

05-034

VENTILATION SYSTEMS AND STRATEGIES IN EDUCATIONAL BUILDINGS: IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION

López Carreño, Rubén Daniel ⁽¹⁾; Tugores Garcias, Juan ⁽¹⁾; Pardo Bosch, Francesc ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de Catalunya, ⁽²⁾ Universitat Politècnica

Poor indoor air quality (IAQ) in scholar environments have been frequently reported as one of the most important factors affecting students' health and academic performance. In an average-size classroom, concentrations above the recommended CO₂ thresholds are commonly reached during a class. Considering that just in Spain, more than 8 million school-aged children spend approximately 1,300 hours a year inside a classroom like the aforementioned, the state and management of IAQ in scholar environments becomes critical. However, managing IAQ in schools still remains as a unique challenge specially if one wants to solve the difficult dilemma of balancing Indoor Air Quality with Thermal Comfort and Energy Consumption. For this reason, the objective of this communication is to identify characteristic ventilation strategies of educational buildings and carry out a comparative analysis of their operating modes through AHP. And with this, the different ventilation systems are compared and classified according to the most relevant evaluation parameters.

Keywords: Indoor Air Quality; IAQ; ventilation strategies; ventilation effectiveness

SISTEMAS Y ESTRATEGIAS DE VENTILACIÓN EN EDIFICIOS EDUCATIVOS: IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

La mala calidad del aire interior (CAI) en entornos escolares se ha identificado como uno de los factores que más afectan la salud y el rendimiento académico de los estudiantes. En un aula de tamaño promedio, las concentraciones por encima de los umbrales de CO₂ recomendados se alcanzan varias veces durante una clase. En España, más de 8 millones de niñ@s en edad escolar pasan aproximadamente 1.300 horas al año dentro de un aula, por ello la gestión del CAI en entornos escolares es crítico. Sin embargo, la gestión de la CAI en las escuelas sigue siendo un desafío por resolver, especialmente si se quiere abordar el difícil dilema de equilibrar la calidad del aire interior con el confort térmico y el consumo de energía. Por esta razón, el objetivo de esta comunicación es la identificar estrategias de ventilación características de los centros educativos y realizar un análisis comparativo de sus modos operativos mediante AHP. Y con ello, los diferentes sistemas de ventilación se comparan y clasifican según los parámetros más relevantes de evaluación.

Palabras clave: Calidad Aire Interior; CAI; estrategias de ventilación; efectividad de la ventilación

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer el apoyo recibido por la Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca a través de su programa de apoyo a grupos de investigación (2021SGR00341). Esta investigación se enmarca en el proyecto de I+D IAQ4EDU.



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

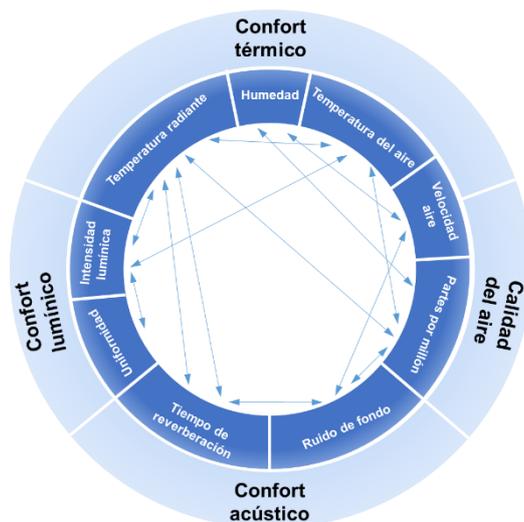
1. Introducción

La calidad del aire y el confort en interior de los centros educativos es esencial para el bienestar y la salud de estudiantes y docentes. La exposición continua a concentraciones elevadas de contaminantes, como el CO₂, puede ocasionar problemas como fatiga, dolores de cabeza, problemas respiratorios e incrementar el absentismo (Fraga et al., 2008; Simons et al., 2010; Choe et al., 2022). Además, también se ha observado una relación directa entre una buena calidad del aire y un mayor desempeño de los estudiantes (Wargocki et al., 2020).

En términos de confort, para garantizar un ambiente interior óptimo, se recomienda mantener la temperatura en el rango de 20° a 24° en invierno y de 23° a 26° en verano, así como la humedad relativa en el rango del 30% al 70% (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [INSHT], 2015). Al mantener estos rangos se favorece la salud y se reduce la propagación de virus y bacterias, minimizando así las infecciones respiratorias. Si estos valores se encuentran fuera de los rangos mencionados, se puede considerar que el ambiente deja de ser cómodo y saludable.

A modo ilustrativo, en la Figura 1 se puede observar el Círculo Ambiental propuesto por Montazami et al., (2015), quienes analizaron los aspectos claves para mantener el confort en las aulas. De acuerdo con él, existen cuatro factores principales que deben ser tenidos en cuenta en el diseño de los centros educativos: confort térmico, calidad del aire, confort acústico y confort lumínico.

Figura 1. Círculo ambiental (Adaptada de Montazami et al., 2015)



A su vez, estos factores agrupan un conjunto de nueve subfactores relacionados entre sí, lo que indica que puede existir un riesgo de conflicto entre ellos que podría dar pie a unas condiciones ambientales deficientes en las aulas e incluso a un uso excesivo de energía. De hecho, este último factor toma cada vez más relevancia y debería tratar de minimizarse en la

medida de lo posible, especialmente un contexto como el actual de España, donde en el año 2022 se aprobó el Real Decreto-Ley 14/2022, de 1 de agosto, que incluye medidas para el ahorro energético en climatización (BOE, 2022).

Así mismo, del Círculo Ambiental también se puede inferir que, sin una ventilación adecuada, resulta difícil garantizar un confort térmico y una calidad del aire aceptables. En el caso de los centros docentes, se ha observado que alrededor de un tercio del tiempo se superan los límites establecidos de CO₂ y durante dos tercios las temperaturas se sitúan fuera del rango de confort (Sánchez-Torija et al., 2022).

Teniendo en cuenta lo anterior, es evidente la necesidad de tomar medidas para mejorar la calidad del aire y el confort en estos espacios con el objetivo de reducir los impactos negativos de la exposición a un ambiente contaminado. El objetivo de este trabajo es realizar un estudio comparativo de los sistemas de ventilación predominantes en los centros educativos de Catalunya. Para ello se hace una breve descripción de ellos y se evalúan mediante un análisis multicriterio teniendo en cuenta aspectos económicos, sociales y medioambientales. Los resultados obtenidos establecen un punto de partida para seguir avanzando en la mejora de la calidad del aire y el confort térmico en el ámbito educativo.

2. Sistemas de ventilación en edificios educacionales

Los sistemas de ventilación de edificios se pueden clasificar en naturales, mecánicos e híbridos. Los naturales aprovechan las corrientes de aire que se producen al abrir ventanas, puertas y/u otras aberturas para generar un intercambio de aire entre el interior y el exterior. Los mecánicos utilizan equipos para inducir un flujo que introduzca o expulse el aire del edificio. Por último, la ventilación híbrida combina dos o más sistemas de ventilación, de los cuales por lo menos uno es natural y otro mecánico.

Como muestra de forma simplificada la Figura 2, se han estudiado seis tipos de ventilación en los institutos catalanes analizados, ya que son los que predominan en ellos. Los cuatro primeros (Figuras 2.a a d) corresponden a casos de ventilación natural, el quinto (Figura 2.e) a ventilación híbrida y el sexto (Figura 2.f) a mecánica.

En la Figura 2.a aparece la ventilación natural de un solo lado (N-VSL) en la cual únicamente se abren las ventanas de un lateral de las aulas y, por lo tanto, no se genera un flujo de aire que las atraviese. Mientras, en la Figura 2.b se observa el caso de las mismas aulas sometidas a ventilación natural cruzada (N-VCR), en el cual el aire procede de lados opuestos como consecuencia de abrir también las puertas u otras aberturas, hecho que genera una recirculación de aire más rápida que la N-VSL. Nótese que en este caso se ha supuesto que parte del aire procede de la parte interior del edificio, como los pasillos, por lo que puede estar viciado y ser de menor calidad que el exterior.

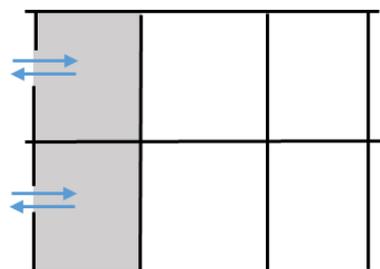
Respecto a las Figuras 2.c y d, en ellas se representan, respectivamente, la ventilación natural con atrios y con patios (N-AYP). En ambas casuísticas se genera un flujo de aire que traspasa las aulas, procedente en ambos sentidos del exterior. Ello hace que, a priori y como supuesto de trabajo, éste sea más limpio y de mayor caudal que el generado con el N-VCR.

La Figura 2.e representa el caso de ventilación híbrida que combina ventilación natural con recirculación mecánica (H-NRM). Este sistema incrementa mejora la ventilación natural utilizando dispositivos que impulsan el aire, como por ejemplo ventiladores, de forma que el comportamiento global se parezca al que se genera con un sistema N-AYP.

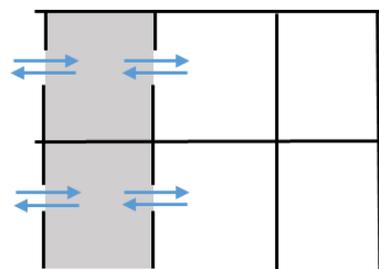
En la Figura 2.f se puede apreciar un sistema mecánico de ventilación centralizada (M-VCN). Éste suele permitir regular la temperatura del aire para situaciones de verano y/o invierno y,

además, también puede disponer de filtros que regulan la calidad del aire. En este trabajo se asume que los sistemas mecánicos instalados en los centros educativos disponen de ambas características, por lo que se hacen funcionar con las aulas completamente cerradas.

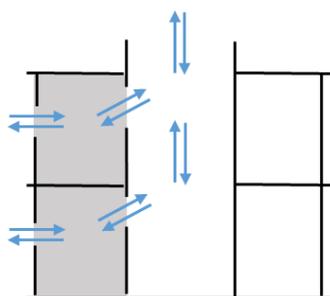
Figura 2. Sistemas de ventilación analizados



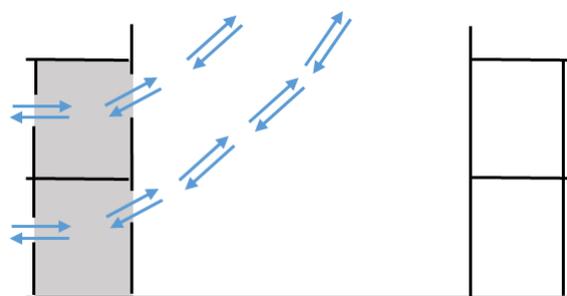
a) Natural de un solo lado



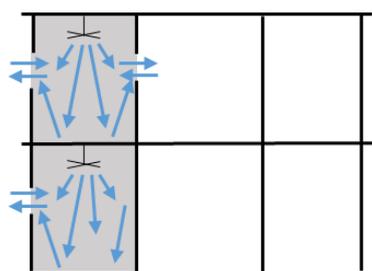
b) Natural cruzada



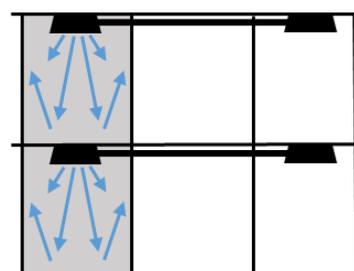
c) Natural con atrio



d) Natural con patio



e) Híbrida (natural + recircul. mecánica)



f) Mecánica centralizada

Es importante remarcar que, al hablar de sistemas de ventilación, los autores se refieren al sistema de trabajo con el cual se realiza la renovación de aire en un edificio. Es decir, en la mayor parte de los casos, una misma aula puede intercambiar el aire con su exterior de dos o más formas. Por ejemplo, si dispone de un sistema de recirculación mecánica o de ventilación centralizada, resulta evidente que también podría ventilarse únicamente por medios naturales.

Como consecuencia de lo anterior y en términos generales, al realizar el análisis comparativo de los sistemas de ventilación, no se está evaluando de forma absoluta el equipamiento de

un aula. El factor que se está evaluando es la forma en la que ésta se ventila y se asume que opera de forma continua a largo de todo el curso escolar.

3. Metodología de evaluación

3.1. Proceso de jerarquía analítica

El estudio de los diversos sistemas de ventilación se ha llevado a cabo mediante el método denominado Proceso de Jerarquía Analítica (Analytic Hierarchy Process, AHP), desarrollado y presentado por Saaty (1980). AHP es una metodología de análisis multicriterio que permite priorizar una serie de alternativas en un proceso de toma de decisiones a través de una comparación cualitativa por pares. La metodología se divide en los pasos siguientes:

1. Descomponer el problema a analizar en distintas variables de estudio, denominadas criterios de evaluación, lo cuales pueden quedar agrupados en distintos requerimientos.
2. Asignar un peso relativo a cada criterio.
3. Determinar las distintas alternativas a ser analizadas mediante los criterios definidos en el paso 1.
4. Establecer una matriz de comparación de alternativas para cada criterio. Esto es, realizar una comparación por pares entre cada una de las alternativas, atribuyendo una puntuación de importancia relativa entre ellas. Las puntuaciones utilizadas para realizar cada comparación por pares se eligen de una escala de calificación numérica o lingüística llamada escala de Saaty (Saaty, 1980), que va de 1 a 9. El 1 significa idéntica preferencia, mientras que el 9 significa extremadamente preferente, siendo el 5 sinónimo de fuertemente preferente.
5. Calcular la prioridad de cada una de las alternativas por cada una de los criterios mediante un proceso conocido como sinterización, que consiste en determinar el vector propio de cada matriz de comparación.
6. Aplicar el peso relativo de cada criterio a su vector correspondiente.
7. Establecer el orden de prioridad de las distintas alternativas.

AHP se ha convertido con los años en una metodología ampliamente aplicada en toma de decisiones multicriterio, y es especialmente relevante en el ámbito de los análisis costo-beneficio, en la evaluación de nuevas alternativas y soluciones tecnológicas, y en el ámbito de la planificación estratégica.

3.2. Indicadores para la evaluación

La evaluación comparativa de los sistemas de ventilación considerados en esta comunicación se ha realizado utilizando el desarrollo sostenible como eje argumental. Para ello se han considerado sus tres pilares fundamentales como requerimientos de la metodología AHP: economía, sociedad y medioambiente. Alrededor de estos pilares se han definido los indicadores que se pueden ver en la Figura 3. Los dos indicadores del requerimiento social son: coste inicial y coste de mantenimiento. Los tres indicadores del requerimiento social son: calidad del aire, confort térmico verano y confort térmico invierno. Y, finalmente, el indicador considerado en el requerimiento medioambiental es consumo energético.

El coste inicial corresponde al gasto que se realiza en el momento de implementar un sistema de ventilación y tiene una enorme influencia a la hora de seleccionar la tecnología a utilizar. Mientras, los costes de mantenimiento son aquellos que resultan necesarios para mantener en buen estado y operativos los sistemas de ventilación a lo largo de su vida útil.

Figura 3. Criterios de evaluación de los sistemas de ventilación



La calidad del aire en el interior de las aulas es también un criterio relevante para seleccionar una u otra alternativa, pues los sistemas pueden tener diferentes capacidades de filtrado. Del mismo modo, el confort térmico también es un aspecto en el cual influye el método de ventilación, pues de él depende la temperatura, la humedad y la velocidad del aire que circula en las aulas. En este caso, al existir gran diferencia entre las situaciones generadas en verano y en invierno en cuanto a confort térmico, la evaluación se ha dividido en dos indicadores.

Finalmente, también se tiene en cuenta el consumo energético de cada sistema de ventilación, pues a él se asocia principalmente la huella de carbono del sistema. Además, la eficiencia energética también está relacionada directamente con los costes operativos del sistema, por lo que éstos son tenidos en cuenta de forma indirecta al evaluar el impacto medioambiental.

4. Estudio multicriterio

Esta sección se dedica a realizar y presentar la evaluación comparativa por pares de los distintos sistemas operativos de ventilación. Las Tablas 1 a 6 muestran, respectivamente, las matrices desarrolladas a partir de un panel de expertos mediante el sistema ideado por Saaty para todos i cada uno de los indicadores considerados: coste inicial, coste de mantenimiento, calidad del aire, confort térmico verano, confort térmico invierno, y consumo energético.

Se recuerda que la comparación por pares, y por tanto la evaluación, se ha realizado teniendo en cuenta que cada sistema operativo de ventilación funciona de forma continua durante el curso escolar y que no puede ser combinado en ningún momento con ninguno de los otros sistemas. Esta es una hipótesis de carácter no real, pues en un aula pueden existir distintos sistemas operativos que pueden utilizarse en función de cual sea el que más beneficie a aquellos que se encuentran en su interior. Así, por ejemplo, y aunque no se haya considerado, una misma aula podría operar con un sistema ventilación de un solo lado (N-VUL) o de ventilación cruzada (N-VCR), dependiendo de que elementos estén abiertos y cerrados. A pesar de las limitaciones que impone hacer la hipótesis mencionada, esta simplificación de la realidad permite realizar una primera aproximación, que, como es lógico, obliga, eso sí, a considerar los resultados obtenidos con cautela y discernimiento crítico.

Respecto al coste inicial, se ha asumido que el coste es el mismo para los tres sistemas operativos con ventilación natural, lo que hace que al compararlos entre ellos la puntuación en todos los casos sea igual a 1. Esta hipótesis cobra sentido al asumir que todas las aulas

docentes disponen de puertas y ventanas y, por lo tanto, el coste de la ventilación de un solo lado (N-VUL) o de la ventilación cruzada (N-VCR) es el mismo. Además, la existencia de atrios y patios (N-AYP) no se ha podido identificar como un parámetro que aumente o reduzca de forma sistemática el coste de construcción en los edificios estudiados, pues depende de cada caso particular. En consecuencia, es razonable asumir que, en términos globales, el coste inicial de esta alternativa es similar al de la N-VUL y N-VCR.

Tabla 1. Matriz AHP para el coste inicial de inversión

Coste inicial						
	N-VUL	N-VCR	N-AYP	H-NRM	M-VCN	Resultado
N-VUL	1	1	1	3	9	0,290
N-VCR	1	1	1	3	9	0,290
N-AYP	1	1	1	3	9	0,290
H-NRM	1/3	1/3	1/3	1	3	0,097
M-VCN	1/9	1/9	1/9	1/3	1	0,032

Asimismo, los sistemas de ventilación centralizada (M-VCN) y natural con recirculación mecánica (H-NRM) resultan más caros de instalar que los sistemas de ventilación natural. En ambos casos, requieren una inversión adicional para añadir dispositivos al edificio que complementen sus elementos arquitectónicos originales, los cuales, a priori, permitirían la aplicación de un sistema de ventilación natural mediante la apertura y cierre de puertas, ventanas y otras aberturas. El sistema de ventilación mecánica M-VCN es el que necesita una mayor inversión inicial y, por lo tanto, la puntuación de los sistemas naturales en relación a ella es de 9 en todos los casos. En cuanto al sistema híbrido H-NRM, su coste incluye exclusivamente elementos mecánicos que se instalan puntualmente en las aulas, y no requieren de una infraestructura de mayor magnitud. Por ello, su puntuación relativa respecto a este último es de 3 y, en relación a los sistemas de ventilación natural, de 1/3.

En cuanto a los costes de mantenimiento, en el caso de los sistemas operativos de ventilación natural, la inversión económica a realizar es casi nula. Ello es debido a que, salvo que se acometan reformas, las puertas y ventanas de los edificios educativos suelen aguantar toda su vida útil sin actuaciones significativas más allá del lubricado de bisagras o el reajuste de los pomos y cerraduras. Además, por los mismos argumentos que en el caso de los costes iniciales, la puntuación que se obtiene al comparar estos sistemas entre ellos es también de 1 en todos los casos.

Tabla 2. Matriz AHP para el coste de mantenimiento de los sistemas de ventilación

Coste mantenimiento						
	N-VUL	N-VCR	N-AYP	H-NRM	M-VCN	Resultado
N-VUL	1	1	1	2	9	0,278
N-VCR	1	1	1	2	9	0,278
N-AYP	1	1	1	2	9	0,278
H-NRM	1/2	1/2	1/2	1	4	0,136
M-VCN	1/9	1/9	1/9	1/4	1	0,032

El gasto en mantenimiento del sistema híbrido es igual a la suma del que se destina al mantenimiento de puertas y ventanas más el destinado a los dispositivos mecánicos y, por tanto, superior al de los naturales. No obstante, el mantenimiento que necesitan dispositivos como los ventiladores es también muy bajo, por lo que, en conjunto, el del sistema híbrido

también lo es. Por ello, la puntuación de los sistemas naturales respecto a esta solución es de tan solo 2 puntos.

En el lado opuesto se sitúa nuevamente el sistema mecánico centralizado, ya que es con diferencia el que requerirá realizar un mantenimiento de mayor magnitud. Consecuentemente, al compararlo con los sistemas naturales e híbrido sus puntuaciones relativas son, respectivamente, de 1/9 y 1/4.

En relación con la calidad del aire interior en las aulas, los resultados muestran que, en términos globales, aquellos sistemas con mayor coste inicial y de mantenimiento son los que proporcionan una mejor calidad del aire. Este resultado es lógico, pues destinar dinero a instalar mecanismos de ventilación que reemplacen el aire en las aulas por uno más contaminado no tendría razón de ser.

El sistema operativo de ventilación mecánica centralizado, al poder disponer de filtros, es el que proporciona una mayor calidad del aire. Contrariamente, el sistema natural de ventilación por un único lado es el que genera un intercambio con el exterior, donde se supone que el aire es más limpio que en el aula, de menor caudal. De este modo, la puntuación que obtiene el sistema mecánico en comparación con este último es de 9.

La ventilación natural cruzada obtiene una puntuación de 4 en comparación con la de un solo lado ya que el flujo de aire que circula al disponer de aberturas en más de una pared de un aula es claramente superior al que se genera cuando solo existen en una de ellas. A su vez, cuando existen atrios o patios el flujo todavía puede ser superior, hecho que hace que su puntuación relativa sea de 6. Por último, el sistema híbrido pretende, en cierta manera, conseguir un intercambio de aire con el exterior similar al de este último sistema natural, de forma que también puede asignarle una puntuación de 6 en comparación con la ventilación natural de un solo lado.

Por lo que respecta al control térmico en las aulas, se han diferenciado dos escenarios. El primero de ellos corresponde a una situación de verano, en el cual se busca que los sistemas naturales e híbrido generen la mayor circulación de aire para reducir la sensación de calor en el interior de las aulas. El segundo escenario es el de una situación de invierno, donde ocurre todo lo contrario y lo que se intenta es minimizar el intercambio de aire con el exterior. En el escenario de verano es nuevamente la ventilación mecánica centralizada la que obtiene mejor puntuación, ya que permite regular la temperatura del aire, mientras que la natural por un lado es la peor valorada, pues es la que hace que la circulación de aire exterior sea mínima. Consecuentemente, la puntuación de la primera es de 1 y la de la segunda respecto a ella es de 9.

Tabla 3. Matriz AHP para la calidad del aire en las aulas

Calidad del aire						
	N-VUL	N-VCR	N-AYP	H-NRM	M-VCN	Resultado
N-VUL	1	1/4	1/6	1/6	1/9	0,037
N-VCR	4	1	1/2	1/2	1/3	0,125
N-AYP	6	2	1	1	1/2	0,221
H-NRM	6	2	1	1	1/2	0,221
M-VCN	9	3	2	2	1	0,395

En el rango intermedio se situarían los otros dos sistemas naturales y el híbrido. Como se ha señalado al referirse a la calidad del aire, la natural cruzada genera un mayor caudal que la

ventilación natural de un solo lado. Asimismo, la natural con atrios o patios y la híbrida generan un caudal todavía superior, pero comparable entre ellos. Por tanto, si se comparan con la natural de un solo lado, las puntuaciones relativas son de 3 para ventilación cruzada y de 6 para atrios/patios e híbrida.

Tabla 4. Matriz AHP para el confort térmico en las aulas en verano

Confort térmico (verano)						
	N-VUL	N-VCR	N-AYP	H-NRM	M-VCN	Resultado
N-VUL	1	1/3	1/6	1/6	1/9	0,039
N-VCR	3	1	1	1/2	1/3	0,116
N-AYP	6	1	1	1/2	1/3	0,179
H-NRM	6	2	2	1	1/2	0,248
M-VCN	9	3	3	2	1	0,418

En el de invierno, también el sistema operativo con ventilación mecánica centralizada es la mejor puntuada por el hecho tener una alta capacidad para controlar la temperatura del aire y, en este caso, actuar como calefacción. Sin embargo, en este escenario los peores puntuados son tanto los sistemas naturales de ventilación cruzada como los de atrios y patios y el sistema híbrido. Ello se explica porque en estos tres casos el aula intercambiaría todo su volumen de aire con el exterior de forma casi instantánea. Por tanto, la puntuación relativa para la mecánica respecto a estos tres sistemas es de 9.

La ventilación natural de un lado se situaría en un escenario intermedio, aunque más próximo a los otros sistemas naturales e híbrido que al mecánico. En este caso la temperatura del aire que se intercambia no se podría regular, pero su caudal sería inferior al de la ventilación cruzada y al que se genera cuando hay atrios, patios o recirculación mecánica con ventiladores. Por ello su puntuación respecto a estos es de 3, aunque en comparación a la mecánica centralizada de 1/3.

Tabla 5. Matriz AHP para el confort térmico en las aulas en invierno

Confort térmico (invierno)						
	N-VUL	N-VCR	N-AYP	H-NRM	M-VCN	Resultado
N-VUL	1	3	3	3	1/3	0,200
N-VCR	1/3	1	1	1	1/9	0,067
N-AYP	1/3	1	1	1	1/9	0,067
H-NRM	1/3	1	1	1	1/9	0,067
M-VCN	3	9	9	9	1	0,600

Por último, en referencia al criterio energético, el sistema que tiene un mayor consumo es el mecánico con ventilación centralizada, ya que requiere controlar características del aire como la temperatura y la humedad, así como impulsar el aire hacia todos los puntos de salida del edificio. Además, estos sistemas también acostumbran a disponer de sistemas de control automático que consumen energía.

En el otro extremo se sitúan los sistemas naturales, ya que el consumo energético es nulo, salvo que se disponga de elementos eléctricos o similares para abrir y cerrar puertas y ventanas, cosa que no ocurre en la gran mayoría de centros analizados. En cuanto al sistema híbrido, el consumo de energía es ligeramente superior, ya que hay que hacer funcionar ventiladores o dispositivos análogos.

Considerando lo anterior, la puntuación relativa entre todos los sistemas naturales es de 1, Mientras, en comparación con ellos, las de las soluciones híbridas y mecánicas son de 2 y 9, respectivamente.

Tabla 6. Matriz AHP para el consumo energético de los sistemas de ventilación

	N-VUL	N-VCR	N-AYP	H-NRM	M-VCN	Resultado
N-VUL	1	1	1	2	9	0,279
N-VCR	1	1	1	2	9	0,279
N-AYP	1	1	1	2	9	0,279
H-NRM	1/2	1/2	1/2	1	3	0,130
M-VCN	1/9	1/9	1/9	1/3	1	0,034

Finalmente, la Tabla 7, presenta el índice de consistencia de las comparaciones por pares realizadas para cada indicador. Como puede verse en 4 de los 5 indicadores puede considerarse que la consistencia es completa al ser este índice asimilable a cero. En el caso del confort térmico en verano el índice de consistencia sigue siendo bueno, a pesar de que el valor ascienda a 0,026, dado que para matrices de 5x5 o mayores se aceptan valores de hasta 0,1.

Tabla 7. Índice de consistencia de las matrices AHP

Matriz AHP	Consistencia	Matriz AHP	Consistencia
Coste inicial	0,000	Confort térmico (verano)	0,026
Coste Mantenimiento	0,000	Confort térmico (invierno)	0,000
Calidad aire	0,006	Consumo energético	0,006

5. Análisis de resultados

A partir de los resultados obtenidos con el estudio multicriterio presentado a en la sección anterior, se ha realizado un análisis de resultados ponderado de 5 formas diversas (5 casos de estudio) los indicadores utilizados en la comparación por pares. La Tabla 8 presenta las 5 combinaciones de pesos determinadas para los requerimientos utilizados en este estudio (económico, social y medioambiental).

Tabla 8. Casos estudiados en el análisis de resultados

Combinación	Económico	Social	Medioambiental
Caso 1	33 %	33 %	33 %
Caso 2	20 %	60 %	20 %
Caso 3	15 %	50 %	35 %
Caso 4	20 %	40 %	40 %
Caso 5	40 %	40 %	20 %

Dentro de los aspectos económicos, al coste inicial se le ha asignado, en todos los casos, una representatividad del 80% de éste, y al coste de mantenimiento el 20% restante. En el requerimiento sociales, a la calidad del aire se le ha asignado una representatividad del 50%, y el otro 50% se ha asignado al confort térmico, distribuido de forma uniforme entre el confort térmico en verano y en invierno, lo que representa que cada uno de estos indicadores tiene

una representatividad del 25% de su requerimiento. El único criterio de los aspectos medioambientales es el consumo energético, y por tanto representa el 100% de éste.

La Tabla 9 muestra las puntuaciones obtenidas por los cinco sistemas operativos de ventilación en cada uno de los casos analizados. Para facilitar la visualización de resultados, se ha aplicado una escala de color en cada una de las columnas de la tabla, es decir, para cada caso de análisis. La Figura 4 presenta en un gráfico en forma de araña los mismos resultados de forma conjunta y sucinta, para su mejor visualización.

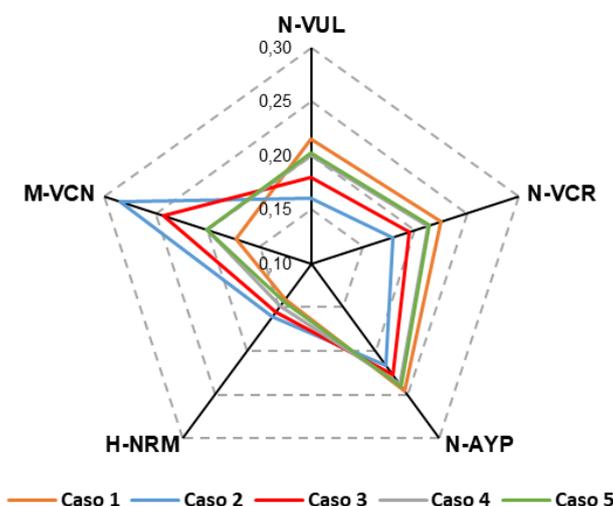
Para el Caso 1, en que los aspectos económicos, sociales y medioambientales tienen el mismo peso, el sistema que obtiene los mejores resultados es el de ventilación natural con atrios y patios (N-AYP). Ello se explica porque, en términos de costes inicial y de mantenimiento, y de consumo energético (el 66% de la puntuación global), los sistemas naturales son los que obtienen mejor puntuación. Así mismo, en cuanto a calidad de aire y confort térmico en verano (el 25% del global), este sistema únicamente es igualado o superado por el sistema mecánico y el híbrido, respectivamente

En el Caso 2, los criterios sociales son claramente los más determinantes, pues representan un 60% de la puntuación global. Mientras que los económicos y medioambientales se reparten el 40% restante de forma equitativa. Fruto de ello, el sistema operativo mejor valorado es el mecánico con ventilación centralizada (M-VCN), pues es el que obtiene mejores puntuaciones en cuanto a calidad del aire y confort térmico en verano e invierno. Es decir, si la importancia del gasto económico y del consumo energético es muy baja, lo ideal es instalar un sistema mecánico que proporcione aire filtrado y con temperatura controlada a las aulas.

Tabla 9. Valoración de cada sistema de ventilación en función del caso de estudio

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
N-VUL	0,215	0,160	0,180	0,200	0,202
N-VCR	0,225	0,178	0,195	0,212	0,214
N-AYP	0,246	0,217	0,227	0,238	0,240
H-NRM	0,141	0,160	0,156	0,149	0,143
M-VCN	0,173	0,284	0,243	0,201	0,200

Figura 4. Valoración de cada sistema de ventilación en función del caso de estudio



En el Caso 3 también los aspectos sociales predominan con un 50% de la puntuación total, aunque los medioambientales tienen mucha más importancia que los económicos, con un 35% y un 15%, respectivamente. Nuevamente, el sistema mecánico es el que sale mejor valorado al ser el mejor en todos los criterios sociales, aunque seguido de cerca por el sistema natural con atrios y patios (N-AYP).

El Caso 4 trata de un escenario en el cual los aspectos sociales y medioambientales tienen el doble de peso que los económicos (40%, 40% y 20%, respectivamente). Ello hace que el sistema mejor valorado sea el natural con atrios y patios, mientras que el mecánico se sitúa en tercera posición, ya que no logra compensar el hecho de que sea el que obtiene la peor nota de los cinco en los aspectos medioambientales.

En el Caso 5 se plantea que los aspectos económicos y sociales valen el doble que los medioambientales (pesos de 40%, 40% y 20%, respectivamente), hecho que genera unos resultados muy similares a los del Caso 4. En esta casuística también el sistema natural con atrios y patios es el mejor puntuado con la ventilación mecánica centralizada en cuarta posición. Esto último se explica porque, en este caso, la M-VCN es la que obtiene la peor nota en los dos aspectos económicos de coste inicial y de mantenimiento. Sin embargo, la N-AYP destaca sobre las otras cuatro alternativas ya que, por un lado, junto a las otras dos naturales, es la que mejor puntuación obtiene en los aspectos económicos y medioambientales, y por el otro, porque en calidad de aire y confort térmico en verano obtiene una puntuación intermedia, pero siempre superior a la de las N-VUL y N-VCR.

Con todo, es interesante mencionar la sensibilidad de los resultados a los cambios de pesos. Esto indica que en función de los criterios y voluntades de los decisores puede ser más razonable potenciar una estrategia u otra. Por tanto, no se puede hablar con carácter universal de una estrategia óptima.

Así mismo, cabe explicar para cerrar este apartado los resultados obtenidos por el sistema operativo basado en una ventilación natural con recirculación mecánica (H-NRM) dado que no son los buenos que cabría esperar. Esto es debido a que la hipótesis de simplificación presentada en la sección anterior penaliza la operativa híbrida. Y, en ningún caso, los resultados obtenidos indican que esta operativa deba ser rechazada. Al contrario, en determinadas circunstancias, en las que por ejemplo solamente se necesite mejorar el confort térmico en verano y se quiera hacer con una inversión relativamente baja, esta es una solución óptima, tal y como indica el segundo indicador del requerimiento social. Además, en un marco conceptual en el que puedan combinarse operativas de ventilación y en que el funcionamiento no sea considerado continuo, el H-NRM mejoraría mucho los resultados obtenidos, ya que por ejemplo, en un contexto invernal la recirculación mecánica podría ser detenida y el confort térmico obtendría una valoración más ventajosa al utilizarse únicamente N-VUL.

6. Conclusiones

El trabajo presentado en esta comunicación ha servido para identificar, describir y caracterizar las diferentes estrategias de ventilación que pueden presentarse en un centro educativo. La metodología utilizada, de contrastada solvencia, ha permitido, utilizando el juicio experto, realizar una primera valoración cualitativa de las 5 estrategias de ventilación consideradas. Este trabajo, que tiene aspectos que pueden mejorarse en el futuro, básicamente las hipótesis de simplificación realizadas, representa un primer hito que debe servir para seguir avanzando en el estudio de la calidad del aire y del confort térmico en el entorno de la enseñanza.

7. Referencias

- BOE (2022). Real Decreto-ley 14/2022, de 1 de agosto, de medidas de sostenibilidad económica en el ámbito del transporte, en materia de becas y ayudas al estudio, así como de medidas de ahorro, eficiencia energética y de reducción de la dependencia energética del gas natural. Disponible en <<https://www.boe.es/eli/es/rdl/2022/08/01/14/con>>, consultado el 19/5/23.
- Choe, Y., Shin, J. S., Park, J., Kim, E., Oh, N., Min, K., ... & Yang, W. (2022). Inadequacy of air purifier for indoor air quality improvement in classrooms without external ventilation. *Building and Environment*, 207, 108450.
- Fraga, S., Ramos, E., Martins, A., Samúdio, M. J., Silva, G., Guedes, J., ... & Barros, H. (2008). Indoor air quality and respiratory symptoms in Porto schools. *Revista Portuguesa de Pneumologia (English Edition)*, 14(4), 487-507.
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (2015). Guía técnica para la evaluación y la prevención de los riesgos relativos a la utilización de los lugares de trabajo
- Montazami, A., Gaterell, M., & Nicol, F. (2015). A comprehensive review of environmental design in UK schools: History, conflicts and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 46, 249-264.
- Saaty, TL. (1980). "The Analytic Hierarchy Process". New York, USA. McGraw-Hill.. ISBN:0-07-054371-2.
- Sánchez-Torija, J. G., Arranz, B., Oteiza, I., Alonso, C., & Martín-Consuegra, F. (2022). Evaluación del confort térmico y la calidad de aire en centros docentes públicos en Madrid. Estudio de tres casos durante un año. *Informes de la Construcción*, 74(567), e456-e456.
- Simons, E., Hwang, S. A., Fitzgerald, E. F., Kielb, C., & Lin, S. (2010). The impact of school building conditions on student absenteeism in upstate New York. *American journal of public health*, 100(9), 1679-1686.
- Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A., Contreras-Espinoza, S., & Bahnfleth, W. (2020). The relationships between classroom air quality and children's performance in school. *Building and Environment*, 173, 106749.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

