



# Study of a comparative analysis model of environmental and economic costs on a façade based on the life cycle approach

## Estudio de modelo de análisis comparativo de costes ambientales y económicos de una fachada basado en el enfoque del ciclo de vida

NURIA GARCÍA HORCAJO

Arquiteknum Calle Camino de Guadalix nº 8, San Agustín de Guadalix, 28750 Madrid - España. [arquitectica92@gmail.com](mailto:arquitectica92@gmail.com)

- ◊ A model to analyze economic and environmental costs in the refurbishment process of a façade.
- ◊ It is important to take into account during refurbishment process environmental and economic aspects.
- ◊ Further investigations should drive to get a building global evaluation model.

*Climate change has come and sustainability has become a global priority. Sustainability in building sector means not only new construction but also refurbishment of existing buildings. Gas emissions reduction goes necessarily through to enhance environmental and energetic characteristics of existing buildings. So, the use of renewable energy is necessary as well as sustainable refurbishments. Many issues have a direct impact on the sustainability of a refurbishment, (environmental, social, economic, energetic, etc). This study proposes a model to weight or measure economic, environmental and energetic costs in refurbishing a façade of building, with verifiable and comparable results as a first approach to get the best model to a global evaluation in building sector. To get this model, the author study eight different refurbishment proposals for a chosen façade of building setting two different types of actions. This model is based on life cycle analysis and shows quantitative and comparables results expressed in graphics to get a better understanding.*

*sustainability, environmental impact, environmental evaluation, economic cost, energy*

- ◊ Se propone un modelo de análisis simplificado de costes económicos y ambientales para la rehabilitación de fachadas.
- ◊ En una rehabilitación, deben tenerse en cuenta criterios ambientales y económicos.
- ◊ Las futuras líneas de investigación deben ir encaminadas a lograr un modelo de evaluación global del conjunto de la edificación.

**El cambio climático es ya una realidad y la sostenibilidad se ha convertido en una prioridad a nivel mundial. Dicha sostenibilidad, aplicada al sector de la construcción, significa no solo lo relativo a la nueva construcción sino también en lo referente a la reforma de la edificación existente. La reducción en la emisión de gases de efecto invernadero pasa necesariamente por la mejora de las características ambientales y energéticas de los edificios existentes. En este sentido se hace necesario el uso de energías renovables así como una mejora de la edificación existente para que sea sostenible. Son muchos los aspectos que tienen un impacto directo en la sostenibilidad a la hora de acometer una actuación de rehabilitación, ambientales, sociales y económicos. Este trabajo propone un modelo que mida los costes económicos y medioambientales a la hora de reformar la fachada de un edificio, aportando unos resultados comparables y verificables, como una primera aproximación para conseguir el mejor modelo de evaluación global del edificio. Para conseguir este modelo de análisis, el trabajo se apoyo en el estudio de 8 propuestas de mejora de fachada de un edificio estableciendo dos tipos de acciones. Este modelo se basa en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y muestra resultados cuantitativos y comparables expresados en gráficos para una mejor comprensión.**

*sostenibilidad, impactos ambientales, evaluación ambiental, energética, costes económicos/ambientales*

### 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el sector de la construcción según el Programa de Naciones Unidas "Sostenible Building and Climate Initiative (SBCI)", es el principal responsable de las

emisiones de gases de efecto invernadero, producidas principalmente por el consumo energético en la fase de vida útil del edificio, [1, 2].

El informe "Gro Harlem Brundtland" [3], define desarrollo sostenible como aquel que satisface nuestras necesidades

futuras para satisfacer las suyas.

En los años 90 se generalizó el consenso que el desarrollo sostenible debía basarse en tres pilares: ecológico, económico y social [1, 4].

En la intersección de los aspectos ambientales y económicos se encuentra el objetivo de la Unión Europea, lograr una economía circular que propone un nuevo modelo de sociedad que utiliza y optimiza los stocks y los flujos de materiales, energía y residuos y su objetivo es la eficiencia del uso de los recursos.

Los compromisos de la UE, van encaminados a la sostenibilidad en la edificación [5]. Puesto que en la actualidad el ACV es la referencia en el sector de la construcción para la evaluación ambiental de los edificios y además el ACV se ha establecido como futura norma europea de evaluación de la sostenibilidad (EN 15643-2) y en el ámbito ISO, el método indicado para la evaluación (ISO 21931-1:2010) del comportamiento ambiental de los edificios. Las estrategias para hacer que los edificios sean más sostenibles deberían basarse principalmente en el Enfoque del análisis del ciclo de vida. Los costes económicos necesarios para llevar a cabo la estrategia condicionarán la elección de la misma. Necesitamos un estudio global del edificio, ambiental, económico y energético para una estrategia sostenible.

Actualmente el parque de viviendas en España asciende a un total de 2, 5 millones de viviendas [6]. El 54% es anterior a 1981 [7], previos a la NBCE-79, construidos bajo normativas muy básicas o nulas en cuanto a limitaciones de consumo o aislamiento. Son muchos los autores que han resaltado la importancia de la rehabilitación para reducir el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> [8]. Cualquier mejora energética que se realice en obra nueva contribuirá a incrementar en mayor o menor medida las emisiones de gases invernadero y el consumo energético, pero no logrará en ningún caso reducir las emisiones ya existentes, por ello la rehabilitación es objetivo prioritario para mejorar el impacto ambiental y reducir el consumo ya existente de un parque de viviendas carente de calidad ambiental. [9]

En este contexto se enmarca la investigación que desarrolla el trabajo "Modelo de análisis comparativo de costes ambientales, económicos y energéticos de una fachada basado en el enfoque del Ciclo de Vida" [10]. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de evaluación ambiental, energética y económica bajo el enfoque del análisis del Ciclo de Vida (ACV) y el Coste del Ciclo de Vida (CCV) de ocho propuestas diferentes de dos tipos de fachada previamente seleccionadas. Por la envergadura del estudio se ha desarrollado en fachadas y analizando la etapa de "cuna a puerta" en el ámbito de la rehabilitación.

Para ello los resultados obtenidos se expresarán en una única unidad normalizada, euro (€)/m<sup>2</sup>. Haciendo posible la comparación de los costes ambientales y económicos, representando gráficamente estos resultados. La mejor actuación será aquella que tenga el menor impacto ambiental y menor coste de inversión.

El análisis se realizó a nivel de fachada esperando que en un futuro se pueda realizar este modelo para evaluar el edificio globalmente. Este análisis siguió la normativa europea (UNE-EN 15643-3, 2012; UNE-EN 15978, 2012), al tratarse de una actuación de rehabilitación. Se apoya en la herramienta multicriterio [11]. Se recogen tres imágenes de datos, resultados de impactos ambientales y comparativos de las diferentes propuestas seleccionadas en la figura 1.

OPCION A	CARACTERÍSTICAS				DESEMPEÑO	
	W/m2K	Kg	cm	€/año	Años	kg/km
TRANSMITANCIA						
PESO						
ESPESOR TOTAL						
CAPACIDAD CALORÍFICA (EXT. AISLAMI.)						
CAPACIDAD CALORÍFICA (INT. AISLAMI.)						
MANUTENIMIENTO						
DURABILIDAD						
RADIO						
MORTERO.DE.CEMENTO	0,73	0,25	3	0	275 MEDIO	50
PLACA.DE.GRANITO.2CM	2,8	12,62	2	0	0 MEDIO	50
PINTADO.SILICONA	0,056	0,4	1,5	0	0	0
FACHADA	3,586	13,27	6,5	0	275	0
BH.CT.62.5X25X36,5	3,9	350	36,5	0	0 BAJO	100
SOPORTE	3,9	350	36,5	0	0	25
EPS.E:93.T:31x10 <sup>-3</sup>	(31x10 <sup>-3</sup> -2	2,325	9,3	0	0	50
AISLAMIENTO	0	2,325	9,3	0	0	12,5
PLADUR	0,45	9,75	1,3	0	9750	0
RAIL48MM	0,88	1,875	0,4	0	1650	0
PINTADO.MATE	0,056	0,38	1E-05	0	0	0
PINTADO.MATE	0,056	0,38	1E-05	0	0	0
TRASADOSADO	1,442	12,385	1,7	0	11400	0
TOTAL SISTEMA	8,928	377,98	54	0	11675	0

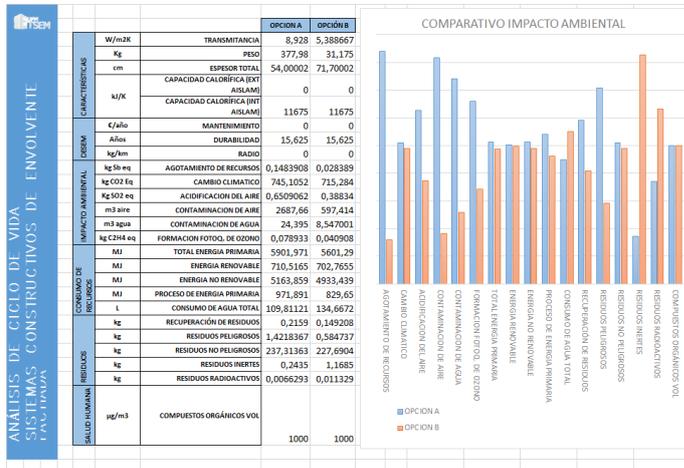
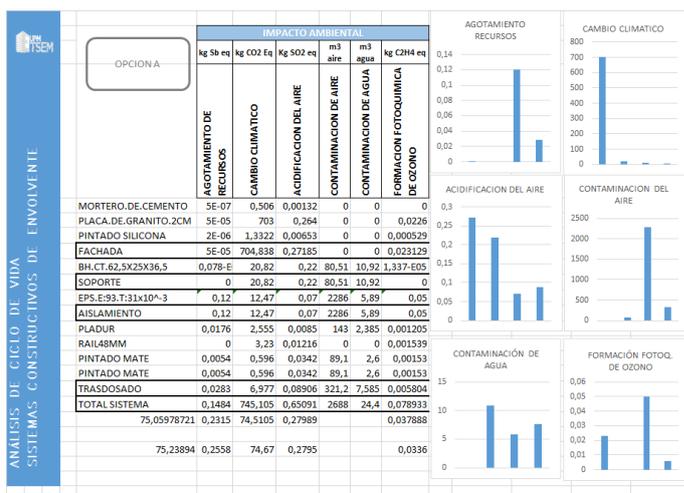


Figura 1: Herramienta Multicriterio [11]. a. Selección de elementos de la fachada. b. impactos generados en cada categoría. c. Comparativo de impacto ambiental.

El edificio objeto de estudio corresponde a una vivienda unifamiliar, pareada en una Urbanización de la zona Norte de la Comunidad de Madrid, en el municipio de San Agustín del Guadalix. La vivienda se desarrolla a partir de un semisótano, aprovechando el desnivel de la parcela, planta baja y planta primera, concretándose el programa como muestra la figura 2.

La cubierta es de teja de hormigón, con formación de pendientes con estructura metálica. El cerramiento exterior está formado por una hoja exterior de ladrillo cerámico enfoscado en su interior con un mortero hidrófugo, aislamiento de cámara de aire y tabique de ladrillo hueco.

La vivienda situada en Madrid según el CTE le corresponde las condiciones climáticas de zona climática D3 [12]. Un clima severo tanto en invierno como en verano. Madrid está situada a 667 m de altitud. Las temperaturas medias en invierno oscilan entre los 2,6°C y los 12°C, con una humedad relativa media en torno al 70%. En verano las temperaturas medias rondan los 24°C, con una media mensual de las temperaturas máximas de unos 30°C, mientras que la humedad relativa media desciende al 40%.

Las orientaciones este y oeste reciben mayor radiación durante los meses de verano, mientras que la orientación sur tiene sus picos en los meses de marzo y septiembre.

Se considero la fachada con cuatro capas: fachada, soporte, aislamiento y acabado en orden de exterior a interior.

Las propuestas de mejora que se aplicaron no modifican nunca la capa soporte, por lo que el impacto de esta capa es siempre un valor nulo, no se considera. Todas las propuestas planteadas de mejora serán modificadas sobre las capas fachada, aislamiento y acabado.

Las actuaciones en la capa de acabado consideradas en este estudio incluyen la demolición del trasdosado de LHD, los impactos ambientales de esta demolición no se han considerado bien al implementar el aislamiento o bien al reducir al suprimir este acabado. Si se han considerado los impactos y los costes de su nueva construcción.

Aparecen parámetros nuevos correspondientes a los Costes Ambientales y Costes Económicos. Los primeros directamente vinculados a los impactos ambientales.

Estos costes se incorporan en la herramienta, como categorías de Costes Ambientales y Costes Económicos. Así mismo se modifico la selección de propuestas ampliando la selección a ocho tipos al mismo tiempo cuyo resultado aporta una primera visión más global, pudiendo seleccionar posteriormente dos, tres o las propuestas que se seleccionen. Expresando gráficamente los resultados.

Las tipologías estudiadas son de dos tipos, Tipología T, corresponde a una fachada tradicional, por la situación del aislamiento. Se implemento el aislamiento que tenía el caso de estudio. Para poder comparar en igualdad de condiciones se ha empleado el mismo espesor de aislamiento 10 cm, en las cuatro actuaciones. El acabado exterior se realiza de con mortero de agarre, así mismo, el aislamiento empleado ha sido EPS de 10cm en la T1 y T3 y Lana de roca en la T2 y T4. Modificando el acabado interior, siendo la T1 y la T3 guarnecido y enlucido de yeso de 15 mm de espesor. Y en las T2 y T4 un acabado de yeso laminado pintado de 13mm de espesor.

La Tipología V, corresponde a fachada ventilada, por la situación del aislamiento. Se implemento el aislamiento que

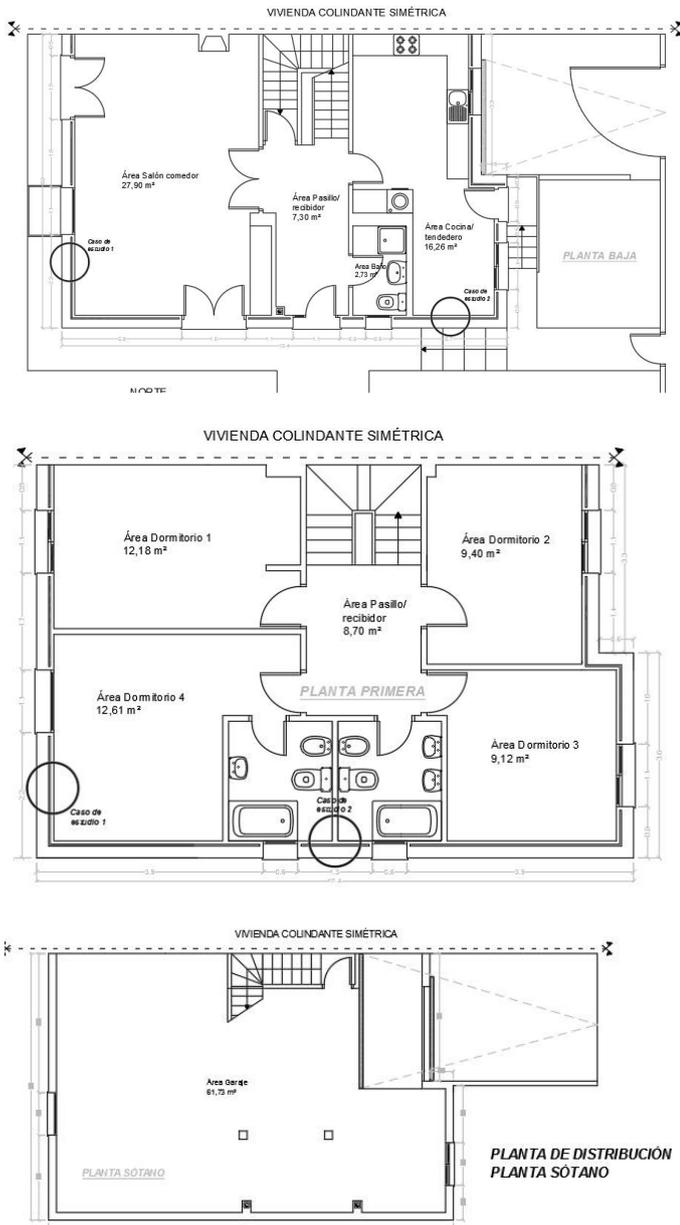


Figura 2: Planos de edificio modelo. Elaboración propia . a. Planta baja. b. Planta primera. c. Planta sótano

La memoria constructiva recoge que la estructura se resuelve mediante muros de hormigón en semisótano. El resto de la estructura portante es fundamentalmente mediante pilares y muros de carga de hormigón armado. Los forjados son muros de carga de hormigón armado. Los forjados son unidireccionales de canto total de 30 cm, constituido por semiviguetas pretensadas de hormigón armado y bovedillas de hormigón.

tenía el caso de estudio. Para poder comparar en igualdad de condiciones se ha empleado el mismo espesor de aislamiento 10 cm. El acabado exterior se realiza de manera mecánica y no con mortero de agarre y el aislamiento empleado ha sido EPS de 10 cm en la V1 y V3 y Lana de roca en la V2 y V4. Modificando el acabado interior, siendo la V1 y la V3 guarnecido y enlucido de yeso de 15 mm de espesor. Y en las V2 y V4 un acabado de yeso laminado pintado de 13 mm de espesor.

Hay que subrayar que al escoger esta tipología, V, se elimina de la capa de acabado el ladrillo hueco doble, que necesariamente repercute en la transmitancia, ya que se elimina un elemento y en apariencia la ganancia térmica no resultará tan grande como la que cabría esperar. En contra se produce una ganancia de superficie útil.

Las tipologías empleadas se muestran en la figura 3.

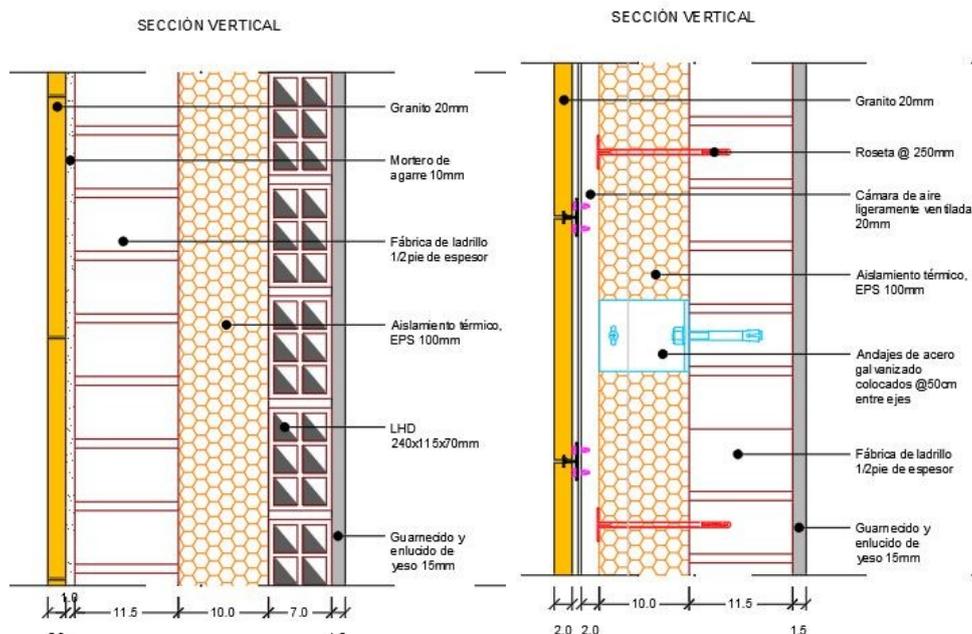


Figura 3: Sección de detalle de dos tipologías estudiadas. Elaboración propia.

## 2. EVALUACIÓN AMBIENTAL

El alcance considerado ha sido de “cuna a puerta”, comprendiendo los módulos A1-A5 según la UNE-EN 15978. No se incluyó el módulo A0 que recoge los costes previos al comienzo de las obras de rehabilitación, como pueden ser los costes del proyecto o las subvenciones, entre otros. Se contempló que en un futuro podría incorporarse a los resultados obtenidos sin menoscabo de la aportación obtenida en el análisis.

El equivalente funcional, que constituye la base para el análisis comparativo, se definió como "1 m<sup>2</sup> de fachada de una vivienda unifamiliar de uso residencial situada en Madrid.

En España, la vida útil de los edificios residenciales en 100 años [13]. Al rehabilitar un edificio, la vida útil considerada será menor de 100 años. Por ello se considero adecuada la selección de una vida útil de 50 años.

Los datos para la evaluación ambiental se obtuvieron de las Declaraciones Ambientales de Producto, DAP, buscando que toda la información fuera verificable y de libre acceso. Los valores se sumaron para cada sistema según las capas y pesos de cada producto. El criterio elegido fue el de la disponibilidad de datos. Por ello se tomaron de la francesa INNIES, ya que se trata de una base de datos general,

transparente y muy utilizada a nivel europeo [11].

La cuantificación de materiales involucrados en un metro cuadrado de fachada se calculo en base a la ratio de fachada por superficie útil de vivienda. En nuestro estudio esta ratio es 0.37.

La metodología empleada fue la de CML 2001, versión 4.1, [14].

Las categorías de impacto consideradas en el estudio fueron:

- ◆ Agotamiento de Recursos Abióticos (ADP), medido en cantidad de Sb equivalente por cantidad de recurso.
- ◆ Cambio climático (GWP), siendo la unidad que define esta categoría son los Kg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalentes por Kg de emisión.
- ◆ Acidificación (AP), que es el resultado de la emisión de contaminantes de carácter ácido, tales como compuestos orgánicos volátiles (COVs), expresado en kg etileno equivalente por kg de sustancia emitida.
- ◆ Demanda energética, cuyo resultado final se obtendrá en MJ equivalentes y estará desglosado según el tipo de fuente del que se haya obtenido dicha energía, energía no renovable (nuclear y combustibles fósiles) y energía renovable (biomasa, hidráulica, eólica, solar y geotérmica).

- Consumo de agua, este cálculo se ha realizado a partir de los inventarios de consumo de agua, incluidos en los indicadores de la base de datos "Ecoinvent". No se han incluido los consumos de agua de las plantas de GCT que no están directamente asociados al proceso productivo de componentes, se expresa en gr/Kwh generado; los residuos (kg); compuestos Orgánicos Volátiles VOC.
- Toxicidad Humana, siendo muy difícil agrupar todos los posibles efectos tóxicos en un solo impacto. Generalmente, se distingue entre toxicidad para las personas (HTP) y toxicidad para los ecosistemas tanto acuáticos (FAETP y MAETP) como terrestres (TETP), ya que las vías de exposición en uno y otro caso son muy diferentes. La perspectiva temporal que se ha analizado para cada una de estas tres categorías de impacto ha sido de 20 años.

Si bien la evaluación del comportamiento ambiental se divide en cinco etapas [15], en este estudio solo se emplearon las dos primeras ya que el objetivo es obtener un informe gráfico comparativo del impacto de las diferentes categorías de impacto seleccionadas.

## 2.1. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN AMBIENTAL

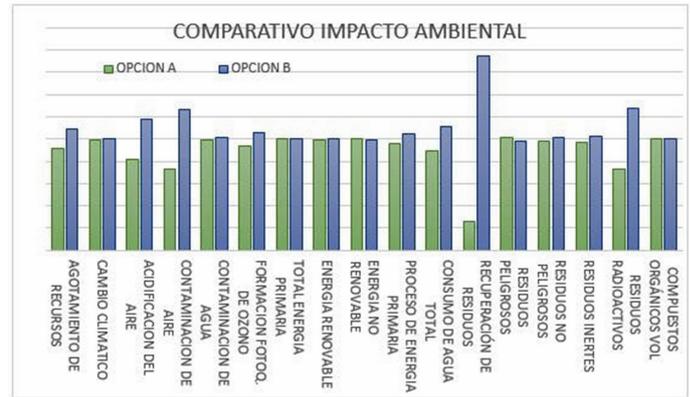
### 2.1.1. IMPACTOS AMBIENTALES

Los impactos ambientales de la misma tipología T1 al igual que la T3 que llevan aislamiento rígido EPS, frente a las T2 y T4 que llevan aislamiento semirrígido de lana mineral, se comprobó que las que llevan el tipo de aislamiento de lana de roca, tienen un mayor porcentaje de recuperación de residuos, pero son también las que más contaminan el aire y repercuten en mayor medida en la acidificación del agua, así como en la generación de residuos radioactivos. De manera análoga ocurre en la tipología V de propuestas.

Al comparar los impactos ambientales de las propuestas T con las propuestas V con el mismo tipo de aislamiento EPS. Es la tipología de propuesta de fachada ventilada, V, la que mayores impactos genera. Al repetir esta comparación cambiando el tipo de aislamiento de lana de roca los resultados son similares.

Los resultados muestran mayores impactos ambientales en las propuestas tipo V, siendo un poco mayores si cuando el aislamiento es lana roca y no EPS.

La evaluación ambiental a la vista de los resultados concluye que la fachada ventilada, V, es la que mayores impactos ambientales genera, según el gráfico de la figura 4.



OPCIÓN A = T1

OPCIÓN B = T2

Figura 4: Comparativo del Impacto ambiental con aislamiento EPS de la tipología T1 y de la tipología V1. Elaboración Propia

### 2.1.2. COSTES AMBIENTALES

Para la valoración monetaria se adoptaron los valores desarrollados en el método MMG2014 para los países de Europa Occidental que quedan recogidos en la tabla 1.

Su objeto consiste en expresar, en términos económicos, cómo se ve afectado el bienestar de las generaciones actuales y futuras por los impactos ambientales causados por las actividades o sistema objeto de estudio, en este caso, el sector de la edificación. Estos costes ambientales surgen cuando los costes y beneficios resultantes de las actividades sociales y económicas de un grupo de personas repercuten sobre otro, sin que el primer grupo tenga plenamente en cuenta dicha repercusión [16].

De cada uno de los indicadores ambientales obtenidos se obtuvo un factor de monetización, multiplicando cada uno por los valores recogidos en la anterior tabla. Al estar monetizados podemos sumarlos y obtenemos una única calificación global para cada tipo de fachada, arrojando unos valores de costes ambientales en euros y costes económicos en euros que facilitará la comparación y la toma de decisiones.

El factor de monetización nos indica el coste del daño al medioambiente y/o a los seres humanos para evitar el potencial de daño o compensarlos perjuicios causados [17].

### 2.2.1. RESULTADOS DE LOS COSTES AMBIENTALES

Los costes ambientales de las propuestas se compararon de igual forma primero por igual tipología y diferentes aislamientos y finalmente diferentes tipologías entre sí ofrecieron los resultados del gráfico de la figura 5.

Los resultados obtenidos no se correspondieron con los arrojados en los impactos ambientales ya que siendo menores

Indicador ambiental	Unidad	Central (€/unidad)	Inferior (€/unidad)	Superior (€/unidad)
ADP_non fossil	Kg Sb eq	1,56	0	6,23
ADP_fossil	MJ,valor calorífico neto	0	0	0
AP	Kg SO <sub>2</sub> eq	0,43	0,22	0,88
EP	Kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>2</sup> eq	20	6,6	60
GWP	Kg CO <sub>2</sub> eq	0,1	0,05	0,2
ODP	Kg CFC 11 eq	49,1	25	100
POCP	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0,48	0	6,6

Tabla 1 Valores desarrollados por el método MMG2014, para los países de Europa Occidental.

los impactos producidos por las propuestas de tipología T, al monetizar estos resultados son mayores los costes ambientales que producen esta tipología.

Siendo despreciable la diferencia por el tipo de aislamiento empleado. Analizando la tipología V de fachada se comprueba que los costes ambientales se incrementan

considerablemente guardando correlación al mayor impacto de esta tipología.

El coste ambiental es superior en la tipología V, al ser superiores los impactos ambientales que generan. Hay que destacar que uno de los resultados difiere de los demás y se atribuye a una imprecisión del modelo de análisis.

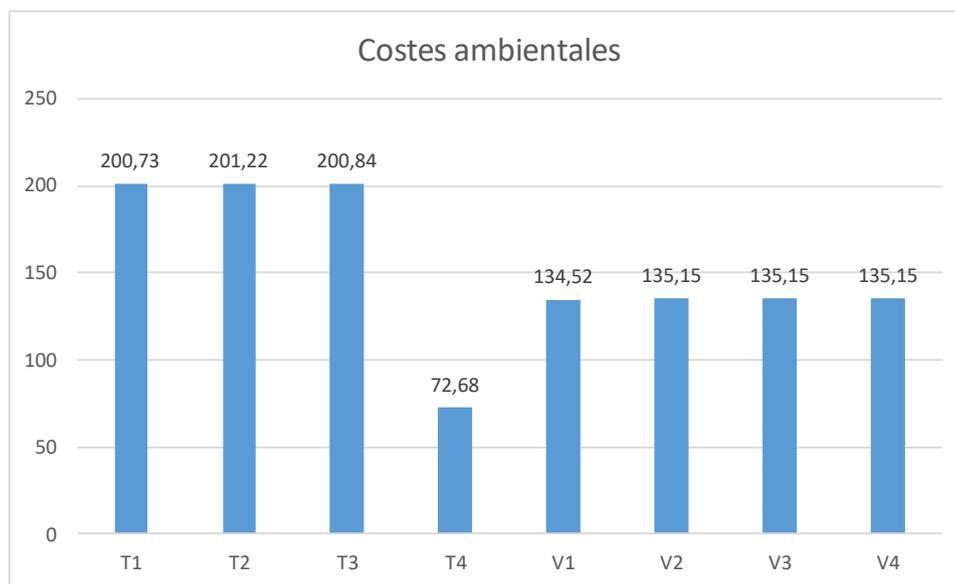


Figura 5: Comparativo de costes ambientales de las ocho propuestas de mejora de fachada en grupos por tipología T y V

### 3. EVALUACIÓN ENERGÉTICA

El procedimiento de cálculo empleado ha sido la herramienta simplificada de certificación Ce3X.V2.3. obteniendo unos balances de demanda energética y económicos, tanto del caso objeto de estudio como de las propuestas planteadas. Los resultados de ahorro en consume son los calculados por la herramienta informática Ce3X.V2.3 para cada una de las opciones seleccionadas.

La evaluación económica se realizará bajo el enfoque del CCV incluyendo el balance energético.

Al tomar como datos económicos los ahorros energéticos procesados por la herramienta certificadora la evaluación energética queda comprendida ya en el análisis CVV, por lo que se comparará el comportamiento ambiental y el económico al estar incluido el energético en este último.

En primer lugar, se estableció la transmitancia (UM) de la fachada de referencia a continuación se realizó el certificado energético del edificio en estudio. Considerando para ello datos conocidos de instalaciones y consumos energéticos obtenidos de las facturas del último año. Con los resultados obtenidos se realizó una verificación del cumplimiento de limitaciones de consume energético y de las transmitancias respecto al CTE.

A continuación se definieron las medidas de mejora en la envolvente del edificio en particular de la fachada que es la

parte del envolvente objeto de este estudio.

Los costes de las medidas de mejoras tienen unos costes que se obtuvieron de la Base de precios de CYPE. Se eligió esta base ya que aporta precios de mano de obra y mantenimiento decenal de los materiales necesarios para conocer la inversión realizada. Las diferentes propuestas dieron unos resultados de ahorro en consumo que se aplicaron para el cálculo de la recuperación de la inversión. Tomando para su cálculo el coste de interés del 1%.

Para el cálculo de las transmitancias se empleo el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE y de la herramienta Econdensa comprobando que no existía discrepancia de resultados, obteniéndose los resultados de la tabla 2. En función de la zona climática el CTE, fija para cada elemento de la envolvente unos valores de transmitancia que no se podrán superar, [18], en función de la zona climática así como unos requisitos mínimos.

Todo lo anterior marca los valores que debe cumplir el edificio del estudio, recogidos en la tabla 3.

---


$$UM = 0,60 \text{ W/M}^2\text{k (Transmitancia térmica máxima)}$$


---

$$UM_n = 0,66 \text{ W/M}^2\text{k (valor límite de ransmitancia térmica media)}$$


---

Tabla 3: Valores de transmitancias que debe cumplir el edificio de estudio conforme al CTE DB-HE

TRANSMITANCIAS	W/M <sup>2</sup> k
U resultante modelo de referencia	0,65
U resultante T1	0,33 < Modelo
U resultante T2	0,32 < Modelo
U resultante T3	0,36 < Modelo
U resultante T4	0,33 < Modelo
U resultante V1	0,38 < Modelo
U resultante V2	0,34 < Modelo
U resultante V3	0,37 < Modelo
U resultante V4	0,33 < Modelo

Tabla 2: Transmitancias resultantes utilizando el Catálogo de elementos constructivos del Código Técnico de la Edificación

### 3.1. RESULTADOS EVALUACIÓN ENERGÉTICA

Posteriormente se establecería el tipo y espesor de aislamiento necesario para que la transmitancia de la fachada cumpla con valore límites del DB-HE1 del CTE en la fachada cumpla con valore límites del DB-HE1 del CTE en la parte HE1 [18], que establece la demanda límite de calefacción y refrigeración que debe cumplir un edificio cuando se actúa en más del 25% de la envolvente. Este valor límite depende del uso y de la zona climática en la que esté ubicado y es el resultado de la ecuación 1.

$$Cep, lim = Cep, base + Fep, sup / S$$

Ecuación 1: Limitación de la demanda energética del edificio según CTE HE1

Donde:  $Cep, lim$  -es el valor límite del consumo energético de energía primaria no renovable para los servicios de calefacción, refrigeración y ACS, expresada en kW·h/m<sup>2</sup>·año, considerada la superficie útil de los espacios habitables;  $Cep, base$  -es el valor base del consumo energético de energía primaria no renovable, dependiente de la zona climática de invierno correspondiente a la ubicación del edificio, que toma los valores de la tabla 2.1 del CTE DHE0 Limitación del Consumo Energético ;cuantificación energética;  $Fep, sup / S$  -es el factor corrector por superficie del consumo energético de energía primaria no renovable, que toma los valores de la tabla 2.1 del CTE DHE0 Limitación del Consumo Energético; S - es la superficie útil de los espacios habitables del edificio, o la parte ampliada, en m<sup>2</sup>.

Así mismo el CTE DHE1 recoge la demanda de calefacción límite.  $Dcal, lim$ , cuyo valor es el resultante de la ecuación 2.

$$Dcal, lim = Dcal, base + Fcal, sup / S$$

Ecuación 2: Demanda de calefacción límite, pag. 8, CTE DBH1

Estos valores para el edificio de estudio son los recogidos en la tabla 4:

$Dcal, lim = Dcal, base + Fcal, sup / S$	
$Dcal, lim$ para edificio de referencia según cte	26,43 kWh/m <sup>2</sup> año
Demanda de calefacción del edificio de referencia	114,4 kWh/m <sup>2</sup> año

Tabla 4: Demanda de Calefacción límite según CTE DB-HE y Demanda de Calefacción real del edificio objeto de estudio

Al realizar el certificado energético del edificio y de las actuaciones propuestas se obtuvieron los resultados de la tabla 5.

DEMANDA DE CALEFACCIÓN	W/M <sup>2</sup> k
Demanda de energía 1ª calefacción	0,65
Demanda de energía 1ª refrigeración	0,33 < Modelo
CONSUMO DE ENERGÍA 1ª	
Consumo de gas natural según facturas	0,36 < Modelo
Consumo de electricidad según facturas	0,33 < Modelo

Tabla 5: Valores de Demanda y Consumo real del edificio de referencia, obtenidos al realizar el certificado energético del edificio.

De ellos se desprende que el edificio estudiado siguiendo la limitación de consume de energía del DH0, en cuanto a demanda de calefacción límite supera la establecida por el CTE.

### 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA BAJO EL ENFOQUE DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA (CCV)

Se ha empleado la metodología del CCV, como método que permite análisis comparativos de costes que se lleva a cabo en un periodo especificado, teniendo en cuenta todos los factores económicos relevantes, tanto en términos de coste de inversión como costes operacionales futuros, conforme a la norma europea UNE-EN 16627 (2015), versión europea de la Norma ISO 15686-5, que recoge los principios de cálculo para la evaluación del comportamiento económico de edificios, adaptándolos a la evaluación de la sostenibilidad en el contexto europeo.

El método empleado para el cálculo de costes y gastos ha sido el Valor Actual Neto (VAN), técnica básica de evaluación de inversiones.

En cualquier actuación de rehabilitación energética que se realice, se van a lograr unos ahorros energéticos importantes durante la vida útil del edificio. Pero para tomar la decisión si esta actuación es rentable debe conocerse también la inversión inicial y conocer si los ahorros que la rehabilitación va a conseguir son mayores que la inversión que se realiza.

El VAN se calcula como indica la ecuación 3.

$$VAN(r, N) = -CR - \sum_{t=0}^N \frac{C_{MR} (1+i_m)^t + C_{MI} (1+i_i)^t}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^N \frac{SG (1+i_g)^t + S_E (1+i_e)^t}{(1+r)^t} - \frac{C_{EOLN}}{(1+r)^N}$$

Ecuación 3: Formula del Valor Actual Neto. VAN

El Van nos sirve para comparar el valor de la inversión de la medida de mejora con valor negativo y el flujo de ingresos obtenidos actualizados, teniendo en cuenta un tipo de interés o coste de oportunidad determinado. Estos datos se obtienen del INE, de donde también se puede obtener el incremento anual del coste de la energía. El valor de la suma total es positivo.

Para poder realizar el cálculo del VAN primeramente se definieron algunos parámetros y posteriormente se explico como computan y como son tratados en el programa Ce3X.

Se emplearán valores reales en vez de nominales. Siguiendo las recomendaciones de La Norma ISO 15686-5 (2008). Es decir, aquellos en los que no se tiene en cuenta la inflación.

- ♦ Tasa de descuento real (r): La norma europea (UNE-EN 16627, 2015) recomienda el uso de una tasa de descuento real del 3%, por lo que fue el valor considerador en la evaluación.
- ♦ Tipo de interés o Coste de oportunidad: Es la tasa de retorno, el precio del dinero, el cual se debe pagar/cobrar por tomarlo prestado/cederlo en préstamo en una situación determinada. Este valor es el que emplea el programa Ce3x para calcular los resultados de la inversión.

Índice de Precios de Consumo (IPC): Hay parámetros como son, el incremento del precio de la energía, los materiales de construcción y la mano de obra, llevan incorporado el valor del IPC, por lo que son valores nominales. Para obtener los valores reales, es necesario calcular el IPC y pagar/cobrar por tomarlo prestado/cederlo en préstamo restar su valor, resultado de la ecuación 4.

$$i_g = \frac{1 + I_g}{1 + IPC} - 1$$

Ecuación 4: Valor nominal del precio de los materiales, empleado para el cálculo

Si el resultado obtenido es positivo, la inversión se considera rentable.

Para facilitar la comprensión de la fórmula anterior a modo de ejemplo se va a simplificar en la ecuación 5.

El incremento medio es del 2,3%, por lo que se ha adoptado este valor, según los datos recogidos del Instituto Nacional de Estadística (INE). Incremento real del precio de los materiales de construcción y la mano de obra De acuerdo con los datos del INE, el incremento medio de los materiales de construcción es de 4.19% y el de la mano de obra es del 2,3 %.

- ♦ Evolución del precio de la energía

Los datos relativos al precio de la energía se han recogido de la base de datos de EUROSTAT (2015a, 2009a, 2015b, 2009b). Se ha seleccionado el precio para el

sector residencial, incluidos impuestos, pues lo que interesa en esta investigación es el coste para el usuario final. Se ha estudiado cómo ha sido dicho crecimiento en los últimos 10 años ya que no existen datos anteriores al 2003. El incremento medio de los últimos 10 años es del 5,95% para el gas natural y 7,62% para la Electricidad.

Los parámetros que recoge el programa de certificación:

- ♦ El Plazo de amortización simple o tiempo necesario en años para recuperar la inversión inicial determinado mediante el ahorro en energía conseguido mediante la implementación de las medidas de mejora sugeridas.
- ♦ El Valor Actual Neto -VAN- o rentabilidad obtenida actualizada al momento inicial y aplicando un descuento referido al riesgo asociado al proyecto o medida de mejora. Los parámetros económicos considerados, quedan recogidos en la tabla 6.

N (vida útil)	50 AÑOS
Consumo de gas natural según facturas	3%
Incremento anual del precio de energía	4,20%
Tipo de interés empleado CE3X	1%
Precio gas natural	0,07 €/KWh
Precio electricidad	0,18 €/KWh

Tabla 6: Parámetros económicos empleados en el cálculo

Si el resultado obtenido es positivo, la inversión se considera rentable.

Para facilitar la comprensión de la fórmula anterior a modo de ejemplo se va a simplificar en la ecuación 5.

$$VAN = C_0 + C_1/(1+r) + C_2/(1+r)^2 + \dots + C_n/(1+r)^n$$

Ecuación 5: Formula del Valor Actual Neto. VAN, simplificada

En nuestro caso, para analizar la inversión, la rehabilitación de una fachada, partimos con un valor Co correspondiente al coste de la ejecución, mano de obra, incremento de los precios de construcción y mantenimiento de la misma. Partimos de un valor negativo, ya que es un coste. A continuación, vamos sumando los beneficios de cada año de esa inversión, pero actualizados a día de hoy. Teniendo en cuenta que lo que dentro de unos años vale 30 euros, por ejemplo, hoy vale menos. Los beneficios anuales C1, C2, ... Cn se actualizan dividiendo su valor y teniendo en cuenta un interés -entre 0 y 1- r de actualización. Si aumento el valor del incremento anual del precio de la energía, el VAN aumenta en la pestaña de resultados, ya que aumentarán los ingresos obtenidos cada año debido al ahorro obtenido en consumo de energía. Si aumento el tipo de interés, el VAN se reduce. Si es demasiado alto, habrá un límite a partir del cual, el VAN será negativo.

Se ha considerado como datos válidos los que se obtienen del ahorro producido por las distintas propuestas estudiadas. Al

tratarse de un modelo que busca una aproximación que facilite la toma de decisiones.

Los resultados de las medidas de mejora realizadas en el certificado energético se recogen en la tabla 7.

PROPUESTAS	COSTE €/m <sup>2</sup>	AHORRO		RETORNO DE INVERSIÓN		
		Gas	Elect.	Gas 100%	Elect. 100%	Gas 50% Elect. 50%
T1	47,57	4,9	0,13	4	> 50 años	2
T2	56,01	15,7	0,12	4	> 50 años	3
T3	65,77	11,3	0,11	5	> 50 años	5
T4	71,22	12,4	0,11	6	> 50 años	6
V1	166,69	14,9	0,14	11	> 50 años	11
V2	172,45	15,7	0,12	11	> 50 años	11
V3	184,9	14,9	0,14	11	> 50 años	11
V4	190,64	15,7	0,12	11	> 50 años	10

Tabla 7: Valores de los ahorros en las propuestas de mejoras y del Van

Aumento del precio del Gas	0,017
Aumento del precio de la Electricidad	0,025
Tipo de interés	1%

Tabla 8: Valores empleados en los cálculos

Conocido el balance energético se calcula el coste de cada una de las medidas y el ahorro que cada una de ellas supone en el consumo. Para calcular el retorno de la inversión se ha tenido en cuenta el aumento del precio del gas y de la electricidad, así como el tipo de interés. El resumen de precios empleados en los cálculos se recogen en la tabla 8.

#### 4.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ECONÓMICO

Los resultados obtenidos son sobre el edificio global para obtener los ahorros que las propuestas generan hay que tener en cuenta que la ratio de fachada sobre la superficie útil del edificio es del 0.37.

Los costes de cada propuesta con sus ahorros, años de amortización y Van a 50 años son los descritos en la tabla 9.

PROPUESTAS	COSTE €/m <sup>2</sup>	AHORROS CONSUMO €/m <sup>2</sup> año	AÑOS AMORTIZACIÓN	VAN
T1	47,57	15,03	2,5	1,55
T2	56,01	15,85	4,5	1,8
T3	65,77	11,42	5,5	2,14
T4	71,22	12,52	5,5	2,3
V1	166,69	15,03	10,5	5,4
V2	172,45	16,09	10,5	5,6
V3	184,9	16,09	11	6,03
V4	190,64	16,09	11	6,22

Tabla 9: Resultados del certificado energético realizado con la herramienta Ce3X

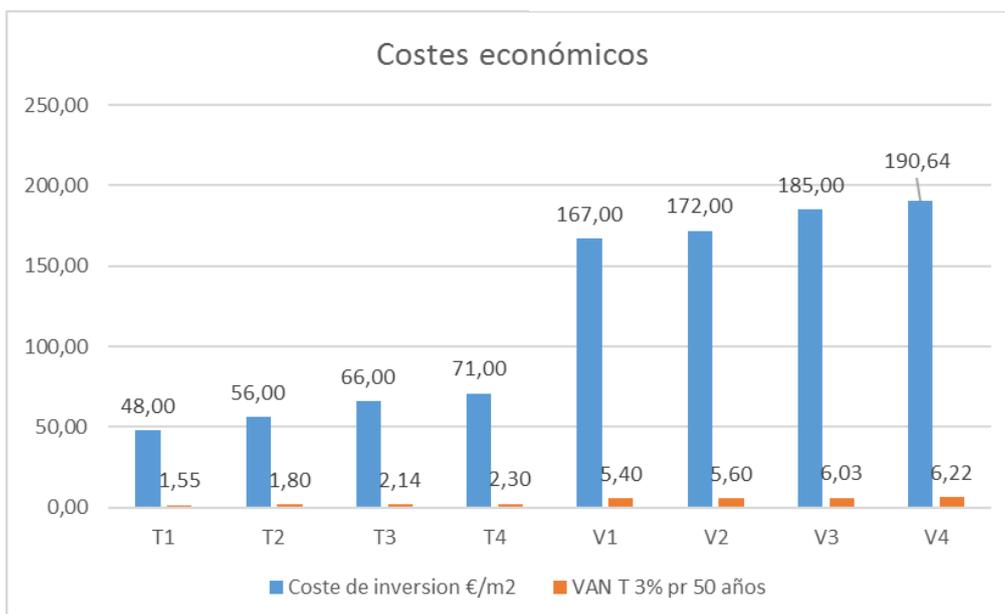


Figura 6: Comparativo de Costes económicos de las ocho propuestas

El análisis económico al comparar los costes económicos de todas las fachadas no presenta diferencias notables en los valores del Van que puedan dirigir la decisión por una u otra actuación. Los costes económicos resultantes se han recogido en el gráfico de la figura 6.

Corresponden mayores valores en aquellas que se ha tenido que realizar mayor inversión económica, las propuestas de tipología V, de fachada ventilada cuyo coste de inversión es superior al de la fachada tradicional. A la vista del análisis ambiental y costes económicos y ambientales la opción de fachada ventilada es la mejor opción en cuanto a resultado ambiental no en cuanto a resultado económico. Hay que considerar un factor de gran importancia en la fase de uso del edificio, el ahorro en el consumo y que con el que se completaría el análisis.

Los resultados obtenidos de las evaluaciones ambientales y económicas indican que en una primera aproximación la opción de rehabilitación más correcta de las propuestas T o V, sería la propuesta V. Pero si el que va acometer la fachada es un inversor particular, según el objetivo final, de ahorro en costes puede decantarse por la tipología T en perjuicio de la sostenibilidad, considerando que es una inversión amortizada en menos tiempo y que los ahorros no son tan importantes como para determinar un aumento de la inversión. Hay que subrayar que no se han tenido en cuenta otros factores como son la repercusión de los metros útiles que gana el edificio por el interior con las propuestas de tipología V, ganancia no despreciable. Tampoco se ha considerado el cambio de demanda que, a lo largo de la vida útil del edificio, 50 años necesariamente va a cambiar con la sustitución de instalaciones que han servido para el cálculo de los ahorros, ni se ha contemplado otros factores como el sujeto que realiza la inversión, privada o pública, en resumen, la intervención adecuada requiere de estudiar más factores que intervienen en la edificación y en su vida útil.

## 5. CONCLUSIONES

El modelo de análisis ha comparado los aspectos que se perseguían en este estudio, ambientales, con la evaluación singularizada de los aspectos energéticos, y económicos.

El objetivo principal de comparar los impactos ambientales y económicos de los tipos de fachada estudiadas en las etapas de la cuna a puerta, singularizándolo con una evaluación energética se ha llevado a cabo.

La evaluación ambiental de las propuestas se desprende:

- ◆ Los impactos ambientales son mayores en las propuestas de tipología de fachada ventilada, tipo V que las propuestas de fachada tradicional, tipo T. Con pequeñas variaciones según el aislamiento empleado siendo peores los resultados si se emplea lana de roca.
- ◆ Los costes ambientales generados por los impactos ambientales, sin embargo, difieren de los mismos. Al monetizar esos impactos, siguiendo la metodología MMG2014, se observa que el coste ambiental no se corresponde con los valores de impacto ambiental. Esto es

debido a que, a cada impacto, se le asigna un valor normalizado que pondera cada impacto ambiental según el coste económico que genera. Por lo que, la evaluación ambiental de un modelo de fachada queda incompleta sino se evalúan los costes ambientales generados.

- ◆ Aquellos impactos ambientales, que en los gráficos muestran mayor valor, no tienen tanto peso como el real y al monetizarlos el coste ambiental es muy inferior al de las propuestas de fachada tradicional, tipo T.
- ◆ En cuanto a la evaluación económica en las fachadas ventiladas tipo V, es mayor que la realizada en las de la tipología T y los ahorros energéticos que proporcionan las fachadas tipo V, siendo mayores que los obtenidos en la tipología T, no arrojan valores de Van significativos para que se justifique su empleo frente a la tipología T.
- ◆ Habría que añadir, la repercusión que supone la ganancia de metros cuadrados útiles, en el interior, que solo tiene lugar en las propuestas V y no se ha considerado en la evaluación. A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir, que es necesario incorporar la dimensión ambiental al análisis económico, ya que únicamente el resultado energético aportaría una conclusión sesgada del comportamiento de la fachada. Y por lo tanto confirma el supuesto de la necesidad de evaluar de forma completa el comportamiento de la fachada buscando la solución mas sostenible.
- ◆ El modelo de análisis estudiado consigue el objetivo de evaluar los tres aspectos de la fachada por lo que se muestra como un modelo válido.

Los resultados obtenidos confirman la necesidad de incorporar en la evaluación las dimensiones económicas y sociales. Siendo importante no desligar ningún aspecto para evaluar el comportamiento global en el edificio, aunque sea una actuación localizada en una zona del mismo como ocurre en este estudio.

## 6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Buscar la simplicidad a través de tantos parámetros es difícil, pero encontrar un modelo de análisis que sirva de aproximación puede ser el primer paso para el desarrollo de un modelo de evaluación global en la edificación. Si bien el modelo se ha demostrado válido se encontraron una serie de limitaciones, el empleo de la herramienta multicriterio, principalmente han sido el no poder acceder a datos fiables y representativos. Es importante señalar que la evaluación al nivel de producto no posibilita incorporar al análisis el enfoque funcional de forma adecuada, por lo que los resultados de esta evaluación, tal y como son expresados en las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP), representan básicamente la información modular que ha sido empleada para la evaluación. La comparación directa de productos, sin considerar de forma adecuada su contexto funcional, puede conducir a conclusiones erróneas. En cuanto al desarrollo de la herramienta imprecisiones del cálculo a la hora de calcular transmitancias, ha dificultado la sistematización de la

sistematización de la herramienta. Como línea de futuro sería más correcto incluir como valores característicos la conductividad del elemento. Igualmente, la aproximación numérica hace que los resultados obtenidos no sean exactos a los resultados de transmitancias calculados por el Catálogo de Elementos Constructivos y el econdensa. Errores que se arrastran al calificar energéticamente el edificio modelo en la herramienta Ce3X, y que hace que la precisión de los ahorros pueda variar.

Por otro lado, en las DAP no se han podido obtener valores de contaminación del agua y del aire en los mismos parámetros que se expresan en los índices de la metodología GGM2014, no pudiendo sumar sus valores a los costes ambientales. La normalización del empleo del método de CCV, en un futuro facilitará la incorporación de más datos a las ecoetiquetas que faciliten su empleo.

Los resultados obtenidos dejan constancia de que son más factores los que se deben tener en consideración al prescribir el tipo de actuación. Todas las propuestas analizadas tienen similares transmitancias, las pequeñas variaciones son debidas a la mayor o menor conductividad del aislante utilizado sin embargo el análisis energético realizado con la herramienta energética Ce3X da mayor peso a la inercia térmica por el interior y eso se traduce en mayor ahorro energético de la fachada tradicional. Sería conveniente cambiar la herramienta de certificación por otra que no tuviese estas limitaciones.

Al ser un modelo simplificado obvia la importancia del soleamiento no diferenciando la orientación de las fachadas y las pérdidas y ganancias que en estas se producen en los picos de verano e invierno al mismo tiempo el perfil de uso de cada edificio debe ser considerado en particular variando de manera considerable los resultados de consumo. Queda de manifiesto que, siendo estos aspectos analizados de gran relevancia, tener en cuenta una solo de ellos puede llevar a elegir la opción menos correcta. Es necesario que a la hora de analizar una edificación se haga de una forma global teniendo en cuenta todos aspectos posibles, ya sean sociológicos, medioambientales, económicos.

## 7. REFERENCIAS

- [1] B. Rivela Carballal, Propuesta Metodológica de aplicación sectorial de análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de la edificación en España.
- [2] «The Copenhagen Climate Change Conference raised climate,» de UNEP-SBCI, Key Messages and Priorities for COP 15, p.4., Copenhagen, 2009.
- [3] C. Brundtland, «Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo,» Oxford University, Press, 1987.
- [4] G. d. Vicentiis, La evolución del concepto de desarrollo sostenible, Proyecto de Investigación financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad DER 2010-18571 Régimen jurídico de los recursos naturales bajo la dirección del Profesor Dr. Roberto Galán Vioque. , 2012.
- [5] M. d. Fomento, España, 2014.
- [6] B. d. España, 2016.
- [7] I. N. d. Estadística, 2015.
- [8] O. Pombo Rodilla, Análisis Multicriterio de la Eficiencia de medidas de

Rehabilitación de viviendas mediante el enfoque del ciclo de vida. Propuesta Metodológica., Madrid, 2016.

[9] Johan Rockström; Will Steffen; Kevin Noone; Åsa Persson; F. Stuart III Chapin; Eric Lambin; Timothy M. Lenton; Marten Scheffer; Carl Folke; Hans Joachim Schellnhuber; Björn Nykvist; Cynthia A. de Wit; Terry Hughes; Sander van der Leeuw, «Límites planetarios: explorar el espacio operativo seguro para la humanidad Available: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>,» 2009. [Último acceso: 10 08 2016].

[10] N. García, Trabajo Fin de Máster :Modelo de análisis comparativo de costes ambientales, económicos y energéticos de una fachada basado en el enfoque del Análisis del Ciclo de Vida, Máster en Innovación Tecnológica en Edificación .Escuela Técnica Superior de Edificación, 2016.

[11] A. B. J. G. V. B. K. L. G. Clara Jiménez, Informe relativo a herramienta comparativo de impacto ambiental Máster Universitario de Innovación Tecnológica en Edificación Escuela Técnica Superior de Edificación Universidad Politécnica de Madrid, 2016.

[12] M. d. Fomento, CTE DB-HE, 2016.

[13] M. d. Economía, OREDEN ECO 805/2003, España, 2003.

[14] I. d. C. A. (CML), EN 154804:2012+a1:2013, Leiden, Países Bajos, 2012.

[15] Inhobe, Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto, País Vasco, 2009.

[16] European Commission, Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones de 8 de julio de 2008 - Estrategia para la aplicación de la internalización de los costes externos, 2008.

[17] Allcker, The need for a comprehensive and consistent approach in sustainability assessment of buildings - the EC Product Environmental Footprint., 2013.

[18] N. M. d. Vivienda, CTE DB-HE1.TABLA 13;ART.15.1.PARTE 1, ESPAÑA, 2016.

[19] P. I. D. C. Climático, «V Informe, cambio climático 2014, Impactos, adaptación y vulnerabilidad, RPP,» Christopher B. Field, Vicente R. Barros, SUIZA, 2014.

## WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at [bm.edificacion@upm.es](mailto:bm.edificacion@upm.es). Your contribution will be forwarded to the author(s) for a reply and, if considered appropriate by the editorial panel, will be published as a discussion in a future issue of the journal.