

Evaluación de la sostenibilidad de tres alternativas de climatización pasiva en una edificación industrial

Sustainability evaluation of three passive air conditioning alternatives in an industrial building

ARQ. ERNESTO LORENZO ROMERO

Arquitecto (UCV, 2005). Especialista en Desarrollo Tecnológico de la Construcción (UCV, 2008). Doctor en Desarrollo Sostenible (USB, 2017). Premio Nacional de Ciencia y Tecnología 2017. Docente-Investigador, Asociado, adscrito al área de requerimiento de habitabilidad de las edificaciones en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela.
Correo-e: ernestolorenzor@gmail.com

RESUMEN

El concepto de sostenibilidad deriva de la necesidad de lograr en todas las actividades humanas un equilibrio a nivel social, ambiental y económico. En este sentido, las edificaciones se consideran un sector determinante, siendo el equipamiento por climatización una de las áreas de mayor interés por su repercusión en el consumo energético y emisiones de CO₂. Sin embargo, es poca la documentación científica disponible donde, para la toma de decisiones, se profundice en la evaluación de la sostenibilidad de distintas tecnologías de climatización previo a su aplicación en la edificación. Es por esto que el presente trabajo se enfoca en la aplicación de un modelo de análisis de indicadores, utilizando el algoritmo PRES como método multicriterio para la comparación de alternativas en un caso de estudio seleccionado dentro del contexto venezolano, con la finalidad de obtener una valoración de tres alternativas de climatización estudiadas frente a los criterios de sostenibilidad.

DESCRIPTORES

Climatización, Sostenibilidad, Arquitectura bioclimática, Indicadores de sostenibilidad, Arquitectura sostenible, algoritmo PRES.

ABSTRACT

The concept of sustainability derives from the need to achieve a balance in all human activities at a social, environmental, and economic level. In this sense, buildings are considered a determining sector, with air conditioning equipment being one of the areas of greatest interest due to their impact on energy consumption and CO₂ emissions. However, there is little scientific documentation available where, for decision-making, the evaluation of the sustainability of different air conditioning technologies is carried out in depth prior to their application in buildings. This is why this work focuses on the application of an indicator analysis model, using the PRES algorithm as a multi-criteria method to compare alternatives in a case study selected within the Venezuelan context, with the objective of obtaining a valuation of three alternatives of air conditioning, according to sustainability criteria.

DESCRIPTORS

Air conditioning, Sustainability, Bioclimatic architecture, Sustainability indicators, Sustainable architecture, PRES algorithm.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático IPCC estima que a nivel mundial existe un potencial de reducción del 31% de las emisiones de gases de efecto invernadero GEI asociadas al consumo de energía de las edificaciones, tomando el año 2030 como tope para dicha proyección. Los países en vías de desarrollo cuentan con las mejores estimaciones, ya que concentran el 42% del potencial total de reducción, duplicando a los países miembros de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico-OCDE (Levine et al., 2007). En este contexto, la climatización adquiere especial relevancia, al ser responsable de cerca del 50% del consumo de energía total de los edificios en los países desarrollados (Pérez et al., 2008), siendo EEUU el mayor consumidor a nivel mundial por este concepto, mientras se estima que los países en vías de desarrollo puedan llegar a superar en los próximos años 45 veces el consumo actual de ese país, ubicando a India y China como los responsables de más del 50% de ese aumento (Sivak, 2013). Por lo tanto, es clara la necesidad presente y futura de profundizar en el campo de la climatización de edificaciones, en especial en climas cálido húmedo, que son los que predominan en el mayor número de países en vía de desarrollo, entendiéndose la climatización como sector clave para el logro de la sostenibilidad en las edificaciones.

Han sido muchas las experiencias documentadas donde se desarrolla y cuantifica el potencial de nuevas tecnologías de climatización denominadas pasivas o cuasi-pasivas, las cuales garantizan el logro del confort térmico en las edificaciones sin consumir energía eléctrica o hacerlo de forma muy reducida (Santamouris et al., 2007 y 2013; Finocchiaro et al., 2010; Geetha et al., 2012; Cam, 2012), siendo menores las experiencias en clima tropical húmedo, con excepción de países como Malaysia, Hong Kong, México y Venezuela (Toe et al., 2014; Kubota et al., 2012; Tetsu et al., 2010; Chyee et

al., 2009; López et al., 2011; Castillo et al., 2011; Figueroa et al., 2011; Huelsz et al., 2011; Xinhua et al. 2008; Madhumathi et al., 2012; Sanusi et al., 2013; Lorenzo, 2007; Lorenzo et al., 2008; Allard et al., 1998; Hobaica et al., 2001; González, 1997; González, 2011; Prado, 2015; Piñate et al., 2013; Piñate, 2016). Sin embargo, los estudios consultados se centran en el desarrollo o la aplicación de distintas tecnologías a nivel particular y en un contexto determinado, sin que las mismas hayan sido analizadas desde el punto de vista de su contribución a la sostenibilidad, en las edificaciones donde son aplicadas (Lorenzo, 2018). Por esta razón, el objetivo del presente trabajo es contribuir al conocimiento científico disponible en el campo de los sistemas de climatización pasivos y cuasi-pasivos, en especial en lo que respecta a sus implicaciones en el logro de la sostenibilidad de las edificaciones. En este sentido, a continuación, se presentan los resultados de la aplicación de un modelo de análisis de indicadores, utilizando el algoritmo PRES¹ como método multicriterio de jerarquización de alternativas con base en sus valoraciones y relaciones de dominación (Lorenzo, 2017), con el fin de comparar tres alternativas tecnológicas de climatización pasiva dentro del marco de la sostenibilidad, en una edificación de uso industrial ubicada en la ciudad de Caracas-Venezuela, con un clima tropical húmedo.

CASO DE ESTUDIO

Se trata de una edificación ubicada en la zona industrial Monte Rosa, en el kilómetro 5 de la carretera Baruta a El Placer, en Caracas, con un área construida de 1.350 m² dedicados al uso industrial, en clima tropical húmedo, cuyo requerimiento principal es la climatización total de su planta libre y gran altura, con cerramientos perimetrales construidos en bloques de cemento en obra limpia, sin ventanas y techos de lámina metálica galvanizadas (lámina 1).

Para esta edificación, se parte de un proyecto de climatización donde se plantean tres alternativas de climatización utilizando distintos sistemas tecnológicos que cuentan con un amplio desarrollo y documentación.

Alternativa 1

La climatización total de la edificación mediante el uso de equipos tradicionales de aire acondicionado. Requiere un bajo número de modificaciones en la arquitectura existente, ya que se enfoca solo en la reducción de las pérdidas directas de aire frío por aberturas y lo referente a la instalación de los equipos y ductos.

Alternativa 2

La climatización total de la edificación utilizando un sistema cuasi pasivo de climatización por conductos enterrados. Requiere mediano número de modificaciones en la arquitectura

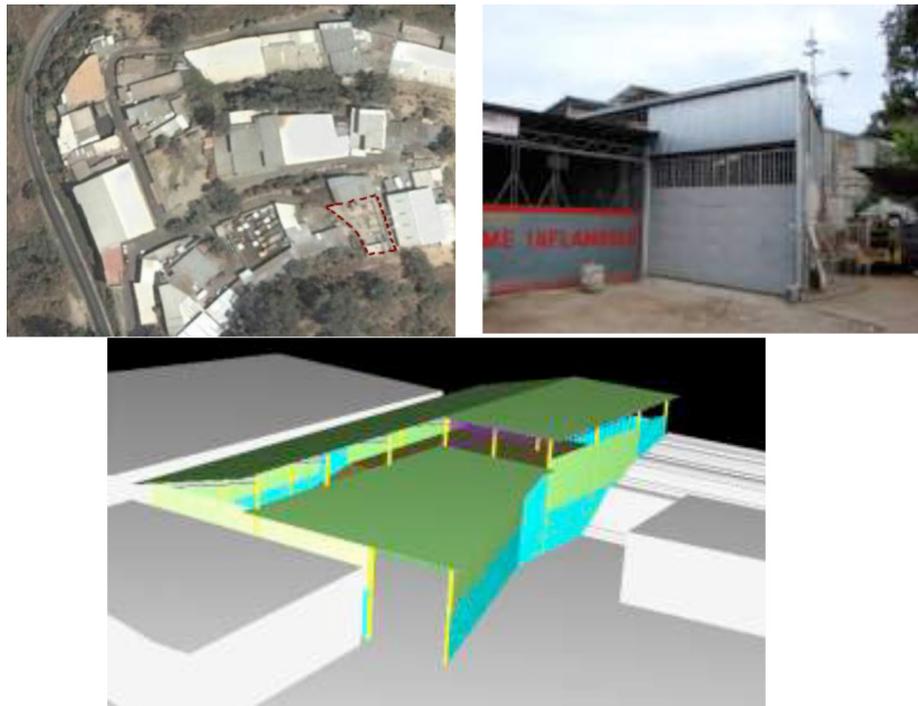
existente, debido a que se hace necesario realizar aberturas en las paredes y a la vez realizar trabajos de aislamiento térmico.

Alternativa 3

Para la climatización total de la edificación de manera mixta, mediante el uso de un techo estanque junto a equipos tradicionales de aire acondicionado sería necesario realizar el mismo trabajo planteado en la alternativa 1, sumado a la sustitución total del techo actual por una nueva estructura que permita la instalación del estanque de techo, que a su vez también estará protegido durante el día por otro techo móvil.

Vale acotar que los sistemas alternativos de climatización propuestos destacan por su potencial en la disminución del consumo energético, lo que los convierte en una alternativa para los arquitectos que procuran alcanzar la

Lámina 1. Ubicación y levantamiento del caso de estudio



Fuente: elaboración propia.

sostenibilidad en sus obras. Sin embargo, no se hallaron registros publicados donde se evalúen las prestaciones de estos sistemas frente a los sistemas de climatización tradicionales desde el punto de vista de la sostenibilidad (Lorenzo, 2017), por lo que no se conoce si además de ahorrar energía eléctrica contribuyen realmente –y en qué medida– con la sostenibilidad de las edificaciones en comparación con los sistemas tradicionales. Es esta la razón por la que el caso de estudio reviste gran interés, ya que permite realizar una evaluación de las distintas alternativas de climatización propuestas no solo desde el punto de vista de costos y ahorro energético –como hasta el momento se había hecho–, sino también respecto a los lineamientos de sostenibilidad en la edificación.

Como premisas para el análisis se decidió fijar una vida útil de 15 años para cada sistema propuesto, de manera que en las respectivas evaluaciones se pudiesen considerar los impactos generados hasta su disposición final.

Entre las limitaciones, se debe considerar que no en todos los casos se dispone de la información necesaria para la completa aplicación de los indicadores. Esto resulta lógico debido a que algunos de esos indicadores son muy novedosos, por lo que de forma habitual aún no suelen ser tomados en consideración en la gerencia de proyectos. En estos casos, se

recurrió a la consulta de expertos que participaron en el desarrollo del proyecto, para cuantificar los valores adecuados para cada indicador que así lo requiriera.

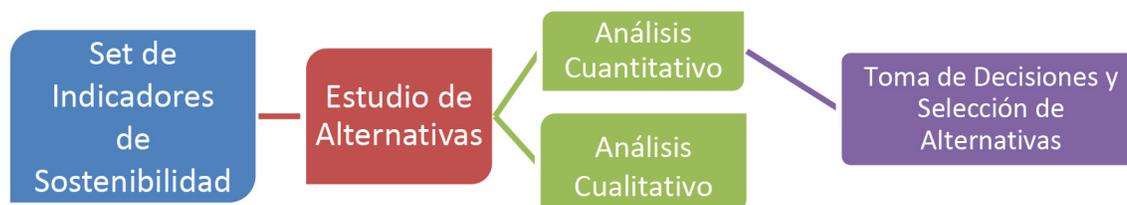
METODOLOGÍA Y CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Se aplicó un modelo de análisis desarrollado para la evaluación de proyectos de climatización de edificaciones en el marco de la sostenibilidad, fundamentado en 21 indicadores integrados mediante el algoritmo PRES como método de análisis multicriterio (Lorenzo, 2017), cuyo objetivo es el de poder discernir –frente a un eventual grupo de alternativas de climatización– cuál es la opción más sostenible. La secuencia de aplicación propuesta para la ejecución del modelo se muestra en el gráfico 1.

La evaluación de los indicadores se realizó desde la fase inicial del proyecto, con base en los criterios establecidos por la investigación que la sustenta Lorenzo (2017); ver cuadro 1.

Se asume como método de normalización el planteado por Calderón et al. (2009), utilizando un criterio diferente si el parámetro es subjetivo u objetivo y si son atributos cuantificables o no, lo que garantiza que siempre se obtengan valores normalizados en un rango entre 0 y 1.

Gráfico 1. Secuencia de aplicación propuesta para la ejecución del modelo de análisis desarrollado



Cuadro 1. Criterios de evaluación para cada indicador

Pilares	Peso	Macro-Indicadores	Medición	Micro-Indicadores	Modo de cálculo	Unidades	Peso del criterio
1. Ambiental	0,337	1.1.- Emisiones de CO2	Cuantitativo	Cantidad de emisiones de CO2 al ambiente	Estimación de las emisiones de CO2 durante ciclo de vida	t CO2eq	0,061
		1.2.- Materiales y/o sustancias peligrosas	Cuantitativo	Uso de refrigerantes Clorofluorocarburos (sí/no)	Especificaciones técnicas	N/A	0,054
		1.3.- Huella Ecológica	Cuantitativo	Huella Ecológica del proyecto	Cálculo de la Huella Ecológica con herramientas existentes	ha	0,049
		1.4.- Consumo de materiales	Cuantitativo	Cantidad de materiales utilizados	Cuantificación según partidas del proyecto	(t, m3, m2)	0,045
		1.5.- Uso de energías renovables	Cuantitativo	Uso de energía renovable durante ciclo de vida	Porcentaje de la energía renovable empleada, frente al total utilizado durante ciclo de vida	% de kWh totales	0,045
		1.6.- Generación de residuos	Cuantitativo	Cantidad de residuos generados	Estimación de residuos generados	(t, m3)	0,042
		1.7.- Consumo de agua	Cuantitativo	Consumo de Agua	Estimación del consumo de agua diario	m3	0,041
2. Social	0,315	2.1.- Confort higrotérmico	Cualitativo / Cuantitativo	Tiempo fuera de la zona de confort	Porcentaje de tiempo fuera de la zona de confort / Opinión de expertos	% de tiempo	0,054
		2.2.- Seguridad y salud *	Cualitativo / Cuantitativo	Medidas de seguridad y salud implementadas Índices de peligrosidad de la tecnología	Nº de medidas implementadas / Especificaciones técnicas / Opinión de expertos	N/A	0,052
		2.3.- Calidad del aire interior	Cuantitativo	Renovación de aire interior	Numero de renovaciones de aire por hora / especificaciones técnicas	m3/h	0,052
		2.4.- Confort acústico	Cuantitativo	Generación de ruido al interior del espacio	Especificaciones técnicas / Mediciones in situ	dB	0,043
		2.5.- Participación y control *	Cuantitativo	Información pública y disponible del proyecto Propuestas de la sociedad incorporadas al proyecto	Nº de medidas informativas y de difusión / Nº de propuestas de la comunidad integradas al proyecto	Nº de acciones	0,040
		2.6.- Respeto al patrimonio histórico y cultural *	Cualitativo	Incompatibilidad cultural y/o costumbres Afectación al patrimonio	Opinión de Expertos / Valoración del Patrimonio Afectado	N/A	0,038
		2.7.- Responsabilidad social	Cualitativo / Cuantitativo	Medidas de responsabilidad social consideradas	Opinión de expertos / Nº de medidas de responsabilidad social	N/A	0,037
3. Económico	0,347	3.1.- Consumo de energía en ciclo de vida	Cuantitativo	Consumo de energía total	Estimación del consumo energético en el ciclo de vida	kWh	0,066
		3.2.- Transporte	Cuantitativo	Distancia a recorrer hasta la obra	Obtención de la distancia desde el lugar de fabricación de componente y/o equipos hasta la obra	Km	0,054
		3.3.- Costo del ciclo de vida	Cuantitativo	Costo del ciclo de vida	Calculo de los costos de construcción o adquisición, instalación, mantenimiento y demolición	Bsf / USD	0,051
		3.4.- Acreditación / Certificación de calidad	Cualitativo / Cuantitativo	Certificación o acreditación de procesos o tecnologías dentro del proyecto	Nº de certificaciones o acreditaciones / Opinión de expertos / Especificaciones técnicas / Garantía	N/A	0,048
		3.5.- Vulnerabilidad ante desastres naturales	Cualitativo	Análisis de vulnerabilidad ante desastres naturales	Opinión de Expertos / Elaboración de escenarios según zonas de riesgos naturales	N/A	0,044
		3.6.- Vulnerabilidad ante el cambio climático	Cualitativo	Análisis de vulnerabilidad ante el cambio climático	Opinión de Expertos / Elaboración de escenarios según zonas potencialmente afectadas por cambio climático	N/A	0,043
		3.7.- Previsión para la deconstrucción	Cualitativo / Cuantitativo	Nivel de previsión para la deconstrucción	Porcentaje de deconstrucción previsto frente al total de la obra ejecutada / Opinión de expertos	% del total	0,042

Fuente: Lorenzo, 2017: Tabla N° 1.

Para estimaciones subjetivas, puede ocurrir que no sean cuantificables y se basen en una valoración de expertos o que sí sean cuantificables mediante algún indicador que esté relacionado con el atributo en cuestión.

En el primer caso, si el criterio subjetivo no es cuantificable, se busca la diferencia de valores resultantes con la fórmula tipo 1:

- 1A. Si el valor superior V_s es el mejor:
$$\frac{V_x - V_i}{V_s - V_i}$$

- 1B. Si el valor superior V_s es el peor:
$$\frac{V_x - V_i}{V_s - V_i}$$

En el segundo caso, si el criterio es subjetivo y cuantificable, se busca diferenciar los valores resultantes de manera intermedia con una fórmula tipo 2:

- 2A. Si el valor superior V_s es el mejor:
$$\frac{V_x}{V_s}$$

- 2B. Si el valor superior V_s es el peor:
$$\frac{V_i}{V_x}$$

En el tercer caso, si el criterio es objetivo, se busca diferenciar los valores resultantes de manera poco apreciable con una fórmula tipo 3:

- 3A. Si el valor superior V_s es el mejor:
$$\frac{V_x - V_i}{V_s - V_i}$$

- 3B. Si el valor superior V_s es el peor:
$$\frac{V_x - V_i}{V_s - V_i}$$

Donde:

V_x Se refiere al valor que se quiere normalizar

V_s Se refiere al valor superior

V_i Se refiere al valor inferior del atributo que se esté normalizando.

Aplicando finalmente el método PRES II Multiexperto basado en el algoritmo PRES², como método de análisis multicriterio por su confiabilidad y simplicidad en casos donde el análisis de opciones es complejo por el número de alternativas estudiadas.

DESARROLLO DE INDICADORES

Emisiones de CO₂

Para la cuantificación de las emisiones totales de CO₂ en el caso de estudio se recurre a las partidas presupuestarias con el fin de estimar las emisiones en cada una de ellas, pudiendo finalmente sumarlas y obtener así un monto global. La estimación se realizó con la ayuda del Banco Estructurado de Datos de Elementos Constructivos-BEDEC del Instituto Tecnológico de la Construcción de Cataluña ITeC 2016, que cuenta con información detallada, tanto de la energía incorporada como de las emisiones de CO₂ asociadas a los materiales, maquinarias y procesos. Una vez realizada la estimación de las emisiones de CO₂ para cada partida presupuestaria, se obtuvieron los siguientes valores totalizados por alternativa propuesta (cuadro 2).

Para efecto de su valoración final, al normalizar estos resultados en un rango de 0 a 1 según la fórmula de normalización 3B, se obtuvieron los resultados que se muestran en el cuadro 3.

Materiales y/o sustancias peligrosas

Este indicador se refiere principalmente al uso de Clorofluorocarburos y otros refrigerantes tóxicos en los sistemas de climatización, sin embargo, debe ser considerado cualquier otro material o sustancia que pudiera ocasionar impactos negativos a la salud en cualquier etapa del ciclo de vida. Como en el caso de estudio ninguna de las alternativas contempla el uso de Clorofluorocarburos, el análisis se enfoca en el uso de materiales como el PVC, Poliestireno, y Lana de Roca Aislante térmico en el proyecto. Los resultados se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 2. Emisiones de CO₂ totales kg por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Emisiones totales de CO₂kgCO₂	5.316.532,76	236.825,65	3.363.675,98

Fuente: Elaboración propia con base en datos del ITeC, 2016.

Cuadro 3. Valoración normalizada de alternativas según emisiones de CO₂

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,5	1,00	0,69

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4. Cantidad de materiales peligrosos utilizados en cada de alternativa

	PVC m ²	Poliestireno m ²	Lana de Roca m ²
Alternativa N° 1	0	0	110
Alternativa N° 2	201	1530	24
Alternativa N° 3	14,40	950	66

Fuente: Elaboración propia.

Para la normalización de estos valores se recurre al cálculo de la media ponderada en cada alternativa, para luego realizar su valoración final en el rango de 0 a 1 según la fórmula de normalización 3B, obteniendo los resultados que se recogen el cuadro 5.

Huella ecológica

Según los resultados de los estudios preliminares que lo sustentan, se introdujeron los datos estimados correspondientes a los consumos, emisiones, superficies ocupadas, materiales y actividades, en una estructura de cálculo desarrollada por Doménech et al. (2010), con el fin de obtener la huella ecológica de cada alternativa estudiada como se muestra en el cuadro 6.

De acuerdo con estos resultados, su normalización en el rango de 0 a 1 según la fórmula 3B arrojó los resultados que ofrece el cuadro 7.

Consumo de materiales

Este indicador se basa en la gestión de recursos y materiales empleados en cada alternativa. El objetivo del análisis es la evaluación de las cantidades de material empleadas en cada solución propuesta, ubicándose como la mejor opción aquella con menor cantidad de recursos utilizados y mejor optimización en su uso. En los estudios preliminares del proyecto seleccionado como caso de estudio se realizó una estimación de las distintas partidas para su cuantificación económica. En este caso, se han utilizado estas mismas partidas para la estimación del consumo de materiales asociado a cada alternativa propuesta obteniendo el resultado que se muestra en el cuadro 8.

Para su normalización se unificaron todos los valores en toneladas (t), para luego llevarlos al rango de 0 a 1 para efecto de su valoración

Cuadro 5. Valoración normalizada de alternativas según uso de materiales peligrosos

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	1,00	0,50	0,72

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6. Estimación de la Huella ecológica ha por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Huella ecológica ha	3.149,10	165,90	2.060,30

Fuente: Elaboración propia según metodología desarrollada por Doménech et al., 2010.

Cuadro 7. Valoración normalizada de alternativas según Huella ecológica

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,50	1,00	0,68

Fuente: Elaboración propia.

final mediante el uso de la fórmula 3B, obteniendo los siguientes resultados que se recogen en el cuadro 9.

Uso de energías renovables

A mayor porcentaje de energías renovables respecto al total, mejor valorado estará este indicador, por lo que para su normalización de 0 a 1 para efecto de su valoración final se deberá utilizar la fórmula 3A. Sin embargo, en este caso práctico no se consideró en ninguna de las alternativas estudiadas la utilización de fuentes de energías renovables, por lo tanto, con respecto a este indicador no se observa diferencia

alguna entre las alternativas, quedando los resultados para la valoración final como se muestra en el cuadro 10.

Generación de residuos

El objetivo principal de este indicador es la reducción de los residuos destinados a vertederos, maximizar el reciclaje, la reutilización y la valorización. Para la evaluación de este indicador se recurre a los resultados de los estudios previos referentes a los volúmenes de RCD estimados para cada una de las alternativas y expresados en m³. Se muestran a continuación los resultados obtenidos en el cuadro 11.

Cuadro 8. Estimación de consumo de materiales por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Consumo de materiales (t)*	15,43	25,06	102,15

* (t) = toneladas

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 9. Valoración normalizada de alternativas según consumo de materiales

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	1,00	0,94	0,50

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 10. Valoración normalizada de alternativas respecto al uso de energías renovables

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,50	0,50	0,50

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 11. Estimación de residuos generados por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Generación de m³	163	287	1,146

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, como a nivel de proyecto no se suele disponer de los planes de gestión de residuos y el porcentaje de reutilización, reciclaje y valorización, los datos estimados de la generación de residuos de manera global para efectos de su valoración final deben considerarse como un valor subjetivo cuantificable, por lo que su normalización en el rango de 0 a 1 debe realizarse con la fórmula 2B, obteniendo los resultados que ofrece el cuadro 12.

Consumo de agua

Este indicador se basa en la gestión del agua. El objetivo de su análisis es la evaluación de la cantidad de agua (en m³) requerida por cada alternativa para su funcionamiento durante el ciclo de vida. Cuanto más baja es la puntuación, mayor es la protección del recurso agua y menor es el impacto más sostenible del proyecto.

Para su aplicación se recurre a la información suministrada por los estudios prelimina-

res del proyecto con los resultados que arroja el cuadro 13.

De acuerdo con estos resultados, su normalización en el rango de 0 a 1 según la fórmula 2B quedó como se puede observar en el cuadro 14.

Confort higrotérmico

La evaluación de este indicador surge de la necesidad de medir el logro de las condiciones de confort térmico y humedad dentro del espacio a climatizar. Resulta de especial interés cuando dentro de las alternativas a evaluar se encuentran sistemas alternativos de climatización pasivos o cuasi pasivos, cuya potencia de enfriamiento está condicionada a una fuente de enfriamiento natural no mecánica, por lo que su eficiencia dependerá de las condiciones propias del proyecto y los requerimientos de climatización de la edificación.

Por lo tanto, en lo que respecta a la aplicación de este indicador, si el sistema de clima-

Cuadro 12. Valoración normalizada de alternativas según la generación de residuos

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	1,00	0,57	0,14

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 13. Estimación de consumo de agua (en m³) por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Consumo de agua(m³)	82	287	11.100

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 14. Valoración normalizada de alternativas según el consumo de agua

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	1,00	0,29	0,01

Fuente: Elaboración propia.

tización evaluado posee una fuente de enfriamiento mecánica regulada por un termostato Sistema activo, se entiende que el 100% del tiempo estará dentro de la zona de confort térmico, por lo que se asignará la máxima puntuación de 100. Si, por el contrario, el sistema de climatización a evaluar posee una fuente de enfriamiento natural no mecánica Sistema pasivo, se recurre al cálculo de los grados-hora de malestar térmico mediante el planteamiento de neutralidad térmica del modelo de adaptación de la norma ASHRAE 55 para edificaciones en climatización pasiva (cf. ASHRAE, 2004; De Dear y Brager, 2002), resumido en la siguiente expresión:

$$T_n = 17,8 + 0,31 T_{em}$$

Donde:

T_n es la temperatura de neutralidad o de confort

T_{em} es la temperatura media mensual del clima

Como se plantea en la norma ASHRAE 55, para una aceptabilidad del 90% de los usuarios se deberá utilizar un rango de 2,5 °C por encima y por debajo de la temperatura de confort obtenida, estimando así la zona de confort.

Una vez calculada la zona de confort, los grados-hora de malestar térmico se obtienen de la sumatoria de los grados en que se sobrepasan estos umbrales en determinado lapso de tiempo, es decir: si el valor de la temperatura a una hora dada supera el umbral superior de la zona de confort, se obtiene una cantidad

de grados-hora de malestar por calor igual a la resta entre ambos; si en cambio se encuentra por debajo del umbral inferior, se tiene una cantidad de grados-hora de malestar por frío igual a la resta entre ambos negativo. Si la temperatura se encuentra en el rango de confort el valor no se contabiliza sino que se computa como cero.

Basados en lo anterior y en lo que respecta al caso de estudio, tanto la alternativa N° 1 como la N° 3 se basan en sistemas activos de climatización, por lo que obtienen automáticamente la puntuación máxima de 100, mientras que la puntuación de la alternativa N° 2 depende del cálculo de los grados-hora de malestar térmico.

Ahora bien, con una temperatura de confort para el caso de estudio de 25,3°C, y asumiendo el criterio de 2,5°C por encima y por debajo de este valor según la norma ASHRAE 55, se obtiene una zona de confort comprendida entre 22,8°C y 27,8°C, por lo tanto, según los resultados documentados en el proyecto donde se indica que los rangos de temperatura obtenidos con la alternativa N° 2 se encuentran entre 23,1°C y 24,9°C, se concluye que esta alternativa no genera grados-hora de malestar térmico, por lo que se le asigna la máxima puntuación de 100 al igual que al resto de las alternativas estudiadas.

La normalización en el rango de 0 a 1 se realiza en este caso de acuerdo con la fórmula de normalización 2B, que arrojan los resultados que podemos ver en el cuadro 15:

Cuadro 15. Valoración normalizada de alternativas según el indicador de confort higrotérmico

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	1,00	1,00	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Seguridad y salud

Para el análisis de este indicador se propone abordar tres ámbitos particulares: primero, en lo que se refiere a los trabajadores en obra, el de la mano de obra; en segundo lugar, el de la comunidad contigua al área de construcción y, por último, el del usuario durante la etapa de funcionamiento (Wells, 2003).

Por lo general el momento de la construcción y/o de la instalación en obra es el más importante ya que los trabajadores en la construcción tienen entre tres y cuatro veces más probabilidad de morir por accidentes de trabajo que el resto de los trabajadores (López, 2001). Por lo tanto, con el propósito de establecer un criterio cuantitativo para el análisis de este indicador, se propone contabilizar el área de construcción y/o de demolición propuesta en las partidas presupuestarias de cada alternativa evaluada, en el entendido de que mientras mayor sea el área, mayor será el riesgo de accidente en la etapa de construcción, obteniendo así los resultados que se recogen en el cuadro 16.

Igualmente se plantea tomar en consideración la inversión en seguridad y salud a través del número de estrategias propuestas, en

el entendido cuanto mayor sea el número de medidas de salud y seguridad implementadas, menor será el riesgo. Asimismo, la seguridad durante el uso de los sistemas de climatización es otro ámbito importante a considerar, que probablemente podría ser necesario abordar mediante estudios particulares de la tecnología de climatización seleccionada, en especial cuando se plantee el uso de nuevas tecnologías que, por su carácter novedoso e innovador, pudieran no disponer de la información necesaria en cuanto a seguridad y salud de los usuarios.

En todo caso, para efectos del caso seleccionado, todas las alternativas estudiadas tienen la misma puntuación en lo que respecta a los dos últimos ámbitos propuestos para este indicador, ya que no existe diferenciación documentada al respecto. Por lo tanto, la normalización de los valores anteriores de 0 a 1 utilizando la fórmula 3B, queda como muestra el cuadro 17.

Calidad del aire interior

Para la aplicación de este indicador a nivel de proyecto se recurre al cálculo de las renovaciones de aire, entendidas estas como la

Cuadro 16. Estimación del área de construcción y/o de demolición (en m²) por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Área de construcción (en m²)	64	728	2.140

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 17. Valoración normalizada de alternativas según el indicador de seguridad y salud

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	1,00	0,84	0,50

Fuente: Elaboración propia.

cantidad de aire fresco (expresada en m^3 que es introducida a un espacio para retirar los posibles contaminantes en el interior. En el caso de estudio se obtiene esta información de la documentación existente para cada una de las alternativas, con los resultados que se observan en el cuadro 18.

La normalización de estos valores en la escala de 0 a 1 se realiza mediante la utilización de la fórmula 3B, obteniendo el resultado que ofrece el cuadro 19.

Confort acústico

En el campo de la climatización de edificaciones, el nivel de ruido y vibración en los espacios interiores es una variable que se debe ser considerada durante el período de funcionamiento de los equipos y/o sistemas, por ello introducir este indicador y tomarlo

en cuenta desde la fase de diseño tiene como objetivo prever su impacto sobre el confort de los usuarios.

Para la estimación de este indicador a nivel de proyecto se propone utilizar rangos de tolerancia estimados con base en la Norma Convenin 1565:1995 sobre ruido ocupacional, de la siguiente manera: Niveles hasta 45 se considerarán dentro de la zona de confort o bienestar; entre 46 y 84 se entenderán como ruidos molestos, y aquellos superiores a 85 serán considerados nocivos.

Para el caso de estudio, el análisis acústico se realizó basado en la documentación técnica suministrada por los fabricantes o diseñadores de cada tecnología propuesta, por lo que los resultados expresados el cuadro 20, corresponden a la información disponible y documentada para cada alternativa estudiada.

Cuadro 18. Estimación de las renovaciones de aire exterior (en m^3/h) por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Renovación de aire exterior (m^3/h)	1.350,00	2.380,00	1.350,00

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 19. Valoración normalizada de alternativas en cantidad de m^3/h de aire exterior renovado en el espacio

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,50	1,00	0,50

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 20. Estimación del nivel de ruido (en dB) por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Nivel de ruido (en dB)	60	25	60

Fuente: Elaboración propia.

La normalización de estos valores en la escala de 0 a 1 se realiza mediante la utilización de la fórmula 2B, obteniendo los resultados que muestra el cuadro 21.

Participación y control

La participación ciudadana y el control del proyecto puede analizarse desde dos ámbitos: el primero, respecto a la participación directa de las comunidades en el proyecto, lo cual puede consistir desde aportes para su concepción, hasta mano de obra en alguna de las fases del ciclo de vida. En una segunda instancia, este indicador puede aplicarse considerando los esfuerzos por difundir la existencia y objetivos del proyecto en las comunidades. De hecho, el acceso a la información del proyecto a través de páginas web y otros medios de difusión son considerados aspectos fundamentales en el logro de la sostenibilidad de los proyectos (Aguado et al., 2008).

En el caso de estudio ninguna de las alternativas consideró periodos de consulta abierta a las comunidades para la retroalimentación de las propuestas, a la vez que no consideraron su difusión pública en el entendido de que se trata de un proyecto de capital privado, por lo que para el análisis de este indicador nos enfocamos en la estimación de la mano de obra local requerida para la construcción y/o instalación de cada uno de los sistemas. Se recurre entonces a una valoración subjetiva cuantificable mediante la estimación de la cantidad de mano de obra no especializada requerida respecto al total de trabajadores. Para este fin se toman como referencia los análisis de precios unitarios de las partidas presupuestarias en cada caso, obteniendo los resultados registrados en el cuadro 22.

La normalización en el rango de 0 a 1 se realiza en este caso, de acuerdo con la fórmula de normalización 2A, arrojando los resultados que se observan en el cuadro 23.

Cuadro 21. Valoración normalizada de alternativas según nivel de ruido dentro del recinto

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,42	1,00	0,42

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 22. Estimación de la cantidad de mano de obra local requerida por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Mano de obra local	15	29	42

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 23. Valoración normalizada de alternativas según cantidad de mano de obra local requerida

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,36	0,69	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Respeto al patrimonio histórico y cultural

Este indicador tiene como objetivo establecer el grado de adaptación del proyecto al entorno, asumiendo las variables históricas y culturales. Se trata de un indicador cualitativo basado en el juicio de expertos o en posibles encuestas o entrevistas a la comunidad. Especial importancia adquiere este indicador cuando el proyecto está relacionado con una edificación patrimonial, histórica o de gran valor en la sociedad. La adopción de criterios de respeto a la cultura local desde las etapas tempranas favorece una mayor integración del proyecto con el entorno, permitiendo así una mayor aceptación social. Su valoración es cualitativa, con base en juicios de expertos, basados en análisis referidos al patrimonio histórico, artístico, costumbres y estética del lugar. Cuanto mayor es la puntuación menor es el respeto hacia este indicador, por lo tanto, para su normalización en el rango de 0 a 1, se recurre a la fórmula 1B.

Sin embargo, en este caso práctico, no se consideró en ninguna de las alternativas estudiadas las variables históricas y culturales, por lo tanto, con respecto a este indicador no se observa diferencia alguna entre las alternativas

quedando los resultados para la valoración final como se ofrece en el cuadro 24.

Responsabilidad social

Las estrategias de responsabilidad social en proyectos de climatización pueden ser muy variadas y disímiles entre sí. Pueden estar enfocadas en el adiestramiento de mano de obra, en la educación de las comunidades sobre determinado aspecto asociado al proyecto, en los esfuerzos por la disminución de los impactos ambientales, en ayudas económicas, etc.

El objetivo de este indicador se centra en el interés que demuestra el proyecto por el entorno social y económico donde se desarrolla, así como en la interacción con el conjunto de la sociedad. En definitiva, es un criterio cualitativo desarrollado por expertos con base en las distintas estrategias que con esta orientación se propongan dentro del proyecto.

A continuación, en el cuadro 25, se muestran las valoraciones cualitativas de este indicador asumidas por los expertos que participaron en el proyecto. Una puntuación máxima de 10 representa el mayor interés social, mientras que 0 representa el menor interés.

Cuadro 24. Valoración normalizada de alternativas en cuanto al respeto del patrimonio histórico y cultural

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,50	0,50	0,50

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 25. Valoración de la responsabilidad social en alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Responsabilidad social	2,50	5,50	5,00

Fuente: Elaboración propia.

La normalización mediante la fórmula 1A de los resultados anteriores en un rango de 0 a 1 resulta como muestra el cuadro 26.

Consumo de energía en ciclo de vida

La estimación del consumo de energía en cada una de las alternativas estudiadas que se registra en el cuadro 27, se realizó utilizando el mismo procedimiento que para las emisiones de CO₂, tomando como referencia la información suministrada por la base de datos BEDEC del Instituto Tecnológico de la Construcción de Cataluña (ITeC, 2016), obteniendo finalmente los valores totales estimados para cada alternativa representados en KWh.

Al normalizar los resultados en un rango de 0 a 1 mediante la utilización de la fórmula 3B, se obtuvieron los resultados que se muestran en el cuadro 28.

Transporte

Se propone su uso mediante el cálculo de la distancia que existe entre la obra y el lugar de fabricación de los principales equipos y/o componentes considerados en el proyecto. Sin embargo, debido a que mayor será el impacto cuanto más lejano sea el origen del producto, para la aplicación de este indicador se asume la siguiente consideración: si el material, componente, equipo, etc. requiere un transporte hasta la obra no mayor a 700 km, obtiene una puntuación de cero (0). Entre 700 Km y 3000 Km, obtiene una puntuación de uno (1). Entre 3000 y 6000 Km, obtiene una puntuación de dos (2).Y para distancias mayores a 6000 Km, se puntuará con tres (3).

Con base en lo anterior, para el caso de estudio se utilizaron las partidas presupuestarias de cada alternativa estudiada con el fin

Cuadro 26. Valoración normalizada de alternativas según su responsabilidad social

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,00	1,00	0,83

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 27. Consumo total de energía (en por alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Energía total (KWh)	13.461.065,90	567.671,71	8.514.074,69

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 28. Valoración normalizada de alternativas según consumo de energía

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,5	1,00	0,69

Fuente: Elaboración propia.

de estimar su impacto referente al transporte. Las puntuaciones obtenidas en cada una de las partidas presupuestarias se sumaron para arrojar el total de cada alternativa como muestra el cuadro 29.

La normalización de estos valores en la escala de 0 a 1 se realiza mediante la utilización de la fórmula 2B, obteniendo el resultado que se registra en el cuadro 30.

Costo del ciclo de vida

Este indicador reviste gran importancia para la evaluación de la sostenibilidad en los proyectos, como en efecto se destaca en la

norma ISO 21929 2011. Está compuesto por los siguientes factores: la inversión inicial, el mantenimiento, la demolición y –en caso de que existieran– los ingresos por explotación, que en este caso no aplica. Por lo tanto, al considerar una vida de útil de 15 años para cada una de las alternativas se pudo incluir en el análisis los costos por mantenimiento y disposición final, siendo el costo estimado global para cada una de las alternativas estudiadas el que se muestra en el cuadro 31.

Al normalizar en un rango de 0 a 1 mediante la utilización de la fórmula 3B se obtuvieron los resultados que se recogen en el cuadro 32.

Cuadro 29. Puntuación correspondiente al transporte asociado a cada alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Distancia por transporte	3	1	3

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 30. Valoración normalizada de alternativas según distancia de transporte

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,33	1,00	0,33

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 31. Costo global asociado al ciclo de vida para cada alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Costo global (USD\$)	54.928,71	70.769,34	160.678,00

Fuente: Elaboración propia con información del proyecto.

Cuadro 32. Valoración normalizada de alternativas según ciclo de vida

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	1,00	0,93	0,50

Fuente: Elaboración propia.

Acreditación / Certificación de calidad

El objetivo de este indicador es valorar si el proyecto contempla el uso de equipos, materiales o procesos certificados por alguna institución reconocida, de manera que demuestren mayor calidad, menor impacto o mayor eficiencia en comparación con los equipos, materiales o procesos tradicionales, según sea el caso. Cuanta mayor cantidad de certificaciones posea el proyecto, mejor valorado estará este indicador, por lo que para su normalización de 0 a 1 para efecto de su valoración final se deberá utilizar la fórmula 2A.

Sin embargo, a nivel del caso de estudio no se consideró en ninguna de las alternativas estudiadas la utilización de equipos, materiales y/o procesos certificados, por lo que no se observa diferencia alguna de este indicador entre las alternativas como lo muestran los resultados para la valoración final del cuadro 33.

Vulnerabilidad ante desastres naturales

Este indicador se fundamenta en estudios que toman en cuenta la proximidad del proyecto a zonas inundables o cercanas a la costa, así como estudios de vulnerabilidad ante terremotos, tornados, deslaves, etc. Es de gran uti-

lidad para este análisis disponer de mapas de vulnerabilidad y riesgo del territorio adyacente al proyecto, así como contar con los estudios completos de impacto ambiental.

En lo que respecta al caso de aplicación no se dispone de ningún estudio ni información referente a la vulnerabilidad ante desastres naturales, por lo tanto, no se observa diferencia alguna de este indicador entre las alternativas por lo que los resultados para la valoración final son los que ofrece el cuadro 34.

Vulnerabilidad ante el cambio climático

Este es un indicador novedoso e inusual en la mayoría de los sistemas de evaluación y certificación de edificaciones. No obstante, surge de la necesidad de adaptación de las distintas actividades humanas a los cambios que se espera se generen por efecto del cambio climático –según estimaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático–IPCC (2007a y 2007b). Para la aplicación de este indicador se recurre a la opinión de expertos, sustentada con estudios que analicen los posibles efectos del cambio climático en las zonas de influencia del proyecto, así

Cuadro 33. Valoración normalizada de alternativas respecto al indicador acreditación y/o certificación de calidad

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,50	0,50	0,50

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 34. Valoración normalizada de alternativas respecto al indicador vulnerabilidad ante desastres naturales

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,50	0,50	0,50

Fuente: Elaboración propia

como el análisis propio de cada tecnología de climatización propuesta.

En lo que respecta al caso de aplicación no se dispone de estudios ni información referente a las implicaciones del cambio climático en el proyecto. Sin embargo, se consultó a los expertos que participaron en su elaboración con el fin de que valoraran la vulnerabilidad de la tecnología propuesta en cada alternativa ante los posibles cambios climáticos, como registra el cuadro 35. Una puntuación máxima de 10 representa la mayor vulnerabilidad, mientras que 0 representa la menor.

La normalización de los resultados anteriores en un rango de 0 a 1 mediante la aplicación de fórmula 1B se muestra en el cuadro 36.

Previsión para la deconstrucción

El diseño que incorpore la deconstrucción al finalizar el ciclo de vida es algo poco común en

los proyectos de climatización. Para ello sería fundamental contar desde el inicio con equipos multidisciplinarios de expertos en demolición, deconstrucción o rehabilitación de infraestructuras que permitan concebir el proyecto tomando en consideración el fin de su vida útil, así como posibles modificaciones y/o cambios de uso. La consideración de este criterio dentro de la toma de decisiones permite disponer de una visión integral del proyecto, no sólo respecto a la fase de construcción, sino también en lo que respecta a su flexibilidad y adaptabilidad ante posibles modificaciones futuras.

En el caso de estudio no existen datos ni información respecto a este indicador en ninguna de las alternativas propuestas, por lo que se califican todas las alternativas con la misma puntuación respecto a este criterio. Los resultados para la valoración final se muestran en el cuadro 37.

Cuadro 35. Puntuación correspondiente a la vulnerabilidad por cambio climático de cada alternativa estudiada

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Vulnerabilidad ante el cambio climático	1,00	7,00	3,00

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 36. Valoración normalizada de alternativas según su vulnerabilidad ante el cambio climático

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	1,00	0,00	0,67

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 37. Valoración normalizada de alternativas respecto a la previsión para la deconstrucción

	Alternativa N° 1	Alternativa N° 2	Alternativa N° 3
Valor normalización	0,50	0,50	0,50

Fuente: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El resultado de la valoración normalizada en el rango de 0 a 1 con los pesos parciales y totales de cada uno de los indicadores aplicados al caso de estudio están recogidos en el cuadro 38.

Una vez obtenidos estos resultados se continúa con la aplicación del algoritmo de aná-

lisis multicriterio PRES, mediante el desarrollo de una matriz decisional con los pesos de cada indicador junto a la valoración normalizada para cada alternativa (cuadro 39).

En segunda instancia se desarrolla una matriz de dominación para cada indicador comparando cada alternativa con las demás, siendo el valor de cada elemento de la matriz el resulta-

Cuadro 38. Síntesis de resultados normalizados producto de la aplicación del sistema de indicadores al caso de estudio

Pilares	Peso	Macro-Indicadores	Alternativa N° 1 (NORMALIZACIÓN)	Alternativa N° 2 (NORMALIZACIÓN)	Alternativa N° 3 (NORMALIZACIÓN)	Max. Puntuación posible	Peso del criterio
Ambiental	0,337	1.1.- Emisiones de CO2	0,50	1,00	0,69	1,00	0,061
		1.2.- Materiales y/o sustancias peligrosas	1,00	0,50	0,72	1,00	0,054
		1.3.- Huella Ecológica	0,50	1,00	0,68	1,00	0,049
		1.4.- Consumo de materiales	1,00	0,94	0,50	1,00	0,045
		1.5.- Uso de energías renovables	0,50	0,50	0,50	1,00	0,045
		1.6.- Generación de residuos	1,00	0,57	0,14	1,00	0,042
		1.7.- Consumo de agua	1,00	0,29	0,01	1,00	0,041
Social	0,315	2.1.- Confort higrotérmico	1,00	1,00	1,00	1,00	0,054
		2.2.- Seguridad y salud	1,00	0,84	0,50	1,00	0,052
		2.3.- Calidad del aire interior	0,50	1,00	0,50	1,00	0,052
		2.4.- Confort acústico	0,42	1,00	0,42	1,00	0,043
		2.5.- Participación y control	0,36	0,69	1,00	1,00	0,040
		2.6.- Respeto al patrimonio histórico y cultural	0,50	0,50	0,50	1,00	0,038
		2.7.- Responsabilidad social	0,00	1,00	0,83	1,00	0,037
Económico	0,347	3.1.- Consumo de energía en ciclo de vida	0,50	1,00	0,69	1,00	0,066
		3.2.- Transporte	0,33	1,00	0,33	1,00	0,054
		3.3.- Costo del ciclo de vida	1,00	0,93	0,50	1,00	0,051
		3.4.- Acreditación / Certificación de calidad	0,50	0,50	0,50	1,00	0,048
		3.5.- Vulnerabilidad ante desastres naturales	0,50	0,50	0,50	1,00	0,044
		3.6.- Vulnerabilidad ante el cambio climático	1,00	0,00	0,67	1,00	0,043
		3.7.- Previsión para la deconstrucción	0,50	0,50	0,50	1,00	0,042

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 39. Matriz decisional

	1.1.- Emisiones de CO2	1.2.- Materiales y/o sustancias peligrosas	1.3.- Huella Ecológica	1.4.- Consumo de materiales	1.5.- Uso de energías renovables	1.6.- Generación de residuos	1.7.- Consumo de agua	2.1.- Confort higrotérmico	2.2.- Seguridad y salud	2.3.- Calidad del aire interior	2.4.- Confort acústico	2.5.- Participación y control	2.6.- Respeto al patrimonio histórico y cultural	2.7.- Responsabilidad social	3.1.- Consumo de energía en ciclo de vida	3.2.- Transporte	3.3.- Costo del ciclo de vida	3.4.- Acreditación / Certificación de calidad	3.5.- Vulnerabilidad ante desastres naturales	3.6.- Vulnerabilidad ante el cambio climático	3.7.- Previsión para la deconstrucción
Peso del indicador	0,061	0,054	0,049	0,045	0,045	0,042	0,041	0,054	0,052	0,052	0,043	0,040	0,038	0,037	0,066	0,054	0,051	0,048	0,044	0,043	0,042
Alternativa N° 1	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,42	0,36	0,50	0,00	0,50	0,33	1,00	0,50	0,50	1,00	0,50
Alternativa N° 2	1,00	0,50	1,00	0,94	0,50	0,57	0,29	1,00	0,84	1,00	1,00	0,69	0,50	1,00	1,00	1,00	0,93	0,50	0,50	0,00	0,50
Alternativa N° 3	0,69	0,72	0,68	0,50	0,50	0,14	0,01	1,00	0,50	0,50	0,42	1,00	0,50	0,83	0,69	0,33	0,50	0,50	0,50	0,67	0,50

Fuente: Elaboración propia.

do de la suma de las diferencias entre cada valoración normalizada, multiplicada por el peso de cada criterio.

El valor correspondiente a cada posición de la matriz de dominación representa hasta qué punto la alternativa i domina o es preferida respecto a la alternativa j . Los valores de las distintas filas representan hasta qué punto la alternativa de esa fila domina a las demás. Del mismo modo, los valores de una columna indican hasta qué punto la alternativa de esa columna es dominada por las demás alternativas. Se entiende que la alternativa i domina a la j para un criterio k , si la diferencia de valor de d_{ik} y d_{jk} para el criterio es positiva.

Finalmente se suma el resultado de cada matriz obtenida para cada indicador evaluado con el fin de generar la matriz de dominación definitiva. Una vez generada esta matriz se calculan para cada alternativa tres valores. El valor D_i , que se obtiene de la suma de todos los valo-

res de la fila. El valor d_i que se obtiene de la suma de todos los valores de la columna i . Y el Índice PRES que se obtiene de la división entre D_i y d_i , mostrando la proporción con que la alternativa i domina al resto de alternativas (cuadro 40).

En esta matriz se muestra la dominación de la alternativa 2 sobre el resto, con un índice dos veces y media mayor que la alternativa 1 y casi siete veces superior a la alternativa 3. Por lo tanto, en este caso de estudio se evidencia claramente que la alternativa N° 2 es muy superior al resto en lo que se refiere a la sostenibilidad.

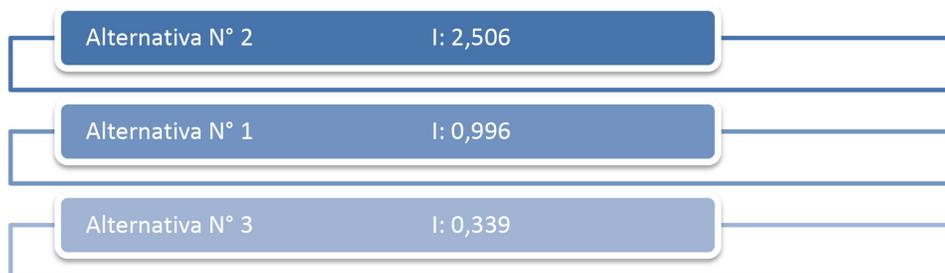
Al generar un esquema simplificado con las alternativas estudiadas y el índice de dominación logrado en cada caso, se obtiene una herramienta sencilla y útil a utilizar por el equipo encargado de la toma de decisiones, con miras a facilitar la selección de la alternativa de climatización definitiva en lo que respecta al desarrollo sostenible (cuadro 41).

Cuadro 40. Matriz de dominación con Índice PRES

	A1	A2	A3	D	I
A1	0	0,132	0,181	0,312	0,996
A2	0,225	0	0,238	0,463	2,506
A3	0,089	0,053	0	0,142	0,339
d	0,314	0,185	0,418		

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 41. Esquema de dominación de las alternativas estudiadas



Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, tomando en consideración el resultado obtenido por cada alternativa según los pilares del desarrollo sostenible, se realiza una representación gráfica de gran utilidad para facilitar la toma de decisiones (gráfico 1). En ella se evidencia que la alternativa N° 2 también es superior al resto en lo que respecta a los pilares de la sostenibilidad, a la vez que posee un mayor equilibrio entre ellos.

CONCLUSIONES

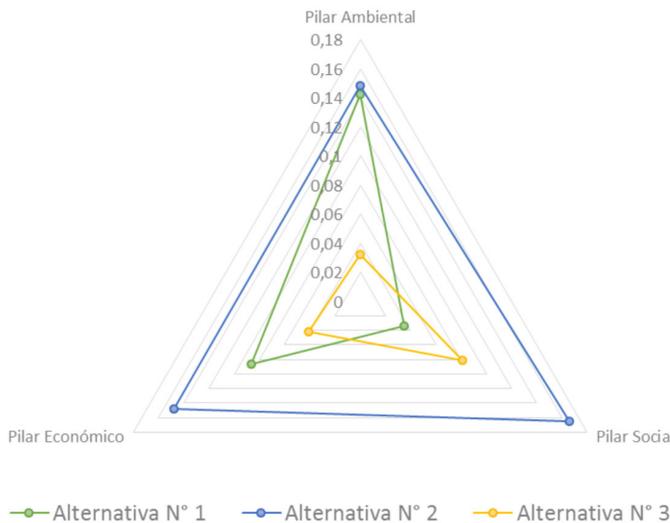
Los resultados obtenidos, entre otras cosas, demuestran que a pesar de la existencia de cada vez más tecnologías innovadoras de climatización –caracterizadas estas por su eficiencia energética frente al logro del confort térmico, y denominadas pasivas o cuasi pasivas– no en todos los casos su aplicación repercute positivamente en el logro de la sostenibilidad de las edificaciones, y esto se debe principalmente a que sólo se sabrá su verdadera contribución una vez se analicen todas las variables pertinentes a nivel social, ambiental y económico. Por lo tanto, se pueden obtener resultados donde se indique que el uso de sistemas tradicionales de climatización Activos o de poca eficiencia energética pudieran ser incluso más sostenibles que la aplicación de algún otro sistema de climatización de bajo consumo energético, ya que su impacto negativo en el ámbito ambiental, social y económico podría ser mucho mayor, como en efecto se constató al comparar la alternativa N° 3 con la alternativa N° 1.

Esto demuestra que la aplicación de este modelo para la evaluación de proyectos de climatización no siempre arrojará como resultado una alternativa óptima respecto a todos los indicadores, tal y como se pudo observar en el caso de las alternativas N° 1 y N° 3, donde se evidenció que por ejemplo la alternativa N° 1 se comporta muy bien en el ámbito ambiental y económico, mientras demuestra clara debilidad en lo social, mientras que la alternativa N° 2 se comportó de manera opuesta. Por lo tanto, se entenderá que la solución con mejor comportamiento será aquella que más se acerque a la solución óptima según los pesos atribuidos y que a su vez posea el mayor equilibrio entre todos los pilares del desarrollo sostenible. Es por esto, que la alternativa N° 2 –entre las tres que fueron evaluadas– fue sin lugar a dudas la que arrojó el mejor resultado.

Por este motivo, el modelo de indicadores utilizado –pensado para ser aplicado desde la concepción misma del proyecto y no como una herramienta de certificación posterior– demostró ser una herramienta adecuada para identificar las alternativas más sostenibles como ayuda a la toma de decisiones previo a la construcción, así como previo a la certificación de sostenibilidad de edificaciones.

Gráfico 1. Valoración de cada alternativa según pilares del desarrollo sostenible

Valoración - Pilares de Sostenibilidad



Fuente: Elaboración propia.

NOTAS

1 Algoritmo PRES, Desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia: es un conjunto de operaciones sistemáticas que permite realizar un cálculo de múltiples alternativas entre sí.

2 Con base en un conjunto de operaciones sistemáticas establecidas en el algoritmo PRES, la Universidad Politécnica de Valencia desarrollo el método PRES II, como protocolo simplificado para el análisis de múltiples alternativas entre sí, y con participación multiexperto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguado, A.; Alarcón, B. y Manga, R. (2008) "Razón de ser del anejo ICES de la EHE y características del mismo", Revista *Cemento y Hormigón* 913.

Allard, F. y Belarbi, R. (1998) *Metodología de evaluación de técnicas pasivas de enfriamiento*, en: Memorias del Primer Simposio Venezolano de Confort Térmico y Comportamiento de Edificaciones-COTEDI 1998, Caracas, Venezuela.

ASHRAE Standard 55 (2004) *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta, ASHRAE Inc.

Calderón, E.; Pronello, C. y Goger, T. (2009) "Integrated assessment of environmental impact of traffic and transport infrastructure", *Cost Action* 350, Madrid.

Cam, W. (2012) *Technologies for Climate Change Mitigation, Building Sector*. Centre on Energy, Climate and Sustainable Development. Programa de Naciones Unidas para el desarrollo, PNUD (UNDP por sus siglas en inglés) Copenhague, Dinamarca.

Castillo, J.; Lira, A.; Muñoz, J.; Ramírez, A.; Juárez, N.; Rojas, J. y Huelsz, G. (2011) *Uso de sistemas pasivos de climatización en la zona de Temixco Morelos con clima cálido semi-húmedo*, en: Memorias del XXXV Congreso Nacional de Energía Solar ANES 2011. Chihuahua, México.

Chyee, D., y Kubota, T. (2009) *Analysis of night ventilation potential for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia*. PLEA 2009. Architecture Energy and the Occupant's Perspective: Proceedings of the 26th International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Quebec, Canadá.

Covenin-Comisión Venezolana de Normas Industriales 1565:1995 (1995) *Ruido ocupacional. Programa de conservación auditiva. Niveles permisibles y criterios de evaluación, 3ª revisión*. Caracas, Venezuela.

De Dear, R. y Brager, G. (2002) "Thermal comfort in naturally ventilated building: Revisions to ASHRAE Standard 55", *Energy and Buildings*, Vol. 34, Nº 6.

Doménech, J.; Carballo, A.; Jiménez, L. y de la Cruz, J. (2010) *Estándares de huella de carbono MC3 V.2*. Décimo Congreso Nacional de Medio Ambiente CONAMA 10. Madrid, España.

Figuerola, A.; Fuentes, V.; Castorena, M.; Chávez, R.; Valerdi, H.; Tovar, I.; Torres, E.; Morales, Y.; Olivares, G. y Campos, A. (2011) *Uso de sistemas pasivos de climatización en el área norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, en: Memorias del XXXV Congreso Nacional de Energía Solar ANES 2011. Chihuahua, México.

Finocchiaro, L.; Wigenstad, T., y Hestnes, A. (2010) *Potential of passive cooling, natural ventilation and solar control in cold climates office buildings*. Zero emission buildings, proceedings of Renewable Energy Conference 2010. Trondheim, Noruega.

- Geetha, N., y Velraj, R. (2012) "Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage – A review", *Revista Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, volumen 29, N° 2.
- González, E. (1997) "Técnicas de enfriamiento pasivo. Resultados experimentales en el clima cálido y húmedo de Maracaibo, Venezuela". *Revista CIT-Información Tecnológica*, volumen 8, N° 5. La Serena, Chile.
- González, S. (2011) Estudio experimental del comportamiento térmico de sistemas pasivos de enfriamiento en clima cálido-húmedo. Tesis de maestría no publicada. Universidad Internacional de Andalucía, España.
- Hobaica, M.E.; Belarbi, R. y Rosales, L. (2001) "Los sistemas pasivos de refrescamiento de edificaciones en clima tropical húmedo", *Revista Tecnología y Construcción*, Volumen 17, N° 1. Caracas, Venezuela.
- Huelsz, G.; Ochoa, M.; López, P.; Gómez, A. y Figueroa, A. (2011) *Uso de sistemas pasivos de climatización en cinco zonas de la República Mexicana*, en Memorias del XXXV Congreso Nacional de Energía Solar ANES 2011. Chihuahua, México.
- IPCC (2007a) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Paperback, Cambridge University, United Kingdom and New York, EEUU.
- IPCC (2007b) *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Paperback, Cambridge University, United Kingdom and New York, EEUU.
- ISO 21929 (2011) *Sustainability in building construction: Sustainability indicators. Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings*. International Organization for Standardization. Londres, Reino Unido.
- ITeC (2016) *Banco de Datos BEDEC*. Instituto Tecnológico de la Construcción de Cataluña: www.itec.es Actualizado en noviembre 2016.
- Kubota, T. y Toe, D. (2012) *Re-evaluating passive cooling techniques of traditional Malay houses in Malaysia*. **Proceedings** – 4th International Network for Tropical Architecture Conference INTA 2012. Ciudad de Singapur, Singapur.
- Levine, M.; Urge-Vorsatz, D.; Blok, K.; Geng, L.; Harvey, D.; Land, S.; Levermore, G.; Mongameli, A.; Mirasgedis, S.; Novikova, A.; Rilling, J.; Yoshino, H. (2007) *Residential and commercial buildings in Climate Change 2007: Mitigation*. Contribución del grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de evaluación del grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Universidad de Cambridge. New York, EEUU.
- López, A. (2001) "Occupational Safety and Health in Construction Work", *African Newsletter on Occupational Health and Safety*, 11/1, Published by the Finnish Institute of Occupational Health. Toeliksenukatu Helsinki, Finlandia.
- López, P.; Roux, R.; Espuna, A. y García, V. (2011) Caracterización y uso de sistemas pasivos de climatización en viviendas de la zona metropolitana de Tampico, Madero, Altamira y Tamaulipas, en Memorias del XXXV Congreso Nacional de Energía Solar ANES 2011. Chihuahua, México.
- Lorenzo, E. (2007) Climatización pasiva por conductos enterrados. Caso de aplicación: Almacenes L&G para bebidas alcohólicas y gaseosas. Tesis de especialización no publicada. IDEC-UCV, Caracas, Venezuela.

- Lorenzo, E. (2017) Metodología para la evaluación de tecnologías de climatización en el marco de la sostenibilidad. Tesis doctoral no publicada. USB, Caracas, Venezuela.
- Lorenzo, E. (2018) *Evaluación de sistemas de climatización en el marco de la sostenibilidad. revisión sistemática de estudios realizados entre el año 2000 y 2015*. Memorias de las XXXVI jornadas de investigación del IDEC. Ediciones Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Caracas, Venezuela.
- Lorenzo, E. ; Hobaica, M. y Conti, A. (2008) "Desarrollo experimental de un prototipo del sistema de tubos enterrados", *Revista Tecnología y Construcción*, volumen 24, N° 1. Caracas, Venezuela.
- Madhumathi, A.; Sundarraja, B. (2012) "Experimental study of passive cooling of building façade using phase change materials to increase thermal comfort in buildings in hot humid areas", *Revista International Journal of Energy and Environment*, volumen 3, N° 5.
- Pérez, L.; Ortiz, J.; y Pout, C. (2008) "A review on buildings energy consumption information", *Revista Energy and Buildings*, volumen 40, N° 3.
- Piñate, A. (2016) Diseño de un sistema pasivo de enfriamiento por techo estanque. Caso de estudio: local comercial en Caracas. Tesis de especialización no publicada. Caracas, Venezuela.
- Piñate, A.; Rosales, L. y Lorenzo, E. (2013) "Estudio Experimental de un Sistema Pasivo de Enfriamiento por Techo Estanque", *Revista Tecnología y Construcción*, volumen 29, N° 1. Caracas, Venezuela.
- Prado, V. (2015) Estrategias pasivas para la reducción del consumo energético en edificios de oficinas. Tesis de especialización no publicada. Caracas, Venezuela.
- Santamouris, M.; Pavlou, K.; Synnefa, A.; Niachou, K. y Kolokotsa, D. (2007) "Recent progress on passive cooling techniques. Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households", *Revista Energy and Buildings*, volumen 39, N° 7.
- Santamouris, M. y Kolokotsab, D. (2013) "Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art. *Revista Energy and Buildings*, volumen 57.
- Sanusi, A., Shao, L., y Ibrahimb, N. (2013) "Passive ground cooling system for low energy buildings in Malaysia hot and humid climates", *Revista Renewable Energy*, volumen 49.
- Sivak, M. (2013) "Will AC Put a Chill on the Global Energy Supply?", *Revista American Scientist*, Volumen 101, N° 5.
- Tetsu, K. y Doris C. (2010) "Potential of Passive Cooling Techniques for Modern Houses in the Tropical Climate of Malaysia - Analysis of the Indoor Thermal Environment for Various Ventilation Strategies", *Revista International Journal of Ventilation*, volume 9, N° 1.
- Toe, D. y Kubota, T. (2014) Potential application of vernacular passive cooling techniques to naturally ventilated modern terraced houses in hot-humid climate of Malaysia. Efficient, High-Performance Buildings for Developing Economies Conference. Manila, Philippines.
- Wells, J. (2003) "Social aspects of sustainable construction: an ILO perspective", *Industry & Environment*, volume 26 N° 2/3.
- Xinhua, X.; Shengwei, W. y Zhenjun, M. (2008) "Evaluation of plume potential and plume abatement of evaporative cooling towers in a subtropical region", *Revista Applied Thermal Engineering*, 0