

Metodología para el estudio comparativo de propuestas tecnológicas-constructivas orientada al mejoramiento de la eficiencia energética de la envolvente edilicia

Methodology for the comparative study of technological-constructive proposals aimed at improving the energy efficiency of building envelopes

Metodologia para o estudo comparativo de propostas tecnológicas-constructivas voltadas para a melhoria da eficiência energética da envolvente edilícia

DOI: <https://doi.org/10.18861/ania.2024.14.2.3802>

Dr. Dante Andrés Barbero

Instituto de investigaciones y políticas del ambiente construido (IIPAC), Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-Universidad Nacional de La Plata (UNLP)
dantebarbero@iipac.laplata-conicet.gov.ar
ORCID: 0000-0002-7820-2388

Arq. Irene Martini

Instituto de investigaciones y políticas del ambiente construido (IIPAC), Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-Universidad Nacional de La Plata (UNLP).
emiliaurtenche@iipac.laplata-conicet.gov.ar
ORCID: 0000-0002-2435-8424

Arq. Emilia Urtenche

Instituto de investigaciones y políticas del ambiente construido (IIPAC), Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-Universidad Nacional de La Plata (UNLP)
emiliaurtenche@iipac.laplata-conicet.gov.ar
ORCID: 0000-0002-2435-8424

Recibido: 06/04/2024

Aceptado: 24/10/2024

Cómo citar:

Barbero, D. A., Urtenche, E., & Martini, I. (2024). Metodología para el estudio comparativo de propuestas tecnológicas-constructivas orientada al mejoramiento de la eficiencia energética de la envolvente edilicia. *Anales de Investigación en Arquitectura*, 14(2). <https://doi.org/10.18861/ania.2024.14.2.3802>



Resumen

Los edificios hospitalarios suelen ser considerados los edificios públicos más ineficientes energéticamente en la mayoría de los países desarrollados. Al ser los que presentan el mayor consumo de energía por unidad de superficie, se convierten en excelentes objetivos para el ahorro de costos y para la incorporación de estrategias de eficiencia energética. Este trabajo presenta una metodología basada en un enfoque multicriterio orientada a evaluar estrategias de reciclado edilicio a partir de propuestas tecnológicas que consideren cualidades técnicas y económicas en el marco (de las pautas) del diseño pasivo. Este abordaje requiere de un diagnóstico previo de la situación tecnológico-constructiva de base de la edilicia construida, y de la identificación de variables de diseño con mayor incidencia en el ahorro energético y la mejora de la habitabilidad tanto en el total del establecimiento así como en sus áreas específicas. Una vez evaluados los aspectos técnicos y económicos vinculados con la eficiencia energética de la envolvente, se comparan las diferentes propuestas tecnológicas-constructivas para su mejoramiento usando el concepto de dominancia de Pareto. En caso de obtener como resultado más de una propuesta de mejoramiento óptima, es posible incorporar la opinión de diferentes actores para decidir finalmente la más conveniente. La metodología presentada es luego aplicada a modo de soporte a la toma de decisiones para la mejora de la eficiencia energética de la envolvente de un edificio del sector salud, pero podría aplicarse también en la edilicia de otros sectores (ej.: residencial, comercial, etc.). Los resultados obtenidos muestran que el reciclaje sistematizado de la edilicia existente, a partir de propuestas tecnológicas, avaladas por una metodología de selección

multicriterio que permita evaluar sus cualidades técnicas y económicas, representa una alternativa viable para intervenir en la envolvente de los edificios y sus sistemas constructivos.

Palabras claves: envolvente edilicia, eficiencia energética, ahorro energético, energías renovables, evaluación multicriterio, uso racional de la energía, comparación, análisis, consumo de energía, sustitución de fuentes.

Abstract

Hospital buildings are often considered the most energy inefficient public buildings in most developed countries. As they have the highest energy consumption per unit area, they become excellent targets for cost savings and for the incorporation of energy efficiency strategies. This work presents a methodology based on a multi-criteria approach aimed at evaluating building recycling strategies based on technological proposals that consider technical and economic qualities within the framework (of the guidelines) of passive design. This approach requires a prior diagnosis of the basic technological-construction situation of the built building, and the identification of design variables with a greater impact on energy savings and improvement of habitability both in the entire establishment as well as in their specific areas. Once the technical and economic aspects linked to the energy efficiency of the envelope have been evaluated, the different technological-construction proposals are compared for its improvement using the concept of Pareto dominance. If more than one optimal improvement proposal is obtained as a result, it is possible to incorporate the opinion of different actors to finally decide the most convenient one. The methodology presented is then applied to support decision-making to improve the energy efficiency of the envelope of a building in the health sector, but it could also be applied to buildings in other sectors (e.g., residential, commercial, etc.). The results obtained show that the systematized recycling of existing buildings, based on technological proposals, supported by a multi-criteria selection methodology that allows evaluating their technical

and economic qualities, represents a viable alternative to intervene in the envelope of buildings and their constructive systems.

Keywords: building envelope, energy efficiency, energy savings, renewable energies, multi-criteria evaluation, rational use of energy, comparison, analysis, energy consumption, source replacement.

Resumo

Os edifícios hospitalares são frequentemente considerados os edifícios públicos com maior ineficiência energética na maioria dos países desenvolvidos. Por possuírem o maior consumo de energia por unidade de área, tornam-se excelentes alvos para redução de custos e para incorporação de estratégias de eficiência energética. Este trabalho apresenta uma metodologia baseada em uma abordagem multicritério destinada a avaliar estratégias de reciclagem de edifícios com base em propostas tecnológicas que consideram as qualidades técnicas e econômicas no âmbito (das diretrizes) do projeto passivo. Esta abordagem exige um diagnóstico prévio da situação tecnológico-construtiva básica do edifício construído, e a identificação de variáveis de projeto com maior impacto na poupança energética e na melhoria da habitabilidade tanto em todo o estabelecimento como nas suas áreas específicas. Uma vez avaliados os aspectos técnicos e econômicos ligados à eficiência energética da envolvente, comparam-se as diferentes propostas tecnológico-construtivas para a sua melhoria utilizando o conceito de dominância de Pareto. Se como resultado for obtida mais de uma proposta de melhoria ótima, é possível incorporar a opinião de diferentes atores para finalmente decidir qual é a mais conveniente. A metodologia apresentada é então aplicada para apoiar a tomada de decisões para melhorar a eficiência energética da envolvente de um edifício no sector da saúde, mas também pode ser aplicada a edifícios de outros sectores (por exemplo, residenciais, comerciais, etc.). Os resultados obtidos mostram que a reciclagem sistematizada de edifícios existentes, baseada

em propostas tecnológicas, apoiada numa metodologia de seleção multicritério que permite avaliar as suas qualidades técnicas e económicas, representa uma alternativa viável para intervir na envolvente dos edifícios e nos seus sistemas construtivos.

Palavras-chave: envolvente do edifício, eficiência energética, poupança de energia, energias renováveis, avaliação multicritério, utilização racional da energia, comparação, análise, consumo de energia, substituição de fontes.

Introducción

El 60 % de las emisiones mundiales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) están relacionadas con la energía (Autores 2023). Según Kolokotsa et al. (2012), los edificios hospitalarios suelen estar entre los edificios públicos menos eficientes energéticamente en la mayoría de los países desarrollados. Buonomano et al., (2014) señalan que, al presentar el mayor consumo de energía por unidad de superficie, los hospitales se convierten en excelentes objetivos para el ahorro de costos y la incorporación de estrategias de eficiencia energética.

La demanda de energía de la edificación existente, se puede reducir actuando sobre la eficiencia energética de su envolvente, revalorizando e incorporando atributos termo-físicos de su materialidad (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación [MinCyT]. 2022). Para ello es necesario reconocer y recuperar, a partir de pautas de reciclado edilicio y eficiencia energética (EE), la materialidad como una masa de acumulación térmica, que puede aprovecharse para sostener los niveles térmicos de habitabilidad esenciales.

En Argentina, el porcentaje de participación de las energías renovables en la matriz energética es pequeño comparado con el de centrales térmicas, que es del 58,9% (Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima [CAMMESA], 2022). Por lo tanto, la reducción del consumo energético resulta fundamental si se quieren cumplir metas relacionadas con la disminución de emisiones de GEI, a las que el país ha adherido. Ante esta situación es necesario actuar sobre la demanda de energía, principalmente a través de políticas que incidan sobre el uso final de la energía en el sector construido a través de estrategias, metodologías y herramientas que permitan evaluar, dimensionar y actuar sobre la edificación existente, mejorando la eficiencia energética de su envolvente.

Desde el punto de vista del consumo final de energía en el año 2020 se observa que aproximadamente el 34,67% de

la matriz energética nacional corresponde a los Sectores Residencial y Comercial-Público (Ministerio de Economía 2024). Dentro de este último Sector se incluye el subsector Salud. Los edificios de este subsector se caracterizan por ser energo-intensivos debido a su infraestructura de uso continuo y equipamiento (Autores 2021). Este trabajo propone analizar, utilizando un enfoque multicriterio, diferentes alternativas tecnológicas constructivas para el mejoramiento de la eficiencia energética de la envolvente edilicia del subsector salud, que contribuyan a lograr ahorros en términos de consumo de energía, al mismo tiempo que se mantienen (y eventualmente mejoran) las condiciones de habitabilidad, el confort higrotérmico, la calidad de vida y los aspectos ambientales.

Antecedentes

En los trabajos de Álvarez et al. (2018), Donnarumma et al. (2017) y Ongpeng et al. (2021), se emplean más de un

par de variables/criterios elegidos para la comparación de alternativas, a diferencia del presente trabajo que utiliza dos criterios (transmitancia térmica y costo de inversión). Además, los trabajos mencionados incorporan procesos analítico-jerárquicos (AHP), los cuales no han sido utilizados en este caso.

Asimismo, Azar (2001) propone el uso de un algoritmo genético para optimizar la envolvente del edificio en función del costo y el rendimiento energético durante la etapa de prediseño. Previo a utilizar el algoritmo genético, cada actor que participa o influye de alguna manera en el diseño de la envolvente (ej.: el propietario) debe expresar sus preferencias para poder asignar pesos a los diferentes criterios. Se evalúa el desempeño energético y de costos de todos los escenarios definidos por los actores (un actor puede definir más de un escenario). El software puede realizar un análisis de sensibilidad para observar el resultado de las dos variables de interés cambiando el valor de los parámetros (que expresan preferencias). A diferencia de este trabajo, en Moschetti et al. (2022) no se considera

la opinión (preferencias) de expertos u otros actores. En su lugar, se utilizan tres índices: demanda anual de energía, porcentaje de horas de confort térmico y factor de carga. Las diferentes alternativas se evalúan mediante el método minimax. Por último, en Romani et al. (2022) se analizan diferentes alternativas de reciclaje de edificaciones en el sector residencial considerando dieciséis criterios organizados en tres grupos: i. necesidades de energía para calefacción, ii. económico, y iii. ambiental.

A diferencia de los trabajos anteriores, la metodología aquí propuesta se aplicará a un caso de estudio que considerará dos criterios, tres alternativas y no utilizará ningún método para determinar el valor de los pesos asociados a cada criterio (ej.: AHP, panel de expertos) sino que se estudiará, de forma exhaustiva, cuál es la alternativa más conveniente para cada posible valor con que se pondere a cada criterio.

Este trabajo presenta una metodología basada en un enfoque multicriterio orientada a evaluar estrategias de reciclado edilicio considerando su comportamiento

higrotérmico y el costo de inversión. El enfoque multicriterio es particularmente apropiado para abordar problemas como el tratado en este trabajo pues permite analizar un conjunto de alternativas (sin importar el número de ellas) donde cada una de ellas es descripta por una serie de criterios (aquí tampoco existen restricciones en cuanto al número) utilizando para la comparación el concepto de dominancia de Pareto.

Metodología

La metodología de evaluación multicriterio es particularmente útil en problemas vinculados con el desarrollo sustentable (Hersh 2006). Esto se debe, en gran medida, a su capacidad para describir un objeto de estudio como un vector compuesto por diferentes criterios que suelen estar en conflicto entre sí. En particular, en la arquitectura generalmente ocurre que las “mejores alternativas” suelen ser las menos económicas. Ante este tipo de problemas, donde se desea tener en consideración todos los criterios a la vez para optar por una de entre varias alternativas, la utilización de la metodología de evaluación multicriterio es particularmente apropiada (Coello Coello 2003).

La metodología de evaluación multicriterio consta de las siguientes etapas:

Etapas 1: Se definen los criterios relevantes acerca de los objetos o alternativas que interesa comparar.

Etapas 2: Para cada una de las alternativas a evaluar, se deben conocer los valores correspondientes de cada criterio y se procede a escribirlos en forma matricial.

Etapas 3: Se comparan todos los posibles pares de alternativas y se eliminan aquellas que resulten ser alternativas (o soluciones) dominadas. A tal efecto se utiliza el criterio de dominancia de Pareto, el cual señala que una

alternativa A domina a otra B, si existe al menos un criterio en que la alternativa A supera (en forma estricta) a B, y en el resto de los criterios, los valores de cada criterio de la alternativa A no “pierden” con los correspondientes de B.

Si existen N alternativas posibles, entonces la función que señala el número de pares de alternativas que se deben comparar entre sí viene dada por $f(N) = (N \times (N-1)) / 2$. Esto se debe a que cada una de las N alternativas se compara con las restantes N-1. La división por 2 se debe a que comparar una alternativa a con otra b es lo mismo que comparar a la b con la a de modo que se debe contar este hecho una sola vez.

Etapas 4: Se normaliza cada criterio y se reescribe la matriz anterior con valores normalizados. En este punto sólo quedan las alternativas no dominadas. Estas alternativas son todas igualmente buenas en el sentido de que no se puede decir que haya una mejor que otra. Es decir, para una alternativa dada, no existirá otra que la domine en el sentido de Pareto.

Así, pues, en esta etapa se analiza cada criterio para ver si valores más altos reflejan una situación más favorable o si son los valores más bajos los que reflejan una situación mejor, para luego normalizarlos. Esto da lugar a la aplicación de dos fórmulas diferentes, según sea el caso (Pasquale et al. 2017):

Caso 1: en caso de que valores menores reflejen una mejor situación se procede a normalizar tal criterio siguiendo la fórmula:

$$f(x) = (MAXIMO - x) / (MAXIMO - MINIMO)$$

Caso 2: en caso de que valores mayores reflejen una mejor situación se procede a normalizar el criterio siguiendo la fórmula:

$$f(x) = (x - MINIMO) / (MAXIMO - MINIMO)$$

En cualquiera de los dos casos, los valores máximo y mínimo pueden obtenerse de la columna del criterio

correspondiente. No obstante, se sugiere que en lugar de ello se adopten los valores máximos y mínimos teóricos aún si estos no aparecen en la columna del criterio (Autores 2023 op. cit). Por lo tanto, antes de adoptar la metodología se debe decidir cuál de las 2 formas es la que más se aproxima a la realidad.

Etapas 5: Se consulta a los usuarios y/o destinatarios y/o expertos acerca de la importancia que se debe asignar a cada uno de los criterios y se construye la función de preferencia.

En el caso de que las personas consultadas no tengan preferencias se puede dar como resultado las alternativas que llegaron a la etapa 4 o, si se conoce la importancia de cada criterio, se puede continuar con la etapa 5 y las siguientes. En caso de continuar con la etapa 5 y las siguientes, se debe proceder a crear una función que permita evaluar la aptitud de cada alternativa. Suponiendo que cada alternativa (representada por un vector X_1, X_2, \dots, X_N) consta de N criterios, y que el peso de cada criterio es c_i

($i=1..N$), entonces la función F que asigna un valor a cada alternativa es una construcción lineal ponderada cuya fórmula es:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N c_i \cdot X_i$$

Los valores c_i se pueden obtener a partir de métodos como: consulta a expertos, el método Delphi o el uso de AHP (proceso de análisis jerárquico). En la fórmula anterior, la suma de los c_i debe ser igual a 1. Así, si se tienen N criterios, y se desea asignar el mismo peso a cada uno, los valores de c_i deberían ser todos igual a $1/N$.

Etapa 6: Se aplica a cada vector de la matriz (cada alternativa) con valores normalizados, la función de preferencia para obtener una puntuación.

Etapa 7: Se construye un ranking ordenando las alternativas de mayor a menor según el puntaje obtenido al aplicarles la función de preferencia. Aquella alternativa con mayor valor será la mejor (óptima). La alternativa óptima podría no ser única si más de una alcanzan el mismo valor.

Si bien esta metodología puede ser utilizada en diversos sectores edilicios, es importante señalar que la misma puede abordar los aspectos de eficiencia energética así como los de sustitución de fuentes tradicionales por renovables. En este sentido, los criterios a tener en cuenta en cada caso son:

i. En el caso de aplicarse la metodología *para evaluar alternativas de eficiencia energética* se deben elegir los criterios de comparación. En el inciso siguiente, se expone un ejemplo de la aplicación de la metodología para evaluar la eficiencia energética (EE) de la envolvente edilicia vertical opaca, donde

los criterios que se tuvieron en cuenta fueron: la transmitancia térmica (K) y el costo de inversión (CI).

ii. En el caso de aplicarse la metodología *para evaluar alternativas de energías renovables* (ER) el beneficio debería medirse, por ejemplo, en términos de emisiones de CO_2 evitadas. El costo de inversión, no obstante, puede ser utilizado en cualquier caso (EE y ER).

Expuestas las particularidades para cada abordaje (EE y/o ER), se plantea aplicar dicha metodología en un ejemplo para evaluar las propuestas tecnológico-constructivas de mejoramiento de la eficiencia energética de la envolvente vertical opaca en un edificio de salud. Por lo tanto, se trata de una investigación que desarrolla un análisis comparativo de alternativas para un caso de estudio.

Resultados

A modo de ejemplo, se desarrolla el caso de aplicación de la metodología para la evaluación de la eficiencia energética (EE) de la envolvente vertical opaca de un edificio de salud.

La metodología se aplicará al caso del Área de Internación del Hospital Zonal General de Agudos “Dr. Ricardo Gutiérrez”, el cual posee las siguientes características tecnológico-constructivas (figura 1). En el mismo gráfico se pueden observar también las propuestas de reciclado.

La metodología desarrollada para evaluar estrategias de reciclado edilicio puede contemplar todas las partes de la envolvente simultáneamente (muros, aberturas y cubierta), o bien, evaluar cada parte por separado. En el ejemplo siguiente se evalúa una de las partes de la envolvente edilicia: los muros.

CASO: SUPERFICIE VERTICAL OPACA - MUROS

Aplicando la metodología expuesta anteriormente se obtienen, en cada etapa, los siguientes resultados:

Etapa 1: En esta etapa se especifican los criterios a tener en cuenta que serán 2: la transmitancia térmica (K) y el costo de inversión (CI) de los diferentes muros.

Etapa 2: Una vez definidos los 2 criterios, se procede a relevar sus valores para cada una de las 3 alternativas posibles (caso base, alternativa 1 y alternativa 2). Los valores de transmitancia térmica (K) en W/m^2C y de Costo de Inversión (CI) en \$ son los que se observan en la figura 1.

Caso base (alternativa constructiva 0): $K=2,03$. $CI=0$.

Caso reciclado 1 (alternativa constructiva 1): $K=0,61$. $CI=957,92$.

Caso reciclado 2 (alternativa constructiva 2): $K=0,5$, $CI=2465,04$.

Luego de calculados los valores de cada criterio para cada una de las alternativas, se procede a escribir esta información en forma matricial.

Etapa 3: Dado que hay $N=3$ alternativas diferentes se deben comparar $N \times (N-1) / 2 = 3$ pares de alternativas y ver si hay alguna dominada, en cuyo caso debe eliminarse.

Par 1: Se compara la alternativa 0 con la 1 y resulta que ambas constituyen soluciones no dominadas.

Par 2: Luego se compara la alternativa 0 con la 2 y resulta que ambas son no dominadas entre sí.

Par 3: Por último, se compara la alternativa 1 con la 2 y resulta que ambas son no dominadas.

A partir de las comparaciones anteriores se determina que no es posible eliminar ninguna alternativa pues, para cada par analizado, no se da el caso en que haya dominancia de Pareto de una alternativa respecto de la otra.

Etapa 4: Se procede a normalizar cada uno de los criterios y reescribir la matriz con las alternativas que quedan (soluciones no dominadas), ahora, con valores normalizados. Para ello se utiliza, para cada criterio, la función:

$$f(x) = (MAXIMO - X) / (MAXIMO - MINIMO)$$

Esta función asigna valores (en el intervalo $[0,1]$) más altos a los valores más pequeños, asignándole el valor 1 (el óptimo) al valor mínimo y 0 al valor máximo del criterio que se esté considerando. Esto se debe a que cuando se pretende ahorrar energía lo que se busca son valores bajos del coeficiente K de transmitancia pues



		Características tecnológico-constructivas de la envolvente edilicia					
		MUROS		TECHOS		CARPINTERÍAS	
		Superficie (m ²)	81.03	Superficie (m ²)	176.40	Superficie (m ²)	40.60
SITUACIÓN DE BASE		Ladrillo macizo (0,30 m)		Tejas curvas, con ático sin aislamiento térmico		Chapa doblada, tipo banderola con vidrios simples	
		K (W/m ² °C)	2.03	K (W/m ² °C)	2.23	K (W/m ² °C)	5.03
		Nivel N. IRAM 11605	No clasifica	Nivel N. IRAM 11605	No clasifica	Nivel N. IRAM 11507-4	No clasifica
ESTRATEGIA DE RECICLADO 1		Incorporación del sistema EIFS con EPS (40mm)		Incorporación de aislación térmica exterior (EPS 100mm)		Incorporación de cortina de enrollar de aluminio con poliuretano	
		K (W/m ² °C)	0.61	K (W/m ² °C)	0.48	K (W/m ² °C)	1.08
		Nivel N. IRAM 11605	B (medio)	Nivel N. IRAM 11605	B (medio)	Nivel N. IRAM 11507-4	Clasifica
		Costo de inversión	\$ 957.92	Costo de inversión	\$ 3,014.71	Costo de inversión	\$ 5,258.58
IE	0.00015	Índice de Eficiencia -IE (W/m ² °C\$)	0.0015	Índice de Eficiencia -IE (W/m ² °C\$)	0.0006	Índice de Eficiencia -IE (W/m ² °C\$)	0.0008
ESTRATEGIA DE RECICLADO 2		Incorporación de aislación térmica interior (lana de vidrio 50mm)		Incorporación de aislamiento térmico en cielorraso (lana de vidrio 80mm)		Sustitución de vidrio simple por doble vidriado hermético	
		K (W/m ² °C)	0.5	K (W/m ² °C)	0.41	K (W/m ² °C)	2.94
		Nivel N. IRAM 11605	B (medio)	Nivel N. IRAM 11605	B (medio)	Nivel N. IRAM 11507-4	Clasifica
		Costo de inversión	\$ 2,465.04	Costo de inversión	\$ 1,463.79	Costo de inversión	\$ 3,790.91
IE	0.00029	Índice de Eficiencia -IE (W/m ² °C\$)	0.0006	Índice de Eficiencia -IE (W/m ² °C\$)	0.0012	Índice de Eficiencia -IE (W/m ² °C\$)	0.0005

Figura 1. Ficha que contiene los datos necesarios para aplicar la evaluación multicriterio para la elección de diferentes alternativas tecnológico-constructivas para el reciclado de la envolvente edilicia. Fuente: Elaboración propia. Ecuador. Source: Authors' photo.

	K (W/m ² °C)	Costo de inversión inicial (\$)
Alternativa 0	2,03	0
Alternativa 1	0,61	957,92
Alternativa 2	0,5	2465,04

Figura 2. Matriz con los valores de cada criterio para cada alternativa. Fuente: Elaboración propia. Ecuador. Source: Authors' photo.

la transmitancia térmica (K) indica el flujo de calor a través de la unidad de superficie de un elemento constructivo sujeto a una diferencia de temperatura del aire a ambos lados del elemento de 1 °C y se calcula de acuerdo con el método y las características térmicas de materiales y capas constructivas indicadas en la Norma IRAM 11601. En función de lo expuesto anteriormente, cuánto más bajo sean los valores de la transmitancia térmica (K) del elemento constructivo, menor será el flujo de calor a través de su superficie. Asimismo, con respecto al precio y considerado este aspecto desde el punto de vista de quien tiene que afrontar los gastos, lo deseable es hacerlo al menor costo posible.

Como en este ejemplo se consideraron los valores máximos y mínimos de las alternativas a evaluar, al valor 0,5 de K le corresponderá el 1, al igual que al 0 del CI.

En el caso del criterio K la función tiene la siguiente ecuación $f(x)=(2,03-x)/(2,03-0,5)$.

De forma similar, para el caso del criterio CI, la función resulta ser $f(x)=(2465,04-x)/(2465,04-0)$.

Por consiguiente, la matriz con valores normalizados resulta ser la siguiente:

Etapa 5: Se consulta al usuario y/o a expertos acerca de la importancia relativa de cada uno de los criterios y se construye la función de preferencia. Sea α el peso del criterio "K" y β el peso del criterio "Costo de inversión" (CI). De esta manera resulta que:

$$\alpha + \beta = 1, \text{ luego } \beta = 1 - \alpha$$

En consecuencia, la función de preferencia tendrá la siguiente forma:

$$f(K, CI) = \alpha \cdot K + \beta \cdot CI$$

Etapa 6: En esta etapa se aplica a cada vector de la matriz con valores normalizados, la función de preferencia para obtener una puntuación. En este punto, se continúa el ejercicio suponiendo que ambos criterios tienen igual importancia (0,5).

Caso $\alpha = \beta = 0,5$

$$\begin{aligned} \text{alternativa 0} &= f(0,1) &= 0,5 \cdot 0 + 0,5 \cdot 1 &= 0,5 \\ \text{alternativa 1} &= f(0,928,0,611) &= 0,5 \cdot 0,928 + 0,5 \cdot 0,611 &= 0,76 \\ \text{alternativa 2} &= f(1,0) &= 0,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 0 &= 0,5 \end{aligned}$$

Etapa 7: Vistos los resultados de la etapa anterior, se observa que la alternativa 1 tiene el mayor puntaje y, por lo tanto, es la mejor.

Aquí finaliza la aplicación de la metodología suponiendo que ambos criterios tienen igual importancia.

A continuación, se presenta un análisis más detallado donde se analizan las mejores alternativas para los diferentes valores posibles de α (y consecuentemente $\beta = 1 - \alpha$). Es decir, se procederá a analizar lo que ocurriría para distintos valores de α y β pues $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ y además $\alpha + \beta = 1$.

Sean:

KAlt0=0	(K normalizado de la alternativa 0 - caso base-)
CIAlt0=1	(Costo de inversión normalizado de la alternativa 0)
KAlt1=0,928	(K normalizado de la alternativa 1)
CIAlt1=0,611	(Costo de inversión normalizado de la alternativa 1)
KAlt2=1	(K normalizado de la alternativa 2)
CIAlt2=0	(Costo de inversión normalizado de la alternativa 2)

Una vez analizadas las mejores alternativas para los diferentes valores, el siguiente paso consiste en buscar, para cada par posible de alternativas, valores de α en que el par de alternativas alcancen el mismo valor en la función de preferencia.

Caso 1: Alternativa 0 = Alternativa 1

$$\alpha \cdot KAlt0 + (1 - \alpha) \cdot CIAlt0 = \alpha \cdot KAlt1 + (1 - \alpha) \cdot CIAlt1$$

$$\alpha \cdot 0 + (1 - \alpha) \cdot 1 = \alpha \cdot 0,928 + (1 - \alpha) \cdot 0,611$$

Despejando α de la igualdad, se obtiene que $\alpha = 0,295$. Por lo tanto:

Para $\alpha < 0,295$ la alternativa 0 (caso base) es mejor que la alternativa 1.

Para $\alpha > 0,295$ la alternativa 1 es mejor que la alternativa 0.

Para $\alpha = 0,295$ las alternativas 0 y 1 son igualmente buenas.

Caso 2: Alternativa 0 = Alternativa 2

$$\alpha \cdot KAlt0 + (1 - \alpha) \cdot CIAlt0 = \alpha \cdot KAlt2 + (1 - \alpha) \cdot CIAlt2$$

$$\alpha \cdot 0 + (1 - \alpha) \cdot 1 = \alpha \cdot 1 + (1 - \alpha) \cdot 0$$

Despejando α de la igualdad, se obtiene que $\alpha = 0,5$. Por lo tanto:

Para $\alpha < 0,5$ la alternativa 0 es mejor que la alternativa 2.

Para $\alpha = 0,5$ la alternativa 0 (situación base) es igual a la alternativa 2.

Para $\alpha > 0,5$ la alternativa 2 es mejor que la alternativa 0 (situación base).

Caso 3: Alternativa 1 = Alternativa 2

$$\alpha \cdot KAlt1 + (1 - \alpha) \cdot CIAlt1 = \alpha \cdot KAlt2 + (1 - \alpha) \cdot CIAlt2$$

$$\alpha \cdot 0,928 + (1 - \alpha) \cdot 0,611 = \alpha \cdot 1 + (1 - \alpha) \cdot 0$$

Despejando α de la igualdad, se obtiene que $\alpha = 0,895$. Por lo tanto:

Para $\alpha < 0,895$ la alternativa 1 es mejor que la alternativa 2.

Para $\alpha = 0,895$ las alternativas 1 y 2 son igualmente buenas.

Para $\alpha > 0,895$ la alternativa 2 es mejor que la alternativa 1.

A partir de los resultados anteriores es posible determinar la mejor alternativa para cualquier valor de α en el intervalo [0,1] (Figura 4).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Para $0 < \alpha < 0,295$ la mejor alternativa es la 0.

Para $\alpha = 0,295$ la alternativa 0 y la 1 son (ambas) soluciones óptimas.

Para $0,295 < \alpha < 0,895$ la mejor alternativa es la 1.

Para $\alpha = 0,895$ la alternativa 1 y la 2 son (ambas) soluciones óptimas.

Para $\alpha > 0,895$ la mejor alternativa es la alternativa 2.

Para $0,295 < \alpha < 0,895$ la mejor alternativa es la 1. Obsérvese que esto confirma que esta alternativa es la mejor cuando α vale 0,5 como se demostró al aplicar la metodología asumiendo que los criterios tenían igual peso.

Así, como puede observarse en la figura 4, es posible determinar la mejor solución tecnológica-constructiva cualquiera sea el peso asignado a cada criterio.

Conclusiones

La metodología desarrollada permitió determinar la mejor alternativa tecnológica-constructiva para la mejora de la eficiencia energética (de la envolvente edilicia en este caso) cualquiera sea el peso o importancia relativa de los criterios considerados. Asimismo, es posible utilizar diferentes métodos (AHP, Delphi, etc.) para determinar los pesos de cada criterio. En el caso de que se deseen evaluar diferentes estrategias de energías renovables,

debe reemplazarse el criterio relacionado a la eficiencia energética por, por ejemplo, emisiones de CO_2 equivalentes evitadas o costo de energía primaria, pues reemplazar energía fósil por renovable no implica un ahorro de energía sino una reducción de emisiones y mayor beneficio en términos ambientales. Así, debería calcularse el aporte suministrado por las energías renovables y calcularse las emisiones evitadas (en comparación con fuentes de energía de origen fósil) correspondientes. Esto supondría, además, un ahorro de presupuesto por sustitución del tipo de energía, ya que el servicio de gas o electricidad por red (fuentes tradicionales) y sus respectivos costos se reemplazarían por el correspondiente de las energías renovables.

La metodología planteada permitió decidir y fundamentar la adopción de alternativas tecnológicas/constructivas para la mejora de la eficiencia energética (de la envolvente edilicia en este caso). La misma puede ser aplicada en sectores diferentes al de salud como lo son el residencial, educación, comercial, o industrial, entre otros.

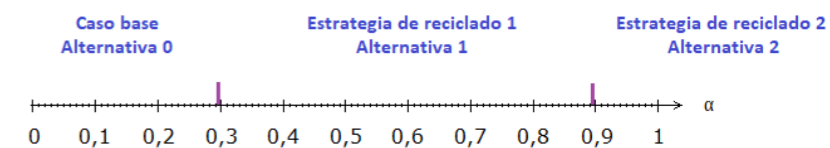


Figura 4. Matriz con valores normalizados. Fuente: Elaboración propia.

Así, la metodología expuesta sirve de apoyo a la toma de decisiones en la elección de alternativas que intenten mejorar la eficiencia energética edilicia y/o incorporar energías renovables. Dichas mejoras contribuirán a que se mejore el nivel de habitabilidad y a que se reduzcan los impactos ambientales en términos de emisiones de CO_2 , entre otros beneficios. La mejora en el nivel de habitabilidad se debe a que las propuestas de mejoramiento de la eficiencia energética de la envolvente edilicia, al asegurar la inexistencia de condensación superficial e intersticial, por ejemplo, suponen una consecuente mejora en las condiciones de confort higrotérmico en el interior. Por otro lado, la reducción en términos de emisiones de CO_2 se debe a que en la Argentina, aproximadamente el 58,9% de la energía se produce a partir de fuentes no renovables (centrales térmicas). Estas queman combustibles (ej.: gas, fuel oil) para producir energía. En el proceso de combustión se producen emisiones (entre ellas las de CO_2). Por lo tanto, a menor demanda de energía, mayor ahorro en términos de emisiones.

Asimismo, en la metodología presentada es posible incorporar la opinión de usuarios y expertos en la toma de decisiones (en la función de preferencia) generando, de esta forma, alternativas que adoptan un enfoque participativo.

En síntesis, la evaluación multicriterio y el desarrollo de modelos instrumentales constituyen herramientas metodológicas útiles en los procesos de evaluación y planificación energética.

Aprobación final del artículo:

Ma. Arq. Andrea Castro Marcucci, editora en jefe aprobó la publicación de este artículo

Contribución de autoría:

Dante Andrés Barbero es responsable de la conceptualización, investigación, metodología, supervisión, elaboración, revisión y edición del manuscrito y es editor de medios para la visualización.

Emilia Urteneche es responsable de la curaduría de la información, análisis formal de la obra o proyecto, investigación, preparación, revisión y edición del manuscrito y es editora de medios para la visualización.

Irene Martini es responsable de la conceptualización, planificación, proyecto de investigación, investigación, adquisición de fondos, supervisión, revisión y edición del manuscrito.

Disponibilidad de los datos:

El conjunto de datos que apoya los resultados de este estudio no se encuentra disponibles para su uso público. Los datos de la investigación estarán disponibles para los revisores, si así lo requieren.

Referencias

Álvarez, A. A. Ripoll Meyer, V. (2018). Matriz de referencia para la optimización del ciclo de vida de los materiales constructivos de la vivienda social en zonas árido-sísmicas. *Revista Hábitat Sustentable Vol. 8. N° 2.* ISSN 0719–0700. Págs. 52-63. <https://orcid.org/0000-0003-0069-8173>.

Azar, S. Hauglustaine, J. M. (2001). Multicriteria and Multiple Actors Tool Aiding to Optimise Building Envelope at the Architectural Sketch Design. *Informatica. Vol. 12, No. 1, 3–24.*

Ministerio de Economía. (2024). *Balances energéticos nacionales. Balance Energético Nacional de la República Argentina, año 2022.* Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/econom%C3%ADa/energ%C3%ADa/planeamiento-energetico/balances-energeticos> . Accedido: 29-3-2024.

Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S. A. (CAMMESA). (2022). *Mercado eléctrico mayorista. Informe anual 2022.* Disponible en: <https://cammesaweb.cammesa.com/?wpdmdl=45057> . Accedido: 22-3-2024.

Coello Coello, C. A. (2003). Curso: Introducción a la optimización multiobjetivo usando metaheurísticas. *CACIC 2003. IX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación.* La Plata, Argentina.

Donnarumma, G. Fiore, P. (2017). A Multi-Criteria Model for the Comparison of Building Envelope Energy Retrofits. *Modern Environmental Science and Engineering. Volume 3, No. 8, pp. 511-518.* <https://doi.org/10.1063/1.4976243> . Academic Star Publishing Company.

Hersh, M. (2006). *Mathematical modelling for sustainable development.* Springer.

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2022). *Argentina innovadora 2030. Plan Argentina innovadora 2020.* Energía. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/argentina-innovadora-2030/plan-argentina-innovadora-2020/energia> . Accedido: 11-3-2022.

Moschetti, R.; Homaei, S.; Taveres-Cachat, E.; Grynning, S. (2022). Assessing Responsive Building Envelope Design through Robustness-Based Multi-Criteria Decision Making in Zero-Emission Buildings. *Energies 15, 1314.* <https://doi.org/10.3390/en15041314> .

Ongpeng, J. M. C., Rabe, B. I. B., Razon, L. F., Aviso, K. B., & Tan, R. R. (2022). A multi-criterion decision analysis framework for sustainable energy retrofit in buildings. *Energy, 239.* <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122315>

P Chévez, D Barbero, I Martini, C Discoli. (2017). Application of the k-means clustering method for the detection and analysis of areas of homogeneous residential electricity consumption at the Great La Plata region, Buenos Aires, Argentina. *Sustainable Cities and Society* (32): 115-129. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.019>

Romani, Z. Abdeslam, D. Allard, F. (2022). Metamodelización y análisis multicriterio para la rehabilitación sostenible y pasiva de edificios residenciales: Un caso de estudios del parque de vivienda francés. *Building simulation* 15(3): 453-472.

Secretaría de Energía de la República Argentina. (2020). *Balances energéticos*. Disponible en: <http://datos.minem.gob.ar/dataset/balances-energeticos> . Accedido: 11-3-2022.

Urteneche, E., Fondoso-Ossola, S. T., Barbero, D., & Martini, I. (2021, November). Development of a Tool for the Identification and energy Analysis of buildings' envelopes of different Hospital Areas. In 2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC) (pp. 1-5). IEEE.

Urteneche, E., Barbero, D. A., & Martini, I. (2023). Utilización de reglas de asociación para determinar soluciones tecnológico-constructivas para el mejoramiento de la eficiencia energética en edificios de salud. *Anales de Investigación en Arquitectura*, 13(2). <https://doi.org/10.18861/ania.2023.13.2.3484>

Kolokotsa, D. Tsoutsos, T. Papantoniou, S. (2012). Energy conservation techniques for hospital buildings. *Advances in Building Energy Research*, 6(1), 159-172. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/17512549.2012.672007>

Buonomano, A., Calise, F., Ferruzzi, G., & Palombo, A. (2014). Dynamic energy performance analysis: Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings. *Energy*, 78, 555-572. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.10.042>

Pasquale, E. A. Balsa, J. (2017). La técnica de escalamiento lineal por intervalos: una propuesta de estandarización aplicada a medición de niveles de bienestar social. *Revista de métodos cuantitativos para la economía y la empresa* (23). pp. 164-193.