del estudio. Sin embargo, al tratar el funcionamiento real de los quirófanos como la media de todos ellos, no buscamos reflejar el comportamiento particular de uno solo, sino el general del conjunto y así poder comparar su demanda energética y sus emisiones con las del hospital entero.

$$Ahorro_{total} = quirófanos_{totales} * Ahorro_{estimado}_{quirófano} \quad [15]$$

Siendo el ahorro la energía térmica o eléctrica reducida o las emisiones no emitidas.

Por otro lado $quirófanos_{totales}$ es 14, que es la cantidad de quirófanos que hay.

Tabla 15: Ahorros anuales por quirófanos

	Ahorros totales
Termico [kWh]	371242,9
Eléctrico kWh]	6464,9
Emisiones [kgCO ₂]	86028,8

En la Tabla 15, se muestra la estimación total tanto de ahorros energéticos como de emisiones de CO₂ y los datos que se extraen de ella serán comparados con las demandas energéticas de todo el hospital, reflejadas en Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 16: Gastos energéticos y económicos por gas natural en 2019 en el hospital Río Hortega

GAS NATURAL				
2019				
	kWh 2019	€ 2.019	€/kWh	Tª
ENERO	4.003.882 kWh	133.296,81 €	0,033 €	3,5 °C
FEBRERO	2.785.423 kWh	112.977,23 €	0,041 €	7,0 °C
MARZO	2.388.840 kWh	95.572,61 €	0,040 €	9,6 °C
ABRIL	2.150.468 kWh	87.324,09 €	0,041 €	10,7 °C
MAYO	1.388.188 kWh	60.946,47 €	0,044 €	15,8 °C
JUNIO	824.027 kWh	41.424,47 €	0,050 €	20,2 °C
JULIO	395.658 kWh	26.601,38 €	0,067 €	24,0 °C
AGOSTO	483.501 kWh	29.641,06 €	0,061 €	22,9 °C
SEPTIEMBRE	847.031 kWh	42.220,49 €	0,050 €	18,3 °C
OCTUBRE	1.186.161 kWh	53.955,62 €	0,045 €	14,1 °C
NOVIEMBRE	2.481.383 kWh	98.784,70 €	0,040 €	7,3 °C
DECIEMBRE	3.316.189 kWh	130.967,71 €	0,039 €	5,5 °C
	22.250.751 kWh	913.712,64 €	0,041 €	158,9 °C
				13,2 °C

Tabla 17: Gastos energéticos y económicos por electricidad en 2019 en el hospital Río Hortega

ELECTRICIDAD			
2019			
	kWh 2019	€ 2.019	€/kWh
ENERO	1.191.217 kWh	149.325,16 €	0,125 €
FEBRERO	1.054.915 kWh	133.232,99 €	0,126 €
MARZO	1.137.758 kWh	124.153,94 €	0,109 €
ABRIL	1.095.380 kWh	130.947,25 €	0,120 €
MAYO	1.224.715 kWh	145.031,93 €	0,118 €
JUNIO	1.396.091 kWh	206.257,51 €	0,148 €
JULIO	1.598.381 kWh	251.407,31 €	0,157 €
AGOSTO	1.484.472 kWh	159.738,72 €	0,108 €
SEPTIEMBRE	1.220.980 kWh	152.395,50 €	0,125 €
OCTUBRE	1.198.416 kWh	143.248,09 €	0,120 €
NOVIEMBRE	1.115.636 kWh	137.553,34 €	0,123 €
DECIEMBRE	1.147.893 kWh	156.862,28 €	0,137 €
	14.865.854 kWh	1.890.154,02 €	0,127 €

Tras comparar los gastos energéticos y eléctricos anuales del hospital Río Hortega con la previsión hecha por el uso de la estrategia setback, encontramos que se podría ahorrar un 1,67% del gas natural total de todo el hospital y un 0,043% de electricidad. Todo esto supone un ahorro anual de

16.080€ y más de 86 toneladas de CO₂. Con estos datos, se puede apreciar claramente el efecto que supone introducir esta estrategia de ahorro energético, que, sin precisar una inversión inicial, es capaz de repercutir de manera significativa en la demanda energética de un hospital de grandes dimensiones y reducir enormemente las emisiones de CO₂.

Conclusiones

Conclusión general

Primeramente, en cuanto al objetivo general, se ha comprobado que la reducción de la demanda energética no ha condicionado el correcto funcionamiento de los quirófanos y, por tanto, no supone problema alguno en el desempeño de las actividades llevadas a cabo en el interior. El uso de *setback* será especialmente recomendable en quirófanos con una ocupación baja, pues será mayor la cantidad de tiempo en el que la ventilación es reducida y, por tanto, la demanda de energía necesaria para acondicionarlos será menor. Además, en zonas en las que la temperatura exterior difiera mucho a las necesarias en el interior, y por tanto haya un gran salto térmico, el uso de *setback* reducirá la cantidad de aire que tendría que ser acondicionado mediante un alto gasto energético. A pesar de ello, es necesaria la valoración particular en cada caso.

Conclusiones específicas

Tras haber podido demostrar que la estrategia de *setback* reduce la demanda de energía, es interesante comparar los resultados obtenidos con la literatura existente. Al ser muy escasa y combinar la ventilación reducida con otras posibles estrategias de ahorro de energía, es complicado hacer una comparación directa de los resultados obtenidos. Lo que sí es reseñable, es que en los estudios relacionados con *setback* y con otras estrategias de ahorro de energía, es muy frecuente introducir recirculación del aire, lo cual no es factible en instalaciones hospitalarias ya que, a pesar de reducir la demanda energética, podría suponer riesgos para mantener la calidad del interior requerida, como en el caso de los quirófanos. Este estudio, por tanto, tiene el valor extra de estar en todo momento del lado de la seguridad frente a un posible ahorro mayor.

A partir del punto anterior, el siguiente paso ha sido asegurar que la estrategia de ventilación reducida no implicaba un riesgo en materia de salubridad e higiene. Para ello, el aspecto central respecto a este objetivo específico ha sido el de garantizar que no se bajaba de una sobrepresión mínima, que pudiera conllevar infiltraciones de aire no deseadas. Se propuso que aquellos instantes en los que la sobrepresión bajara de los 5 Pa desde los 15 Pa que es lo estándar, fueran considerados no aceptables y por tanto estudiar estos casos específicos. Tras haber analizado estos valores en los diferentes ensayos, apenas había caídas puntuales, que además eran achacables a aperturas de puertas por limpieza y que en ningún caso se consideran como riesgo ante la posible pérdida de higiene del quirófano. Este criterio de sobrepresión elegido no es nuevo, pues en la literatura existente ya se maneja en estudios como (Sánchez-Barroso Moreno et al., 2019), en el que se establece que la

sobrepresión tiene que situarse entre 5 y 20 Pa, situación menos restrictiva que la que se plantea en este documento.

Como parte central del estudio, se ha conseguido demostrar los grandes beneficios que supone la implantación del sistema *setback*. Por un lado, la cantidad de energía ahorrada supone claramente la justificación económica de la implantación del sistema permitiendo un ahorro en electricidad y combustible que supondrá una importante reducción de costes de operación del hospital. Se ha estimado una reducción superior a 26500 kWh anuales en la demanda energética por calefacción de acuerdo con el modelo teórico anual planteado, lo que supondría un ahorro de más de un tercio de la demanda prevista anual. Además, estos ahorros de energía suponen evitar la emisión de toneladas de CO₂, aspecto de especial interés actualmente no solo en España, sino también en la Unión Europea para llegar a alcanzar los objetivos marcados en la agenda 2030. En concreto, dejarían de ser emitidas más de 6 toneladas anualmente, lo que supondría un argumento ecológico suficientemente potente como para que la estrategia de ventilación reducida sea aplicada.

Bibliografía

- A. Díaz. (2019). *Población adscrita a los hospitales públicos de Castilla y León 2019*.
<https://es.statista.com/estadisticas/1139929/poblacion-adscrita-a-los-hospitales-publicos-de-castilla-y-leon/#statisticContainer>
- Academy, K. (n.d.). *El comportamiento no ideal de los gases*. Retrieved May 22, 2021, from
<https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/gases-and-kinetic-molecular-theory-ap/ideal-gas-laws-ap/a/non-ideal-behavior-of-gases>
- AEMET. (2021). *Valores extremos.Valladolid*.
http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/efemerides_extremos*w=0&k=cle&l=2422&datos=det&x=2422&m=13&v=TMX&v=Tmn
- Bawaneh, K., Ghazi Nezami, F., Rasheduzzaman, M., & Deken, B. (2019). Energy Consumption Analysis and Characterization of Healthcare Facilities in the United States. *Energies*, 12(19).
<https://doi.org/10.3390/en12193775>
- Cacabelos-Reyes, A., López-González, J. L., González-Gil, A., Febrero-Garrido, L., Eguía-Oller, P., & Granada-Álvarez, E. (2020). Assessing the Energy Demand Reduction in a Surgical Suite by Optimizing the HVAC Operation During Off-Use Periods. In *Applied Sciences* (Vol. 10, Issue 7).
<https://doi.org/10.3390/app10072233>
- Çengel, Y. (2007). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA. Un enfoque práctico* (McGraw-Hill (Ed.); 3ª edición).
https://www.u-cursos.cl/usuario/cfd91cf1d8924f74aa09d82a334726d1/mi_blog/r/Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Yunus_Cengel_-_Tercera_Edicion.pdf
- Chen, Y. (2018). Study on energy-saving design and operation of hospital purification air conditioning system. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 13(2), 184–190.
<https://doi.org/10.1093/ijlct/cty013>
- Comunitat Valenciana. (2021). *Etiqueta de eficiencia energética*.
<https://gcee.aven.es/es/etiqueta-energetica>
- CTE. (2021). *Archivo de datos de todas las zonas climáticas-DB ahorro de energía*.
EN 779:2012. (2012).
- Europapress. (n.d.). Las emisiones medias de CO2 de los coches europeos suben un 1,8% en 2019, hasta 123 gramos por kilómetro. *Europapress*.
<https://www.europapress.es/motor/sector-00644/noticia-emisiones-medias-co2-coches-europeos-suben-18-2019-123-gramos-kilometro-20200831101636.html>
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2010). *Guía de Ahorro y Eficiencia Energética*.
- González-Gil, A., López-González, J. L., Fernández, M., Eguía, P., Erkoreka, A., & Granada, E. (2018). Thermal energy demand and potential energy savings in a Spanish surgical suite through calibrated simulations. *Energy and Buildings*, 174, 513–526.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.059>
- González González, A., García-Sanz-Calcedo, J., & Salgado, D. R. (2018). A quantitative analysis of final energy consumption in hospitals in Spain. *Sustainable Cities and Society*, 36, 169–175.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.029>
- IDAE. (2012). *Ahorro y eficiencia energética en climatización-Instalaciones de climatización con equipos autónomos*.
- INE. (2019). *España en cifras 2019*.

- Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo. (2010). *Ventilación general en hospitales*.
- Lazzarin, R., & Narini, L. (2015). *Humectación del aire* (CAREL (Ed.)). CAREL.
- Ministerio de Fomento. (2019). *Informe sobre tipologías, actuaciones de mejora y potenciales ahorros en el parque edificatorio del sector terciario* (p. 132). Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo.
- Ministerio de Sanidad Gobierno de España. (2009). *Estándares y recomendaciones*. www.msps.es
- Ministerio para la transición ecológica. (2019). *ESTADO DE LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE LOS EDIFICIOS (8º Informe)*.
- Parlamento Europeo. (n.d.). *La eficiencia energética*. Retrieved July 8, 2021, from <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/69/la-eficiencia-energetica>
- Rey Martínez, F. J., San José Alonso, J. F., Velasco Gómez, E., Tejero González, A., Esquivias, P. M., & Rey Hernández, J. M. (2020). Energy Consumption Reduction of a Chiller Plant by Adding Evaporative Pads to Decrease Condensation Temperature. In *Energies* (Vol. 13, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/en13092218>
- SACYL. (2021). *Área de influencia del Hospital Universitario Río Hortega*. <https://www.saludcastillayleon.es/HRHortega/es/area-influencia>
- Sánchez-Barroso Moreno, G., García-Sanz Calcedo, J., G. González, A., & R. Salgado, D. (2019). *Sustainable solutions for thermal energy saving in hospital operating theatres*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198501002>
- Tejero-González, A., DeFreitas-Barros-Galvão, V. M., Zarzuelo-Sánchez, A. M., & SanJosé-Alonso, J. F. (2021). Energy use optimization in ventilation of operating rooms during inactivity periods. *Building Research & Information*, 49(3), 308–324. <https://doi.org/10.1080/09613218.2020.1817723>
- U.S. Energy Information Administration. (2021). *Annual Energy Outlook 2021*.
- UNE-EN 16798-3. (2018).
- UNE-EN ISO 14644-1:2000. (2000).
- UNE 100713:2005. (2005).
- Valverde Lorenzo, E., Tejero Gonzalez, A., & Esquivias Fernández, P. M. (2020). *TFM: CARACTERIZACIÓN DE LAS FUGAS DE AIRE EN RECUPERADORES ROTATIVOS SENSIBLES A PARTIR DE MEDIDAS DE HUMEDAD. CASO DE ESTUDIO*. Universidad de Valladolid.

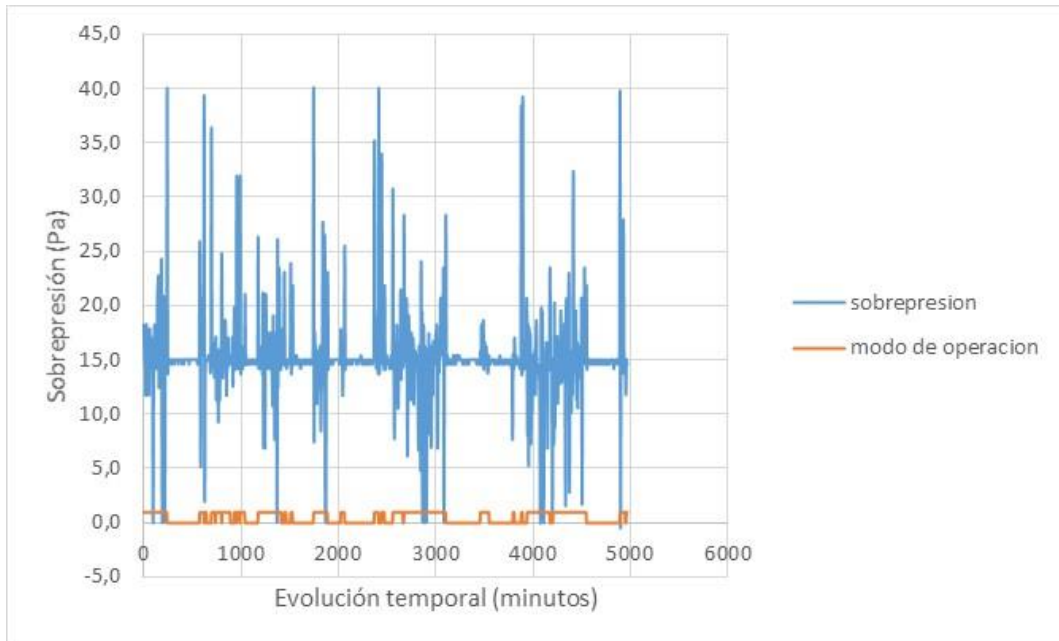
Anexo

A continuación, se va a presentar un anexo a este trabajo en el cual se van a detallar las condiciones de los experimentos en cada uno de los quirófanos. Para ello, en las gráficas que se van a mostrar aparecen representados la sobrepresión frente al modo de operación en intervalos de cinco minutos. El principal interés radica en apreciar todo lo desarrollado en el subapartado comprobación de los criterios de seguridad del apartado de resultados y discusión, en el cual se ha estudiado si las caídas puntuales de la sobrepresión podrían comprometer la seguridad de la estrategia *setback*. En la tabla 7 se recogió el análisis de estos datos y, además, se concluyó que la estrategia no ponía en peligro las condiciones de higiene y salubridad que se requieren dentro de un quirófano.

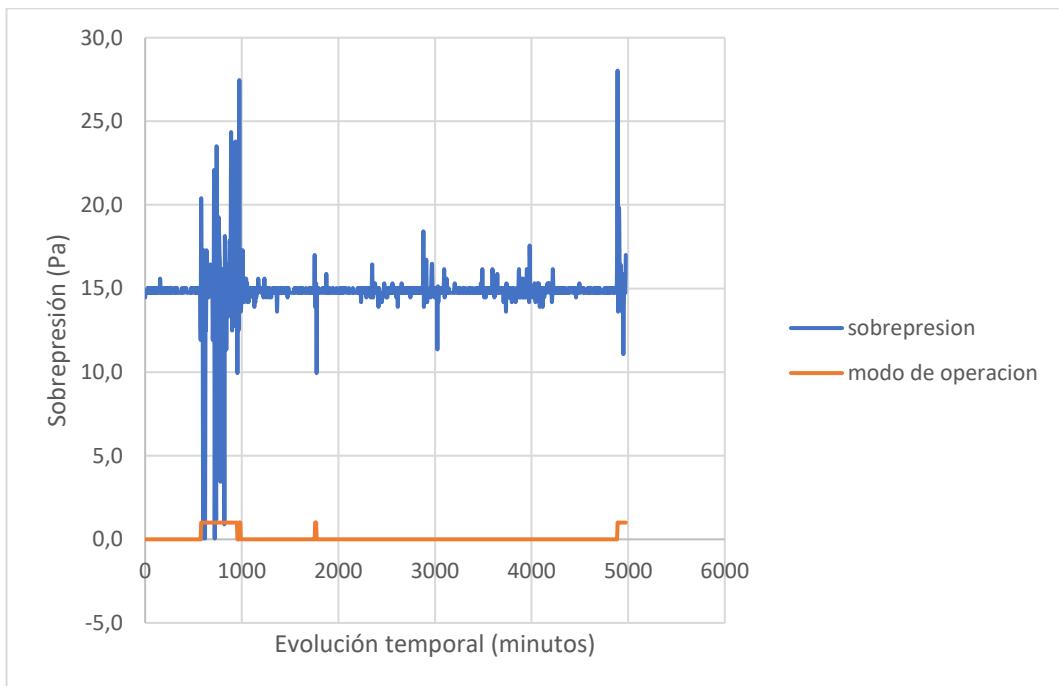
Índice de gráficos del anexo

Anexo 1-Gráfico 1: Sobrepresión en el quirófano 1. Agosto 2019.....	59
Anexo 1-Gráfico 2: Sobrepresión en el quirófano 8. Agosto 2019.....	59
Anexo 1-Gráfico 3: Sobrepresión en el quirófano 8. Diciembre 2019	60
Anexo 1-Gráfico 4: Sobrepresión en el quirófano 8. Diciembre 2019	60
Anexo 1-Gráfico 5: Sobrepresión en el quirófano 1. Marzo 2019.....	61
Anexo 1-Gráfico 6: Sobrepresión en el quirófano 8. Marzo 2019.....	61
Anexo 1-Gráfico 7: Sobrepresión en el quirófano 1. Julio 2019.....	62
Anexo 1-Gráfico 8: Anexo 8: Sobrepresión en el quirófano 8. Julio2019	62
Anexo 1-Gráfico 9: Sobrepresión en el quirófano 1. Enero2019	63
Anexo 1-Gráfico 10: Sobrepresión en el quirófano 1. Enero2019	63

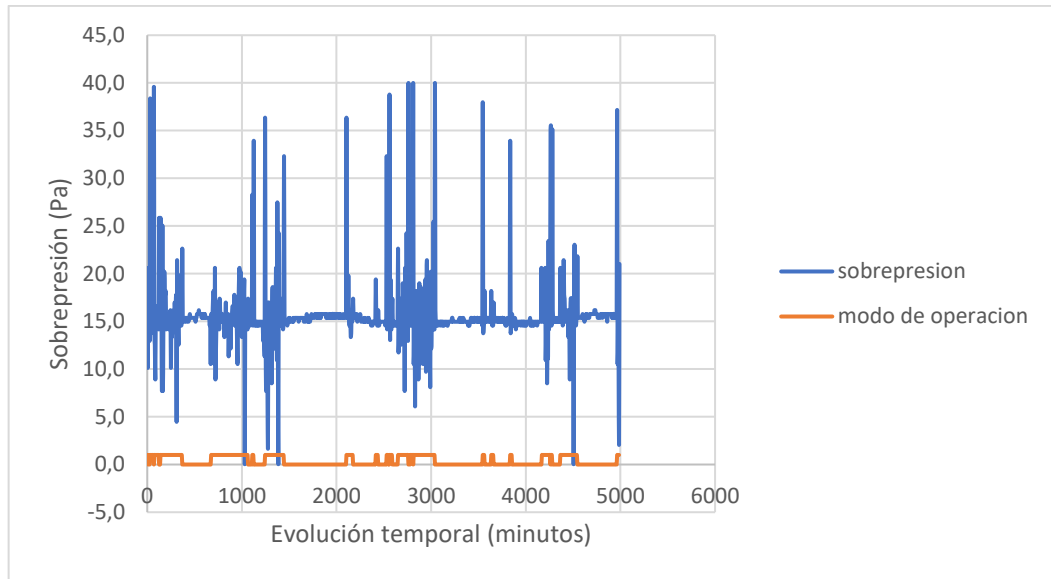
Anexo : Sobrepresión en cada experimento



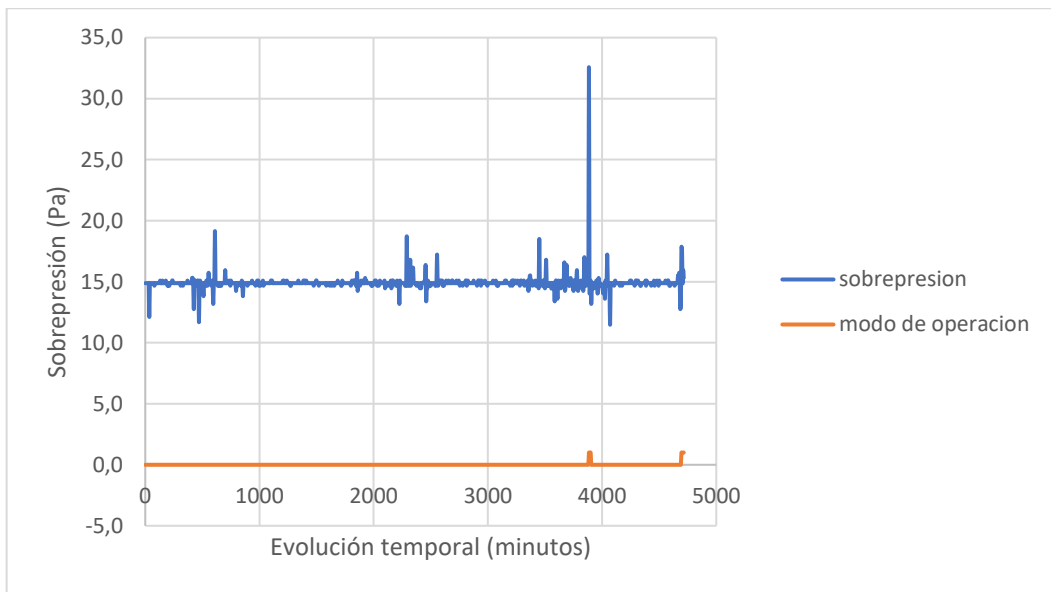
Anexo 1-Gráfico 1: Sobrepresión en el quirófano 1. Agosto 2019



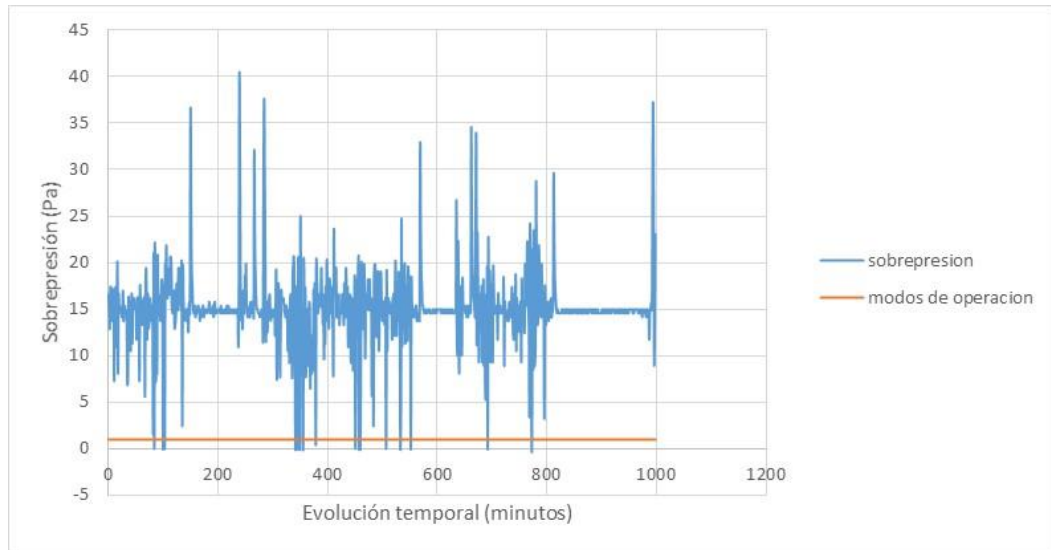
Anexo 1-Gráfico 2: Sobrepresión en el quirófano 8. Agosto 2019



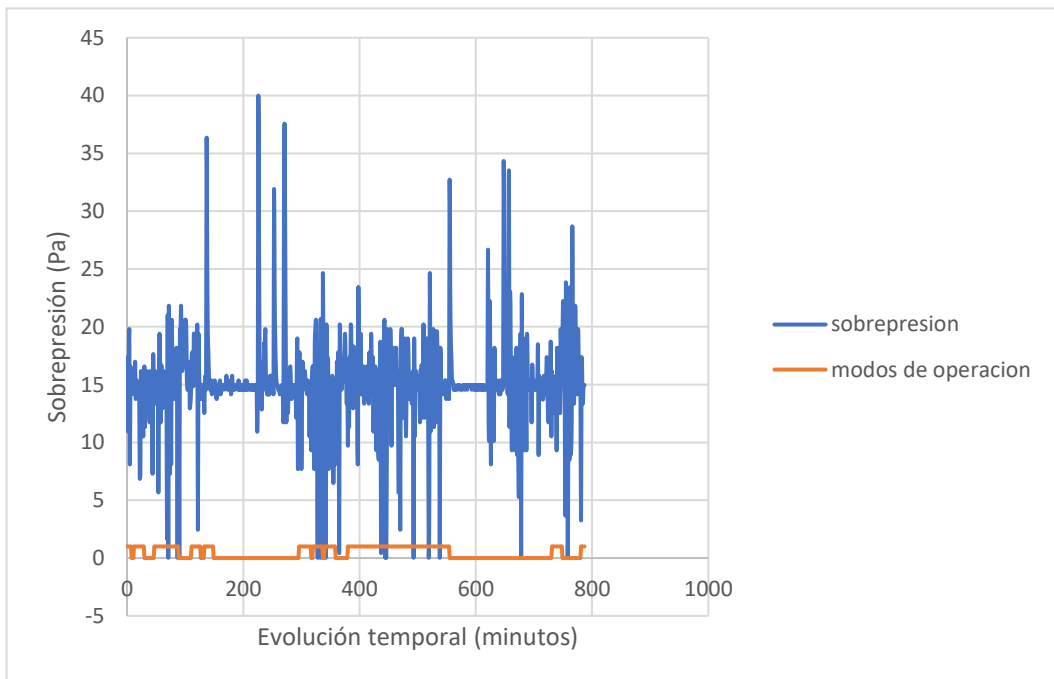
Anexo 1-Gráfico 3: Sobrepresión en el quirófano 8. Diciembre 2019



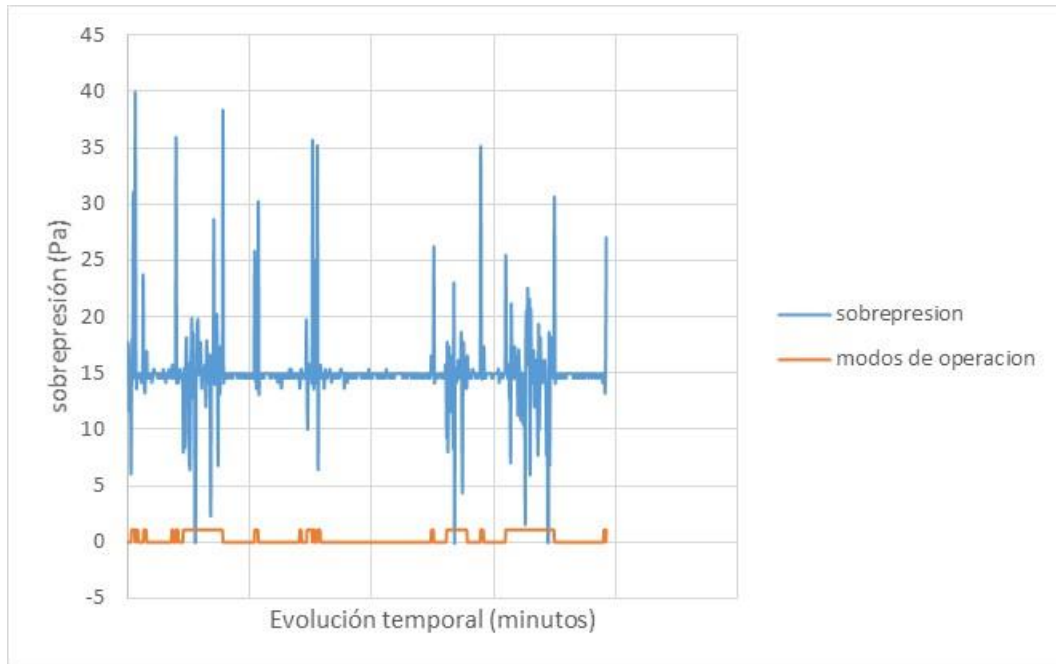
Anexo 1-Gráfico 4: Sobrepresión en el quirófano 8. Diciembre 2019



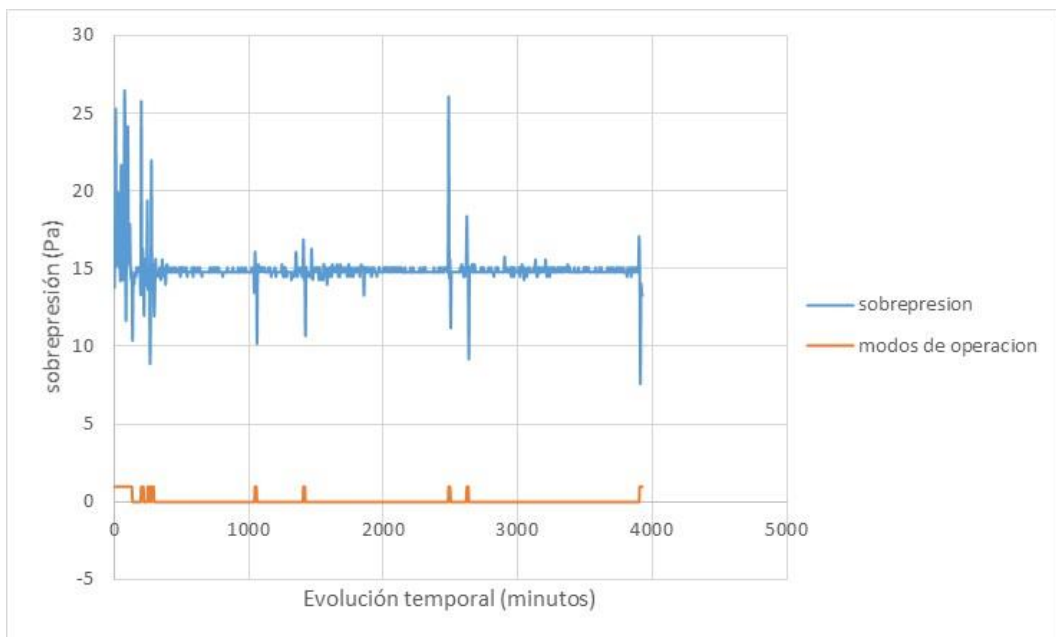
Anexo 1-Gráfico 5: Sobrepresión en el quirófano 1. Marzo 2019



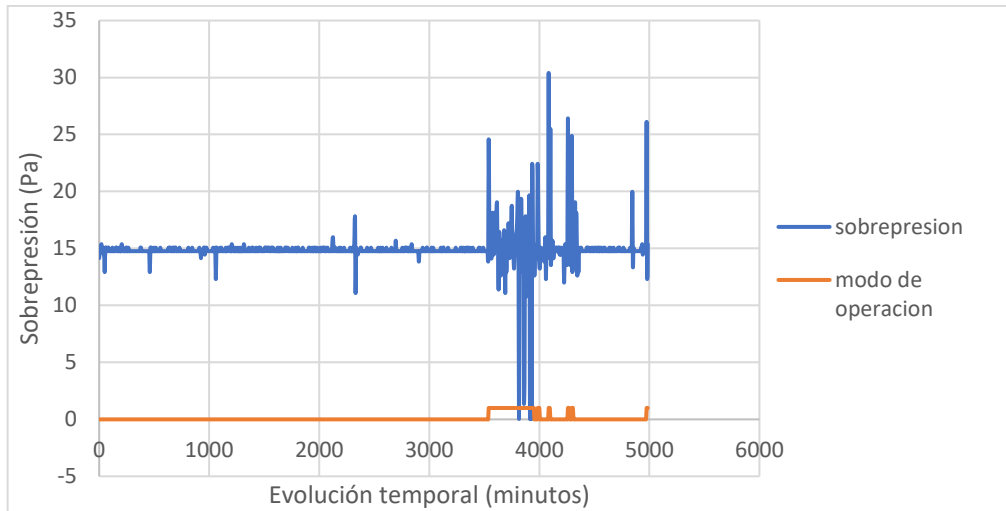
Anexo 1-Gráfico 6: Sobrepresión en el quirófano 8. Marzo 2019



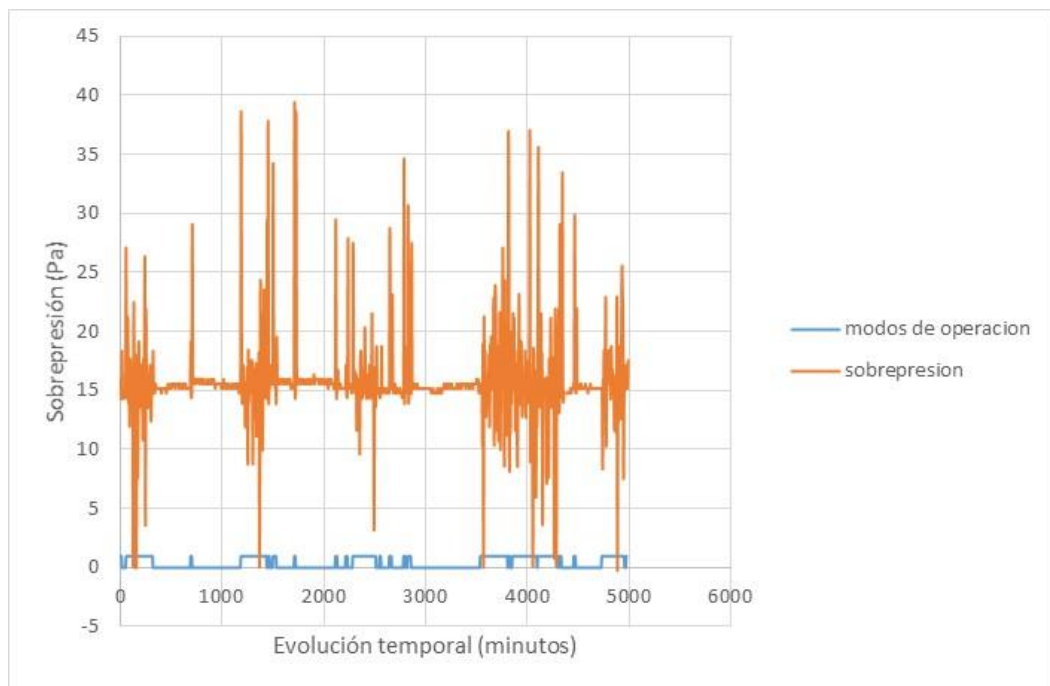
Anexo 1-Gráfico 7: Sobrepresión en el quirófano 1. Julio 2019



Anexo 1-Gráfico 8: Anexo 1: Sobrepresión en el quirófano 8. Julio 2019



Anexo 1-Gráfico 9: Sobrepresión en el quirófano 1. Enero2019



Anexo 1-Gráfico 10: Sobrepresión en el quirófano 1. Enero2019

