

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DEL VALOR MIVES A LA ESTRUCTURA DE UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR DE AUTOPROMOCIÓN CON CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD

Application of the MIVES value analysis to the structure of a self-promotion single-family home with sustainability criteria

Antonio J. Sánchez-Garrido^a, Victor Yepes^b

^aMSc. Arquitecto. Dpto. Ingeniería de la Construcción. Universitat Politècnica de València.

^{*}Autor para correspondencia. Correo electrónico: asanchez@coamalaga.es

^bDr. Ingeniero de Caminos. Catedrático de Universidad. ICITECH. Universitat Politècnica de València.

RESUMEN

En este trabajo se estudia el óptimo diseño de la estructura y cerramiento entre tres alternativas dispares aplicadas a una vivienda unifamiliar adosada, para la toma de decisión de un autopromotor, apoyándose en métodos multicriterio y teniendo en cuenta parámetros de sostenibilidad. Se obtiene así la validación del método para una alternativa "convencional", "prefabricada" y "tecnológica", consiguiendo esta última la mejor valoración. Esta información permitiría a cualquier gestor conocer desde el inicio del proyecto los aspectos fundamentales que marcarán el equilibrio medioambiental, económico y social del futuro edificio a lo largo de su ciclo de vida para hacerlo, en definitiva, más sostenible.

ABSTRACT

This paper studies the optimal design of the structure and envelope between three disparate alternatives applied to a detached single-family house, for the decision making of a self-promotion, supported by multicriteria methods and taking into account parameters of sustainability. In this way, the validation of the method for a "conventional", "pre-cast" and "technological" alternative is obtained, the latter achieving the best valuation. This information would allow any manager to know from the beginning of the project the fundamental aspects that will mark the environmental, economic and social balance of the future building throughout its life cycle to make it, in short, more sustainable.

PALABRAS CLAVE: toma de decisiones multicriterio, MIVES, vivienda unifamiliar, sostenibilidad, ciclo de vida

KEYWORDS: multi-criteria decision-making, MIVES, single-family housing, sustainability, life cycle

1. Introducción

Durante las fases de diseño en proyectos de edificación y obra civil, los parámetros técnicos relacionados con el comportamiento de las estructuras y caracterización de materiales para evaluar la optimización están en su mayoría condicionados por restricciones presupuestarias, dejando olvidados otros aspectos importantes o relegándolos a una participación testimonial.

Parecería razonable que entre la diversidad de tipologías constructivas, la incertidumbre en su elección no estuviera supeditada solo a factores económicos sino que se estudiaran también desde otras perspectivas para obtener una construcción más racional, duradera y eficiente que responda a las necesidades de una sociedad que cada vez demanda más implementar en sus vidas una filosofía sostenible [1].

Las ciudades actuales apuntan un cambio de paradigma social [2] en la modernización y diversificación de los próximos modelos urbanos, traducido en la búsqueda de nuevas soluciones constructivas con materiales que respondan a través de la tecnología a los futuros retos que plantea la arquitectura. La ciencia y la tecnología trabajan constantemente en ello para lograr una mayor eficiencia en la construcción mediante el ahorro de costes y consumos así como el menor impacto medioambiental posible [3]. Se busca aprovechar de manera eficiente y efectiva la productividad de todos los recursos que haya al alcance mejorando aspectos como calidad, satisfacción del cliente, eficiencia del negocio, evaluación del desempeño ambiental, el índice de sostenibilidad [4] y el control en los plazos de entrega. Muchos procedimientos innovadores con técnicas de análisis inteligente y materiales no convencionales [5, 6] ya están siendo estudiados, aunque aún no generan demasiada confianza entre muchos arquitectos e ingenieros que siguen apostando por prescribir soluciones tradicionales. Normalmente detrás de estas mejoras va asociado un interés de obtener máximo beneficio al negocio inmobiliario, pero rara vez se tienen en cuenta para la toma de decisión de un particular, sin mayor pretensión que la de construirse su propio hogar. Hay países como España, de cultura muy arraigada en la "propiedad", en los que se prefiere la compra o la autoconstrucción de viviendas sobre la opción del alquiler. Esta elección tiene consecuencias a largo plazo sobre la economía del hogar influyendo en cierto grado en la estabilidad macroeconómica si consideramos globalmente el efecto acumulativo de decisiones individuales de la población. Teniendo en cuenta que para la familia media puede ser la inversión más importante de su vida, la toma de decisión correcta resulta imprescindible.

Diferentes métodos de toma de decisiones multicriterio [7] ya se usaron con evaluaciones de sostenibilidad en infraestructuras, urbanismo y energía: desde líneas de metro, pavimentos de carreteras, infraestructuras hidráulicas, redes de saneamiento, planificación en viviendas de emergencia tras catástrofes y aerogeneradores.

En edificación se han evaluado edificios del sector industrial [8] o educativo, algunos elementos constructivos e incluso el anejo 13 de la EHE. Sin embargo, los ejemplos que han implementado esta metodología en la construcción residencial son marginales y en las viviendas unifamiliares brillan por su ausencia.

El presente estudio propone una metodología específica basada en el análisis de valor para decidir el diseño óptimo de la estructura y el cerramiento (como capítulos de obra con mayor peso) en el caso particular de una construcción residencial individual, desde un punto de vista sostenible. Se muestran ventajas y limitaciones del método a través de la evaluación de un caso concreto utilizado como herramienta de evaluación para la figura de un autopromotor, tan cotidiana pero minoritaria en el sector de la construcción que se ha pasado por alto la influencia potencial que esta decisión puede tener socialmente en un modelo global de autoconstrucción sostenible, más allá de la rentabilidad económica de una promoción. Una versión ampliada de la investigación se puede encontrar en [9].

2. Metodología

En este proyecto se emplea la metodología MIVES (Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles) desarrollada y aplicada por varios grupos de investigación desde la década del 2000 [10-11]. Se basa en la toma de decisiones multicriterio (MDCM) evaluando distintas alternativas para resolver un problema determinado a través de un índice de utilidad o valor. El método, clasificado dentro de la teoría de la utilidad multiatributo (Keeney et al., 1979), dota de soporte a la decisión a través de un entorno riguroso definido por ecuaciones que definen las diferentes funciones de satisfacción o valor, escogiendo de manera objetiva la mejor alternativa de las propuestas a través de un proceso riguroso de jerarquización, evaluación, valoración, ponderación, agregación [12]. Las fases del modelo se engloban dentro de un proceso común al ámbito de la toma de decisión y al análisis de valor, definido como ACEC (Análisis, Creatividad, Evaluación y Control).

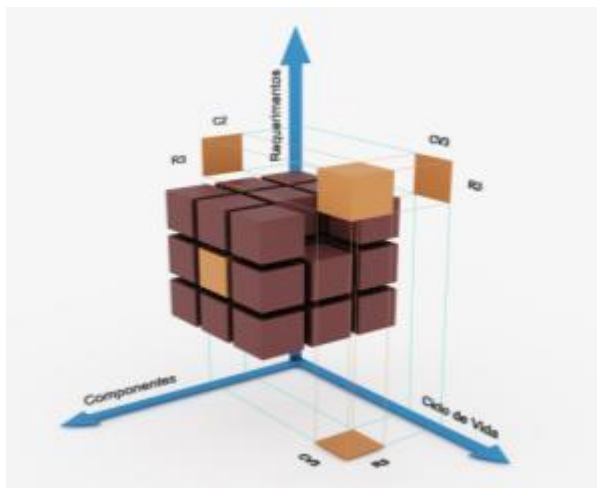


Figura 1. Estructura 3D de la toma de decisiones.

2.1 Análisis

2.1.1. Delimitación de la decisión.

Se establece quien va actuar como decisor, organizando los límites del sistema estructurados en tres ejes (requerimientos, componentes y ciclo de vida) y estipulando las condiciones de contorno así como las circunstancias que concurren en la decisión a tomar.

2.1.2. Árbol de toma de decisión.

Se ordena de manera ramificada todos los planos a estudiar. En primer lugar los aspectos generales o requerimientos, en los estratos intermedios se desglosan los criterios y subcriterios, y en los últimos niveles se precisan los aspectos más concretos o indicadores que son los que se evaluarán de manera directa. Es fundamental que los indicadores sean relevantes y representen el máximo del ámbito de decisión considerado, evitando solaparse.

2.2 Creatividad

2.2.1. Definición de las alternativas propuestas.

Una de las bondades de la metodología es precisamente que la creación de las alternativas (si no están fijadas de antemano) es posterior al modelo de valoración, evitando que se produzca en la toma de decisión inicial cualquier tipo de subjetividad direccionada inconscientemente por las valoraciones obtenidas en las alternativas.

2.3 Evaluación

2.3.1. Ponderación de los diferentes niveles del árbol.

Para la asignación de pesos se establece la medida de la importancia relativa entre los indicadores de cada criterio; posteriormente entre los criterios de un mismo requerimiento y, finalmente, entre los requerimientos. Como sistema de comparación en este proyecto se emplea la teoría matemática llamada proceso Analítico Jerárquico -AHP- [13] de acuerdo con una escala propuesta por Saaty (1990), en las que se admiten las situaciones intermedias y los inversos, obteniéndose así los pesos a través de la importancia subjetiva de cada elemento respecto a los demás.

Tabla 1: Escala de Saaty.

Significado de "i" en relación con "j"	Importancia relativa del elemento de la matriz	
	a_{ij}	a_{ji}
Absolutamente menos preferida	1/9	9
Mucho menos preferida	1/7	7
Menos preferida	1/5	5
Ligeramente menos preferida	1/3	3
Igualmente preferida	1	1
Moderadamente preferida	3	1/3
Fuertemente preferida	5	1/5
Muy fuertemente preferida	7	1/7
Extremadamente preferida	9	1/9

Tabla 2: Matriz de decisión.

Criterio "i"	C1	C2	...	Ci	...	Cn
C1	1	a_{12}	...	a_{1i}	...	a_{1n}
C2	$1/a_{21}$	1	...	a_{2i}	...	a_{2n}
...	...	...	1	...	...	...
Ci	$1/a_{i1}$	$1/a_{i2}$	...	1	...	a_{in}
...	...	...	...	...	1	...
Cn	$1/a_{n1}$	$1/a_{n2}$	...	$1/a_{ni}$	...	1

2.3.2. Creación de las funciones de valor.

Con cada uno de los indicadores se creará una función de valor común [14] que permitirá transformar la cuantificación de un atributo con las unidades de medida de ese indicador en una variable adimensional comprendida entre 0 y 1. Es importante asignar una forma correcta a la función de valor y especialmente establecer los puntos de máxima y mínima satisfacción de forma apropiada.

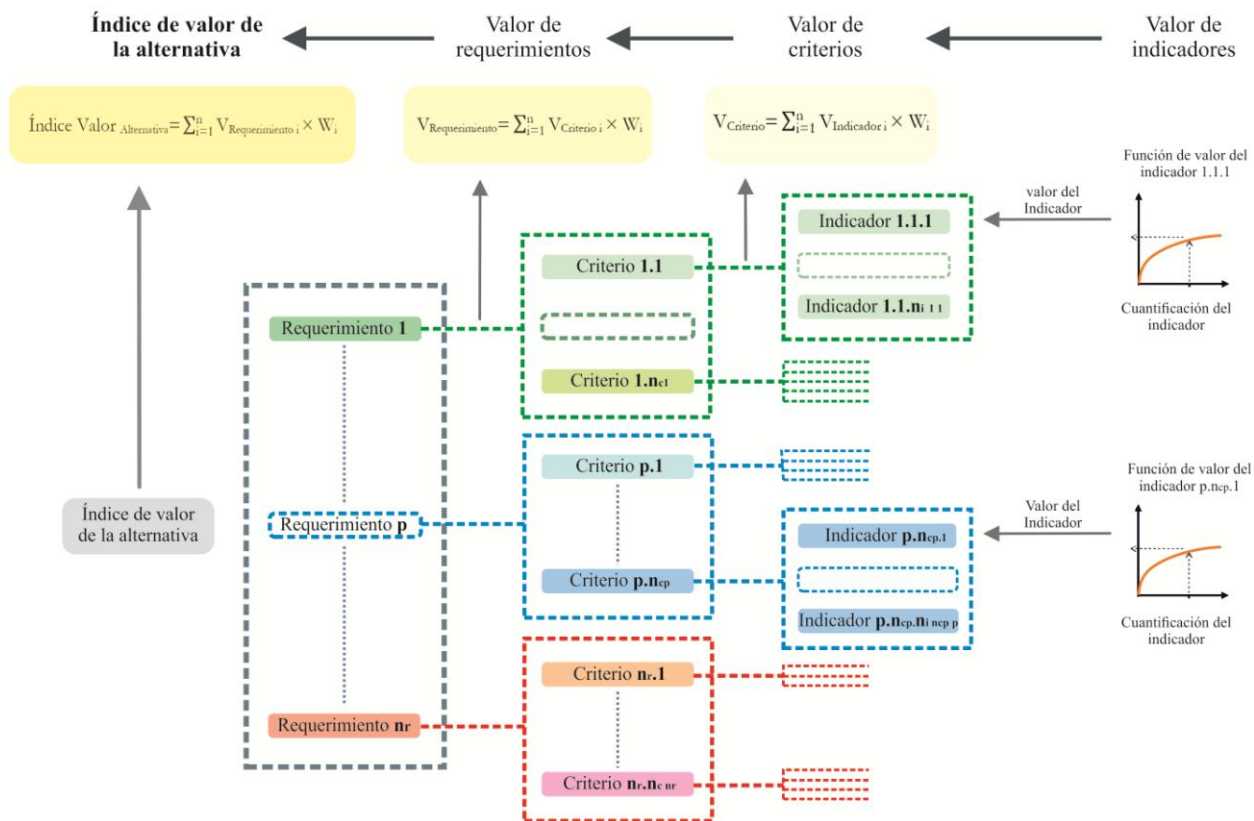


Figura 2. Procedimiento para la evaluación de las alternativas (basado en manual MIVES, 2009)

2.3.3. Índice de valor de las alternativas.

Para ello se debe, anteriormente, valorar lo indicadores, que son los únicos aspectos que son cuantificados directamente a través de la función de valor. Posteriormente, se obtiene el valor de los criterios y de los requerimientos y finalmente se obtiene el índice de valor de cada alternativa, conforme se explica en la Figura 2.

2.4 Control (complementario)

2.4.1. Análisis de sensibilidad

Se realiza para conocer la influencia de los distintos parámetros que componen el árbol de requerimientos sobre el índice de valor obtenido en cada una de las alternativas. Se han realizado, por ejemplo, interesantes estudios de sensibilidad sobre el modelo de evaluación de sostenibilidad de la vigente EHE-08 (anejo 13º) con reveladoras conclusiones [15] en torno a una cierta incoherencia del análisis de ciclo de vida (ACV) con la ponderación y las funciones de valor de la norma, indicando la conveniencia de una revisión de cara al inminente Código estructural, que parece se aprobará este año.

2.4.2. Contraste de resultados.

Su función pasa por controlar desviaciones e incertidumbres no previstas durante todo el desarrollo de la metodología permitiendo la introducción de correcciones, así como verificar a posteriori tanto la validez del modelo como los resultados de las alternativas respecto a lo que se esperaba inicialmente, mejorando el aprendizaje del sistema con cada experiencia.

3. Caracterización del problema

El estudio se centra en escoger un diseño óptimo para la estructura y envolvente en la autopromoción de una vivienda unifamiliar adosada midiendo el grado de sostenibilidad. La parcela, ubicada en Jaén, tiene una dimensión rectangular de 6,20 m de ancho por 20,00 m de fondo y un solo acceso desde cota de calle (± 0.00). La vivienda (B+1), consta de planta s/sótano con uso garaje (-1.30), planta baja con salón-comedor, cocina y aseo (+1.50), planta primera con 3 dormitorios, baño y aseo (+4.40), planta segunda con terraza y piscina (+7.40) y una pequeña cubierta para el torreón (+11.00).

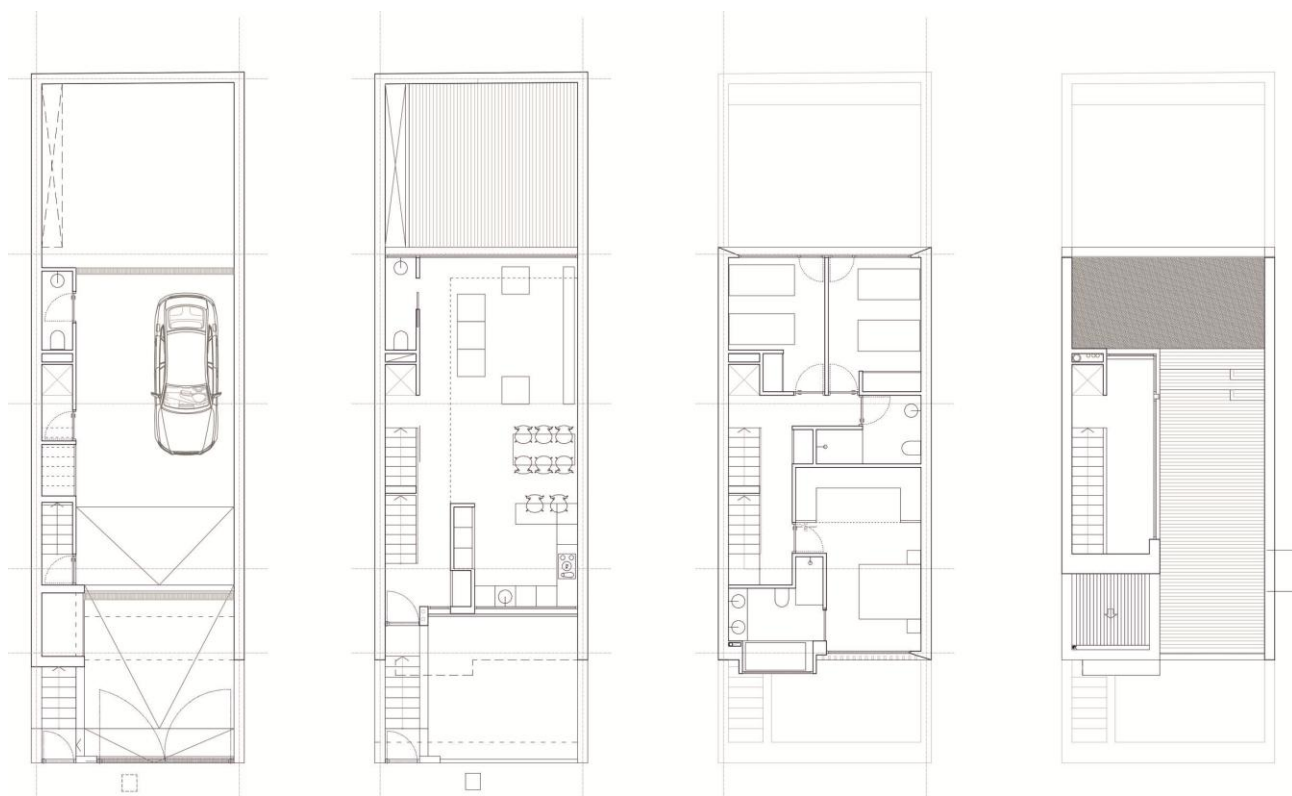


Figura 3. Plantas de distribución de la vivienda unifamiliar adosada.

De acuerdo al geotécnico, el terreno era muy poco favorable, de escasa capacidad portante, expansividad media-alta y margas con yeso que presentan agresividad química fuerte (Qc) por contenido en sulfatos. Aparte de esto, durante la ejecución sería imprescindible preservar el nivel de la "capa activa" original, evitando realizar tareas de excavación en los meses de mayores temperaturas (Jaén tiene verano muy extremo) que provocaría pérdida de humedad del material cuando se dejase expuesto a la intemperie. Por otro lado, al tratarse de una autopromoción de vivienda habitual, un condicionante decisivo era el presupuesto. El propietario ya había negociado, por su cuenta y riesgo, con una constructora un precio estimativo (que no estaba dispuesto a rebasar) en base a tipologías constructivas de la zona y su experiencia en viviendas colindantes.

En nuestro modelo, la distribución en planta no se ha considerado al ser un dato de entrada de proyecto; las instalaciones se han descartado al ser subcontratadas aparte; y las particiones, carpinterías y acabados serían los mismos en cualquiera de las alternativas propuestas para preservar la imagen estética del proyecto.

4. Solución del problema

4.1 Análisis

4.1.1. Eje de requerimientos.

En este eje se proponen cuatro requerimientos que se corresponden con las necesidades que tiene el decisor teniendo en cuenta la escala del proyecto y sin olvidar la perspectiva de realizar una evaluación desde el punto de vista sostenible. De esta manera se obtienen los planos Ambiental, Económico, Temporal y Funcional, a partir de los cuales se despliega el árbol de requerimientos en la Tabla 3.



Figura 4. Eje de Requerimientos para la vivienda.

Tabla 3: Árbol general de requerimientos.

REQUERIMIENTOS		CRITERIOS		INDICADORES	
AMBIENTAL (29,30%) ¹	R1	Consumo de energía	C1R1 (83,33%)	Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²)	I1C1R1 (100%)
		Posibilidad de mejorar el impacto ambiental	C2R1 (16,67%)	Uso de materiales reciclados (%)	I1C2R1 (100%)
ECONÓMICO (41,18%) ¹	R2	Costes	C1R2 (66,67%)	Presupuesto de ejecución de las obras (€/m ²)	I1C1R2 (83,33%)
				Mantenimiento (€/m ² en los primeros 10 años)	I2C1R2 (16,67%)
		Certeza del coste final	C2R2 (33,33%)	Riesgo de desviación en el coste por factores externos (puntuación)	I1C2R2 (100%)
TEMPORAL (10,80%) ¹	R3	Tiempo de ejecución	C1R3 (50%)	Plazo de ejecución por rendimientos (días)	I1C1R3 (100%)
		Capacidad de respuesta	C2R3 (50%)	Disponibilidad de materiales y equipamientos (puntuación)	I1C2R3 (100%)
FUNCIONAL (18,72%) ¹	R4	Complejidad del proyecto	C1R4 (25%)	Grado de facilidad en el proceso constructivo (escala)	I1C1R4 (25%)
				Flexibilidad para introducir reformas en la ejecución (puntuación)	I2C1R4 (75%)
		Confort del usuario	C2R4 (75%)	Aislamiento térmico (transmitancia W/m ² °K)	I1C2R4 (66,67%)
				Aislamiento acústico (índice global de reducción acústica Ra,tr)	I2C2R4 (33,33%)

¹ Los pesos están en porcentaje entre paréntesis, calculados mediante el proceso de análisis jerárquico AHP (Sección 2.3.1. Tabla 1 y Tabla 2).

4.1.2. Eje de componentes.

Los componentes que definen el proyecto se han centrado en las partidas de cimentación y estructura que constituyen el grueso del volumen de la obra, y por tanto serán los más relevantes a todos los niveles. También se ha añadido las fachadas y medianeras que, aunque a priori forman parte de la envolvente térmica en una solución tradicional, hemos considerado interesante incluirlas para poder comparar posteriormente con otras soluciones no convencionales donde el soporte resistente hace al mismo tiempo la función de cerramiento.

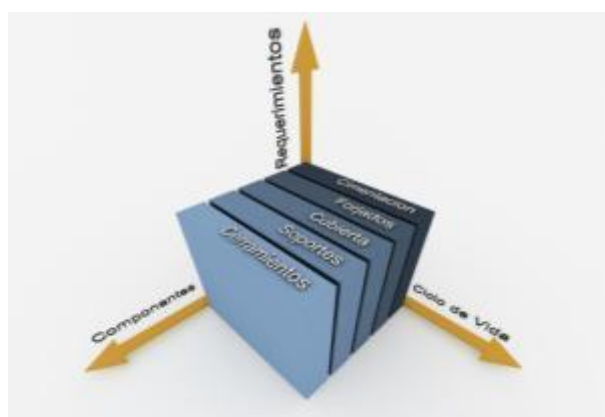


Figura 5. Eje de Componentes para la vivienda.

4.1.3. Eje del ciclo de vida:

El ciclo de vida abarca desde la extracción de las materias primas o el procesado de materiales, la fabricación, distribución, uso y mantenimiento, reparación hasta la eliminación o reciclado: "de la cuna a la tumba" [16]. Más allá de facilitar o estructurar la entrada de datos, hemos querido darle al ciclo de vida la relevancia que se merece en este proyecto ya que nos ha permitido tener una mayor perspectiva sobre la toma de decisión, mostrando la importancia que tiene en las primeras etapas [17], mejorando el proyecto tanto más cuanto antes se tengan en cuenta.

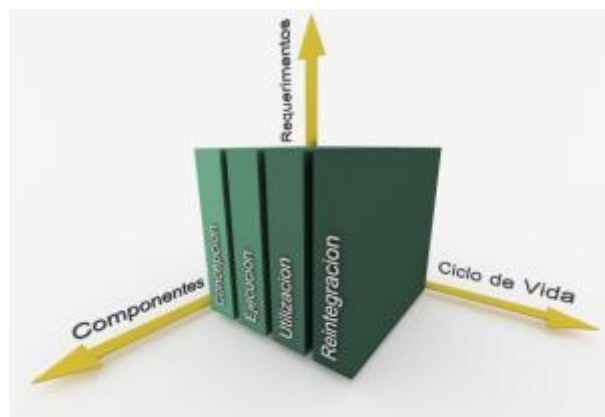


Figura 6. Eje de Ciclo de Vida para la vivienda.

Tabla 4: Principales características de las alternativas

Alternativa	Componentes	Descripción
A "Convencional"	Cimentación	Pilotes CPI-7 de Ø35cm hasta 8.80 m de profundidad y vigas de cimentación.
	Forjado de piso	Losa de hormigón armado (24 cm forjado tipo, 26 cm solarium / piscina). Azotea transitable no ventilada invertida con solado; XPS aislamiento (8 cm).
	Cubierta inclinada	Losa de hormigón armado (22 cm); XPS aislamiento (6 cm).
	Soportes	Pilares rectangulares de hormigón y metálicos 2UPN120 (apeos de casetón). Muro perimetral de sótano de hormigón armado (25 cm).
	Cerramientos	Hoja exterior de fábrica de LP (11.5 cm); cámara de aire con aislamiento XPS (8 cm); Hoja interior de fábrica de LHD (7 cm);
B "Prefabricada" ²	Cimentación	Idem a la alternativa "A".
	Forjado de piso	Placas reforzadas (piso tipo 30 cm, solarium 17,5 cm); aislamiento XPS (9 cm). Fondo de piscina con placas de 30 cm (1100 Kg/m ²) y bloque "O" anclado al fondo y bloque "U" en la parte superior y media altura.
	Cubierta inclinada	Placas reforzadas (12 cm); aislamiento XPS (12 cm).
	Soportes	No hay pilares. Se mantiene el muro perimetral de hormigón en sótano.
	Cerramientos	Muros de carga con bloques de hormigón celular machihembrado (20 cm).
C "Tecnológica" ³	Cimentación	Losa de cimentación 7/46/7 sobre mejora de terreno.
	Forjado de piso	Losa aligerada de hormigón armado proyectado (pavimento tipo 6+18+6 cm, solarium / piscina de 7+26+7 cm). Cámara de aire interior con XPS (10 cm).
	Cubierta inclinada	Losa aligerada de hormigón armado proyectado (5+5+5 cm).
	Soportes	No hay pilares. Se mantiene el muro perimetral de hormigón en sótano.
	Cerramientos	Muros estructurales en fachada y medianeras (6+13+6 cm) con XPS (10 cm).

² YTONG: Bloques y placas prefabricadas de hormigón celular curado en autoclave fabricado con densidades entre 350-700 kg/m³.

³ ELESDOPA©: Elemento Estructural de Doble Pared de Hormigón Armado Proyectado con conectores. [18]

Tabla 5. Indicadores a evaluar por cada componente

Indicador	COMPONENTES				
	Cimientos	Forjado	Cubierta	Soportes	Cerramiento
I1C1R1	☒	☒	☒	☒	☒
I1C2R1	☒	☒	☒	☒	☒
I1C1R2	☒	☒	☒	☒	☒
I2C1R2		☒	☒		☒
I1C2R2	☒	☒	☒	☒	☒
I1C1R3	☒	☒	☒	☒	☒
I1C2R3	☒	☒	☒	☒	☒
I1C1R4	☒	☒	☒	☒	☒
I2C1R4		☒	☒	☒	☒
I1C2R4	☒	☒	☒		☒
I2C2R4		☒	☒		☒

4.2. Creatividad

En esta etapa se definen las alternativas que se incluirán en el proceso de toma de decisión. Se plantean tres opciones dispares desglosadas por componentes parciales según la Tabla 4: la solución "tradicional" realmente ejecutada que usaremos de referencia (A); otra prefabricada en base a un único material con montaje prácticamente en seco (B); y por último un sistema estructural integral mediante tecnología innovadora para hormigón armado (C).

4.3. Evaluación

El objetivo de esta etapa es seleccionar cual de las tres alternativas descritas genera mayor valor al proyecto según las condiciones de contorno identificadas en la etapa de análisis. En la Tabla 5 se muestra el chequeo de indicadores que se han de calificar con cada componente, pues naturalmente no todos proceden aplicarlos en la evaluación.

4.3.1. Ponderación:

Se define la importancia de cada uno de los indicadores, criterios y requerimientos, que permitirán la comparación entre todos los elementos del árbol. Para ello se ha empleado el método AHP conforme al apartado 2.3.1 que se basa en la interacción estructurada con el decisor mediante la comparación por pares, obteniendo los pesos que miden sus preferencias a través de la importancia subjetiva de cada elemento respecto a los demás. Los porcentajes con los pesos resultantes están incluidos en la Tabla 3.

Tabla 6. Parámetros de la función de valor resultantes para la vivienda unifamiliar.

INDICADORES		Satisfacción		Función	Tendencia
		Mínimo	Máximo		
Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m ²)	I1C1R1 (1)	1433	0	Lineal	Decreciente
Uso de materiales reciclados (%)	I1C2R1 (2)	17	70	Cóncava	Creciente
Presupuesto de ejecución de las obras (€/m ²)	I1C1R2 (3)	777	249	Forma de S	Decreciente
Mantenimiento (€/m ² en los primeros 10 años)	I2C1R2 (4)	15,54	0	Cóncava	Decreciente
Riesgo de desviación debido a factores externos (puntuación)	I1C2R2 (5)	0	100	Forma de S	Creciente
Plazo de ejecución por rendimientos (días)	I1C1R3 (6)	225	138	Convexa	Decreciente
Disponibilidad de materiales y equipamientos (puntuación)	I1C2R3 (7)	0	100	Lineal	Creciente
Grado de facilidad en el proceso constructivo (escala)	I1C1R4 (8)	1	10	Lineal	Creciente
Flexibilidad para introducir reformas (puntuación)	I2C1R4 (9)	0	100	Lineal	Creciente
Aislamiento térmico (transmitancia W/m ² °K)	I1C2R4 (10)	0,29	0,19	Cóncava	Decreciente
Aislamiento acústico (índice global reducción acústica Ra,tr)	I2C2R4 (11)	33	60	Convexa	Creciente

4.3.2. Construcción de las funciones de valor:

La Función de valor transforma el indicador con unidades físicas a unidades comunes (valor) según 2.3.2. Por cada indicador se define una función específica cuya expresión matemática depende de los parámetros que se adopten, como los puntos de mínima y máxima satisfacción, tendencia de la función y pendiente de la misma. La Ecuación (1) es la expresión general de la función de valor que evaluará la satisfacción con respecto al indicador es:

$$V_{ind} = A + B \cdot \left[1 - e^{-k_i \left(\frac{|X - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right] \quad (1)$$

A=valor de la abscisa x_{min} , en nuestro caso es 0.

B=factor expresado en la Ecuación (2) encargado de mantener el rango de la función {0-1} que depende de los cinco parámetros siguientes:

X_{min} = abscisa cuyo valor de satisfacción es igual a 0.

X_{max} = abscisa cuyo valor de satisfacción es igual a 1.

X= abscisa del indicador evaluado que genera V_{ind} .

P_i ($0 < P < \infty$)=factor que define la forma de la curva.

C_i ($P_i > 1$)= valor de abscisa en el punto de inflexión.

K_i ($0 < K < 1$)= ordenada para el punto de inflexión.

$$B = \frac{1}{\left[1 - e^{-k_i \left(\frac{|X - X_{min}|}{C_i} \right)^{P_i}} \right]} \quad (2)$$

La ecuación genérica, parámetros y formas que debe adoptar la función de valor dependiendo del indicador valorado se explica con mayor detalle en [14].

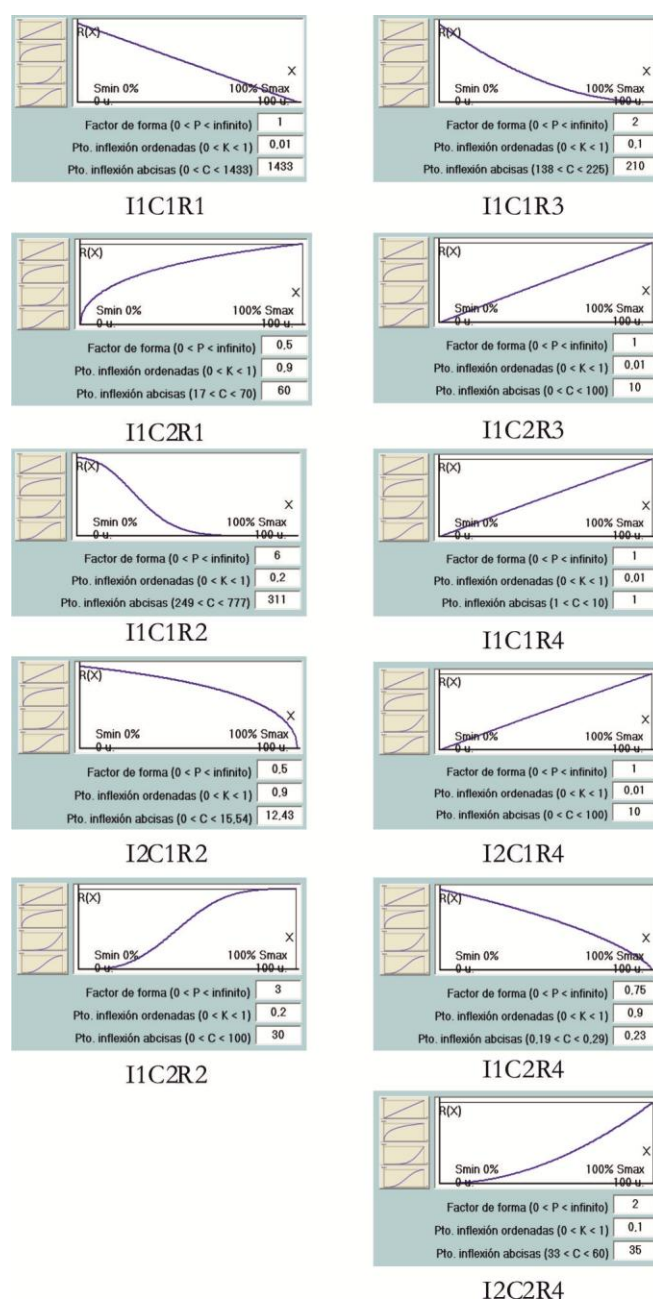


Figura 7. Funciones de valor por cada Indicador.

4.3.3. Respuesta de las alternativas.

La respuesta de las alternativas se realiza con cada uno de los componentes verificando su comportamiento para cada indicador específico. La Tabla 7 contiene las respuestas ("X_{ind}") de cada indicador respecto a las tres alternativas estudiadas por cada componente. Los valores, tal han sido obtenidos del desarrollo de proyectos propios, de la literatura, de la normativa, de la opinión de expertos, de documentación facilitada por las empresas ofertantes o mediante diversos cuestionarios de elaboración propia en los que hemos asignado una puntuación o escala semántica en función de la capacidad de respuesta del indicador. A continuación se indican reseñas y herramientas, referenciadas en la Tabla 6, que se han utilizado para el cálculo de los coeficientes de cada indicador:

- (1) Azpilicueta, E. Tabla de contenido energético o energía primaria de los materiales. Revista Tectónica: monografías de arquitectura, tecnología y construcción 31, 2010.
Previsión para nueva construcción del gasto energético (Mardaras y Cepeda, 2004).
Energía consumida por materiales de construcción durante la fabricación (MJ/kg) (IDAE, 1999).
- (2) Datos publicados en el II PNRC, 2008-2015. Porcentaje de materiales reciclados (Alarcón-Núñez, D.B., 2006).
- (3) Valores medios estimativos de la construcción 2019, COAMA.
Bases de precios (PREOC, BCCA y Generador de precios CYPE Ingenieros).
Precios ofertados por empresas especializadas ("Plataforma Logística YTONG Sur BigMat Multipio" y "ELES DOPA© international").
- (4) Mantenimiento decenal según bases de precios.
- (5) Cuestionarios puntuables. Elaboración propia.
- (6) Estimado en base a la experiencia y contrastado con el rendimiento proporcionado por las empresas constructoras.
- (7) Cuestionarios puntuables. Elaboración propia.
- (8) Cuestionarios escalables. Elaboración propia.
- (9) Cuestionarios puntuables. Elaboración propia.
- (10) Cálculo de la transmitancia para cada tipo de envolvente con la aplicación CEXv2.3.
- (11) Catálogo de elementos constructivos del CTE // DB-HR // Guía técnica del Ytong 2018.

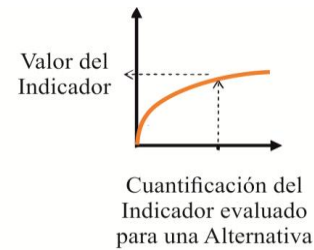


Figura 8. Valor del Indicador.

4.3.4. Cálculo del valor para los indicadores (I).

El valor de los indicadores se obtiene a partir de la función de valor y la cuantificación del indicador para cada alternativa (Tabla 7). La cuantificación de la alternativa corresponde a la abscisa del punto de la función de valor, y cuya ordenada, es el valor del indicador para la alternativa estudiada (Figura 8).

4.3.4. Cálculo del valor para los criterios (C).

El valor de los criterios se obtiene conforme a la Ecuación (3), partiendo del valor de los indicadores pertenecientes a ese mismo criterio multiplicado por sus respectivos pesos, siendo n el número de indicadores pertenecientes al criterio valorado (Tabla 8).

$$V_{\text{Criterio}} = \sum_{i=1}^n V_{\text{Indicador } i} \times W_i \quad (3)$$

4.3.5. Cálculo del valor para los requerimientos (R).

De forma análoga, el valor de los requerimientos se obtiene según la Ecuación (4) como el sumatorio de los valores de los criterios pertenecientes a ese mismo requerimiento multiplicado por sus pesos, siendo n el número de criterios pertenecientes al requerimiento valorado (Tabla 9).

$$V_{\text{Requerimiento}} = \sum_{i=1}^n V_{\text{Criterio } i} \times W_i \quad (4)$$

4.3.6. Índice de valor de las alternativas (I_v).

El índice de valor de las alternativas se obtiene con la Ecuación (5) sumando el valor de los requerimientos multiplicados por sus pesos, siendo n el número de requerimientos. La alternativa óptima será aquella que obtenga un índice de valor más elevado (Tabla 10).

$$\text{Índice Valor Alternativa} = \sum_{i=1}^n V_{\text{Requerimiento } i} \times W_i \quad (5)$$

Tabla 7. Respuestas y valor para los INDICADORES evaluados para cada alternativa

R	INDICADOR	COMPONENTES	ALTERNATIVA: A		ALTERNATIVA: B		ALTERNATIVA: C	
			"CONVENCIONAL"		"PREFABRICADA"		"TECNOLÓGICA"	
			Xind	Valor	Xind	Valor	Xind	Valor
AMBIENTAL	Energía consumida por los materiales de construcción en el proceso de fabricación (MJ/m2)	Cimentación	1244	0,13	1244	0,13	746	0,48
		Estructura	1008	0,30	214	0,85	670	0,53
		Cubierta inclinada	902	0,37	96	0,93	586	0,59
		Pilares / Muros	799	0,44	597	0,58	187	0,87
		Fachadas / Medianeras	1107	0,23	171	0,88	567	0,61
		TOTAL		0,29		0,67		0,62
	Uso de materiales reciclados (%)	Cimentación	0,18	0,00	0,18	0,00	45,64	0,81
		Estructura	35,87	0,69	11,54	0,00	40,35	0,75
		Cubierta inclinada	36,59	0,70	8,94	0,00	42,85	0,78
		Pilares / Muros	46,05	0,82	36,22	0,70	36,22	0,70
		Fachadas / Medianeras	61,98	0,95	16,92	0,00	43,19	0,79
		TOTAL		0,63		0,14		0,77
ECONÓMICO	Presupuesto de ejecución de las obras (€/m2)	Cimentación	128,98		128,98		63,60	
		Estructura	75,46		154,14		76,24	
		Cubierta inclinada	75,52		75,79		60,47	
		Pilares / Muros	60,30		45,95		77,65	
		Fachadas / Medianeras	43,60		56,84		77,65	
		TOTAL	383,86	0,56	461,70	0,20	355,61	0,72
	Mantenimiento (€/m2 primeros 10 años)	Cimentación						
		Estructura	3,77		7,71		3,81	
		Cubierta inclinada	3,78		3,79		3,02	
		Pilares / Muros	2,24		2,30		3,88	
		Fachadas / Medianeras	2,18		2,84		3,88	
		TOTAL	11,97	0,60	16,64	0,37	14,60	0,66
	Riesgo de desviación debido a factores externos (puntuación)	Cimentación	40	0,38	40	0,38	65	0,87
		Estructura	30	0,18	60	0,80	65	0,87
		Cubierta inclinada	30	0,18	60	0,80	65	0,87
		Pilares / Muros	30	0,18	30	0,18	65	0,87
		Fachadas / Medianeras	50	0,60	60	0,80	65	0,87
		TOTAL		0,30		0,59		0,87
TEMPORAL	Plazo de ejecución por rendimientos (días)	Cimentación	49		49		28	
		Estructura	72		12		68	
		Cubierta inclinada	10		4		10	
		Pilares / Muros	24		17		16	
		Fachadas / Medianeras	18		10		34	
		TOTAL	173	0,36	92	1,00	157	0,61
	Disponibilidad de materiales y equipamientos (puntuación)	Cimentación	50	0,50	50	0,50	65	0,65
		Estructura	30	0,30	50	0,50	65	0,65
		Cubierta inclinada	100	1,00	15	0,15	35	0,35
		Pilares / Muros	100	1,00	100	1,00	35	0,35
		Fachadas / Medianeras	100	1,00	40	0,40	35	0,35
		TOTAL		0,76		0,51		0,47
FUNCIONAL	Grado de facilidad en el proceso constructivo (escala)	Cimentación	4,67	0,42	4,67	0,42	3,83	0,32
		Estructura	5,17	0,47	9,17	0,91	3,83	0,32
		Cubierta inclinada	5,17	0,47	9,17	0,91	3,83	0,32
		Pilares / Muros	5,17	0,47	5,17	0,47	3,83	0,32
		Fachadas / Medianeras	4,67	0,42	9,17	0,91	3,83	0,32
		TOTAL		0,45		0,72		0,32
	Flexibilidad para introducir reformas (puntuación)	Cimentación						
		Estructura	100	1,00	35	0,35	15	0,15
		Cubierta inclinada	100	1,00	35	0,35	15	0,15
		Pilares / Muros	100	1,00	100	1,00	15	0,15
		Fachadas / Medianeras	100	1,00	35	0,35	15	0,15
		TOTAL		1,00		0,51		0,15
	Aislamiento térmico (transmitancia W/m2°K)	Cimentación	0,41	0	0,41	0	0,22	0,81
		Estructura	0,21	0,88	0,23	0,73	0,19	1
		Cubierta inclinada	0,29	0	0,23	0,73	0,22	0,81
		Pilares / Muros						
		Fachadas / Medianeras	0,26	0,46	0,29	0	0,23	0,73
		TOTAL		0,34		0,37		0,84
	Aislamiento acústico (índice global reducción acústica Ra,tr)	Cimentación						
		Estructura	59	0,93	47	0,27	51	0,45
		Cubierta inclinada	55	0,67	41	0,09	47	0,27
		Pilares / Muros						
		Fachadas / Medianeras	47	0,27	43	0,14	47	0,27
		TOTAL		0,62		0,17		0,33

Tabla 8. Valor para los CRITERIOS en la vivienda unifamiliar.

R	CRITERIO	INDICADOR	ALTERNATIVA: A "CONVENCIONAL"				ALTERNATIVA: B "PREFABRICADA"				ALTERNATIVA: C "TECNOLÓGICA"			
			Vind	Wijk	Vcrit	Σvcrit	Vind	Wijk	Vcrit	Σvcrit	Vind	Wijk	Vcrit	Σvcrit
AMBIENTAL	Consumo de energía	I1C1R1	0,29	100,00%	0,29	0,29	0,67	100,00%	0,67	0,67	0,62	100,00%	0,62	0,62
	Posibilidad de mejorar el impacto ambiental	I1C2R1	0,63	100,00%	0,63	0,63	0,14	100,00%	0,14	0,14	0,77	100,00%	0,77	0,77
ECONÓMICO	Costes	I1C1R2	0,56	83,33%	0,47	0,57	0,20	83,33%	0,17	0,23	0,72	83,33%	0,60	0,71
		I2C1R2	0,60	16,67%	0,10		0,37	16,67%	0,06		0,66	16,67%	0,11	
	Certeza en el coste final	I1C2R2	0,30	100,00%	0,30	0,30	0,59	100,00%	0,59	0,59	0,87	100,00%	0,87	0,87
TEMPORAL	Tiempo de ejecución	I1C1R3	0,36	100,00%	0,36	0,36	1,00	100,00%	1,00	1,00	0,61	100,00%	0,61	0,61
	Capacidad de respuesta	I1C2R3	0,76	100,00%	0,76	0,76	0,51	100,00%	0,51	0,51	0,47	100,00%	0,47	0,47
FUNCIONAL	Complejidad del proyecto	I1C1R4	0,45	25,00%	0,11	0,86	0,72	25,00%	0,18	0,57	0,32	25,00%	0,08	0,19
		I2C1R4	1,00	75,00%	0,75		0,51	75,00%	0,38		0,15	75,00%	0,11	
	Confort del usuario	I1C2R4	0,34	66,67%	0,22	0,43	0,37	66,67%	0,24	0,30	0,84	66,67%	0,56	0,67
		I2C2R4	0,62	33,33%	0,21		0,17	33,33%	0,06		0,33	33,33%	0,11	

Tabla 9. Valor para los REQUERIMIENTOS en la vivienda unifamiliar.

R	CRITERIO	ALTERNATIVA: A "CONVENCIONAL"				ALTERNATIVA: B "PREFABRICADA"				ALTERNATIVA: C "TECNOLÓGICA"			
		Vcrit	Wijk	Vreq	Σvreq	Vcrit	Wijk	Vreq	Σvreq	Vcrit	Wijk	Vreq	Σvreq
AMBIENTAL	C1R1	0,29	83,33%	0,24	0,35	0,67	83,33%	0,56	0,58	0,62	83,33%	0,51	0,64
	C2R1	0,63	16,67%	0,11		0,14	16,67%	0,02		0,77	16,67%	0,13	
ECONÓMICO	C1R2	0,57	50,00%	0,28	0,44	0,23	50,00%	0,11	0,41	0,71	50,00%	0,35	0,79
	C2R2	0,30	50,00%	0,15		0,59	50,00%	0,30		0,87	50,00%	0,44	
TEMPORAL	C1R3	0,36	66,67%	0,24	0,49	1,00	66,67%	0,67	0,84	0,61	66,67%	0,41	0,56
	C2R3	0,76	33,33%	0,25		0,51	33,33%	0,17		0,47	33,33%	0,16	
FUNCIONAL	C1R4	0,86	25,00%	0,22	0,54	0,57	25,00%	0,14	0,37	0,19	25,00%	0,05	0,55
	C2R4	0,43	75,00%	0,32		0,30	75,00%	0,22		0,67	75,00%	0,50	

Tabla 10. Cálculo de la alternativa óptima.

R	ALTERNATIVA: A			ALTERNATIVA: B			ALTERNATIVA: C		
	"CONVENCIONAL"			"PREFABRICADA"			"TECNOLÓGICA"		
	Vreq	Wijk	Valt-A	Vreq	Wijk	Valt-B	Vreq	Wijk	Valt-C
AMBIENTAL	0,35	29,30%	0,10	0,58	29,30%	0,17	0,64	29,30%	0,19
ECONÓMICO	0,44	41,18%	0,18	0,41	41,18%	0,17	0,79	41,18%	0,33
TEMPORAL	0,49	10,80%	0,05	0,84	10,80%	0,09	0,56	10,80%	0,06
FUNCIONAL	0,54	18,72%	0,10	0,37	18,72%	0,07	0,55	18,72%	0,10
Índice de valor	0,44			0,50			0,68		

5. Conclusiones

Como resultado de aplicar la metodología para la vivienda unifamiliar se obtiene como mejor alternativa la "C", que corresponde a una estructura y cerramientos proyectados mediante un sistema integral (cimentación y contención incluidos como componentes diferenciadores) con elementos de doble muro de hormigón armado proyectado, separados por un soporte y unidos por conectores.

A priori, parecería que la alternativa "B" prefabricada hubiera obtenido más puntuación, al ser más práctica en cuanto a rapidez de montaje sin competencia en tiempo de ejecución con el resto de opciones, aunque a costa de ser la más cara. Los plazos son un factor determinante en las ofertas de promoción pública o en la gestión de las grandes inmobiliarias (cuyas adjudicaciones basan un peso importante en la planificación de la contrata). Sin embargo, no sucede lo mismo en una autopromoción, ya que el horizonte del propietario es la construcción de su propio "hogar", normalmente sufragado con recursos limitados, primando por tanto los aspectos económicos y sociales vinculados a la funcionalidad durante su vida útil.

La alternativa "A" convencional tiene el mejor desempeño en disponibilidad de materiales y equipos (debido a la facilidad local para encontrar medios técnicos habituales), el mayor valor en flexibilidad para introducir reformas (como se espera en un sistema de construcción ampliamente conocido) y el confort del usuario más alto en aislamiento acústico, como corresponde para la alternativa más masiva.

La alternativa "C" tecnológica aunque emplea hormigón tiene mucho potencial en el marco de la sostenibilidad [19] con un sistema novedoso que consigue estructuras huecas (o rellenas de aislante) con un significativo ahorro de material y mínimo peso, aprovechando al máximo la capacidad mecánica del hormigón. Como resultado se obtienen estructuras muy rígidas de hormigón armado pero, gracias al ahorro de material, con coste reducido que precisamente es uno de los criterios con más peso en esta evaluación. Además, un sistema especializado reduce el riesgo de desfase en costos debido al control técnico adicional implementado por la propia patente. Otro motivo es el equilibrio que mantiene entre el promedio de indicadores, permitiendo la flexibilidad en proyecto y obra consiguiendo una estructura sostenible de alta resistencia, bajo consumo de hormigón/acero, alta eficiencia energética y una razonable atenuación acústica. En la Figura 9 se aprecia como la alternativa "C" distribuye la mayor área repartida entre todos los requerimientos a pesar de no alcanzar el máximo temporal.

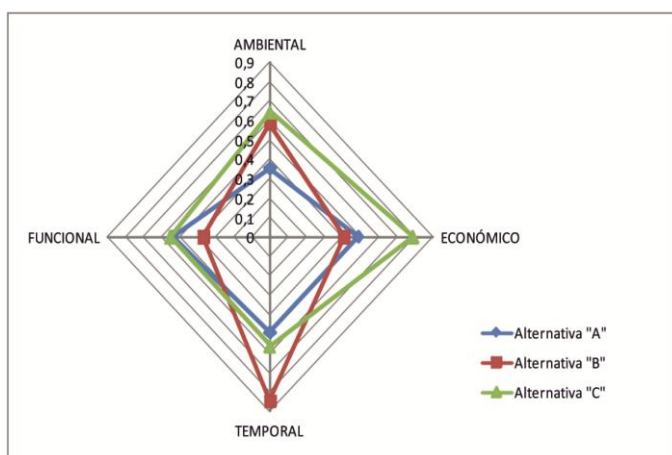


Figura 9. Comparación entre requerimientos de las alternativas.

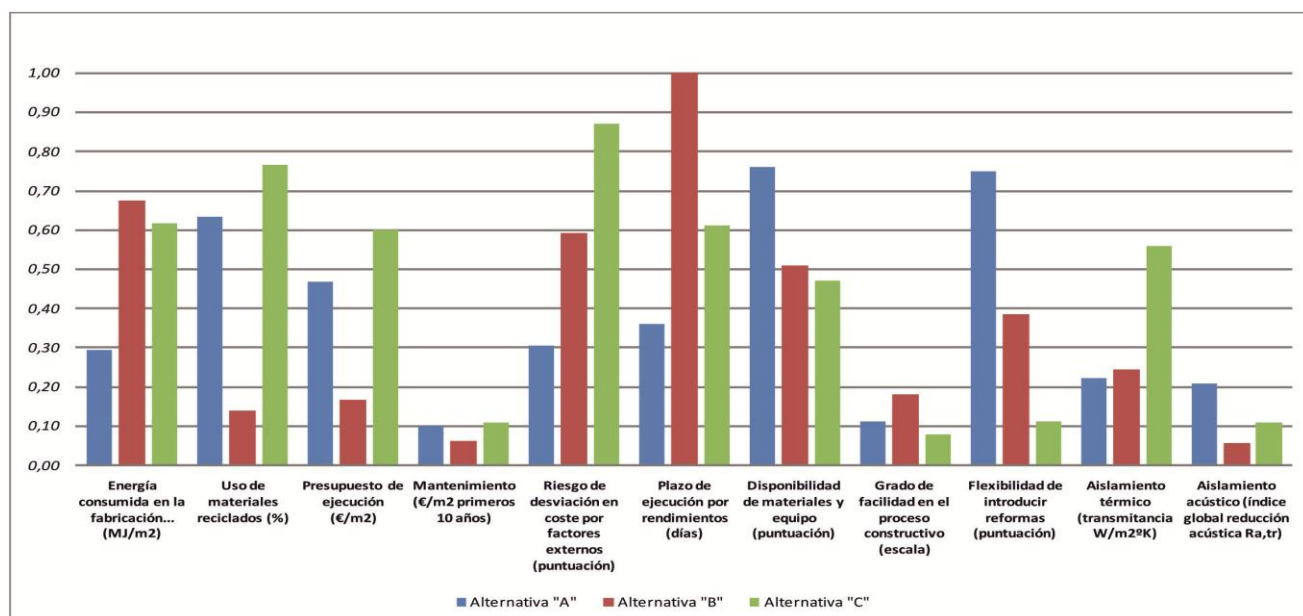


Figura 10. Comparación del valor normalizado de todos los indicadores entre las 3 alternativas.

De las respuestas a las alternativas se deduce que el sistema tecnológico en este proyecto tiene un tiempo de ejecución intermedio, tiempo reducido de fraguado y menor gasto de material lo que supone acelerar sobre la puesta en obra convencional al menos un 10 % y reducir hasta un 23 % los costes de estructura y cerramiento respecto del prefabricado.

Como aportación, este estudio ha permitido ajustar una colección de indicadores para una vivienda unifamiliar adosada de autopromoción, medidos a través de atributos tangibles e intangibles (con cuestionarios que convierten las variables en puntajes y escalas asociadas) e introduciendo factores de incertidumbre y riesgo, que sirva como herramienta de ayuda en la toma de decisiones no solo a propietarios sino también a los diseñadores del proyecto. El modelo tiene en cuenta no solo cuestiones técnicas y económicas (propias de procesos de gestión de proyectos y adjudicación de obras) sino también sociales y medioambientales como pilares fundamentales del desarrollo sostenible. Además dada la flexibilidad del método puede calibrarse ajustándose a otras tipologías residenciales haciendo la herramienta más versátil. La metodología MIVES, ya se ha empleado en construcción con fines prácticos, como se ha explicado en la Sección 1, aunque es escasa su aplicación en edificación residencial, estando ausente en tipología unifamiliar.

Además, las evaluaciones normalmente se suelen realizar por pares, simplificando la comparación entre la opción que realmente constituye una disyuntiva respecto a otra de referencia. En nuestro estudio hemos realizado una comparación aportando tres alternativas simultáneas que, aunque complejizan la toma e introducción de datos, ofrecen una perspectiva más amplia entre las diversas soluciones constructivas y permitirían afinar un análisis de sensibilidad de los resultados a través de otras metodologías complementarias, como el método Delphi. Por otro lado, a día de hoy no existe prácticamente nada de producción científica del sistema estructural de doble pared de hormigón armado más allá del desarrollo interno de la patente o presentaciones comerciales.

No es objeto de este estudio cuestionar los pesos o respuestas a los indicadores, sino aplicar a un caso real una metodología basada en el análisis de valor con máximo rigor, aportando un sistema de evaluación integral para un autopromotor que le permita, en colaboración con el proyectista, decidir de forma objetiva sobre las distintas etapas del ciclo de vida que condicionarán desde el origen el diseño y la construcción de su futura casa. En próximos estudios profundizaremos sobre diseño eficiente de estructuras con hormigón no convencional, basado en criterios sostenibles multiobjetivo.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, así como de los fondos FEDER (Proyecto: BIA2017-85098-R). Los autores también manifiestan su gratitud a las empresas que han facilitado los datos e información necesaria para confeccionar este trabajo: "Plataforma Logística Ytong Sur BigMat Múltiplo" así como "ELESDOPA© international".

Referencias

- [1] L.A. Sierra, E. Pellicer, V. Yepes. Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects, *Environmental Impact Assessment Review* 65 (2017) 41-53.
- [2] I. Josa, A. Aguado. Infrastructures and society: from a literature review to a conceptual framework, *Journal of Cleaner Production* 238 (2019) 117741.
- [3] A. Aguado, A. Josa. Los requerimientos ambientales en la toma de decisiones sobre estructuras de hormigón, *Hormigón y acero* 55 (2004) 234.
- [4] L.A. Sierra, E. Pellicer, V. Yepes. Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects, *Environmental Impact Assessment Review* 65 (2017) 41-53.
- [5] T. García-Segura, V. Penadés-Plà, V. Yepes. Sustainable bridge design by metamodel-assisted multi-objective optimization and decision-making under uncertainty, *Journal of Cleaner Production* 202 (2018) 904-915.
- [6] V. Yepes, J.V. Martí, T. García-Segura. Cost and CO2 emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm, *Automation in Construction* 49 (2015) 123-134.
- [7] I. J. Navarro, V. Yepes, J. V. Martí. A review of multi-criteria assessment techniques applied to sustainable infrastructures design, *Advances in Civil Engineering* (2019) 6134803.
- [8] J. Cuadrado, M. Zubizarreta, E. Roji, M. Larrauri, I. Alvarez. Sustainability assessment methodology for industrial buildings: three case studies, *Civil Engineering and Environmental Systems* 33: 2 (2016) 106-124.
- [9] A. J. Sánchez-Garrido, V. Yepes. Multi-criteria assessment of alternative sustainable structures for a self-promoted, single-family home, *Journal of Cleaner Production* 258 (2020) 120556.
- [10] B. Viñolas. Aplicaciones y avances de la metodología MIVES en valoraciones multicriterio. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.
- [11] N. Villegas-Flores. Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.
- [12] B. Alarcón, A. Aguado, R. Manga, A. Josa. A Value Function for Assessing Sustainability: Application to Industrial Buildings, *Sustainability* 3:1 (2011) 35–50.
- [13] Saaty, T.L. How to make a decision: The analytic hierarchy process, *European Journal of Operational Research* 48:1 (1990) 9–26.
- [14] O. Pons, A. de La Fuente, A. Aguado. The Use of MIVES as a sustainability assessment MCDM method for architecture and civil engineering applications, *Sustainability* 8:5 (2016) 460.
- [15] J. Mel, D. Gómez, P. de la Cruz, A. del Caño, Análisis de sensibilidad y estudio crítico del modelo de evaluación de la sostenibilidad de la Instrucción Española de Hormigón Estructural, *Informes de la Construcción* 67 (2015) 539.
- [16] J. J. Pons, V. Penadés-Plà, V. Yepes, J.V. Martí. Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison, *Journal of Cleaner Production*, 192 (2018) 411-420.
- [17] A. Josa, A. Aguado, E. Byars, A. Cardim. Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU, *Cement and Concrete Research* 37:5 (2007) 781-788.
- [18] M. Rojas, F. Vélchez, F. Terrón. Elemento estructural de doble pared de hormigón armado. La Convención de la Edificación, COATGR, Granada 2016.
- [19] A. Aguado, M. Barra, J. M. Gómez-Soberón. Potencialidad del hormigón estructural y su tecnología en el marco de la sostenibilidad de la construcción, *Hormigón y acero* 54 (2004) 228.