

## **ANALYSIS AND COMPARISON OF ENERGY SAVING MEASURES THROUGH MARGINAL ABATEMENT COST CURVES**

Fresco Contreras, Rafael

Universidad de Sevilla

In the European Union, almost half of the energy consumed belongs to the building sector. This, together with the commitment to achieve the Kyoto Protocol levels, in terms of energy consumption and emissions of greenhouse gases, has led to changes in the legislation of the sector, directing it towards attaining buildings of low energy cost.

In Spain, from 1st June 2013, it is required to make the energy performance certificate available to buyers and/or users every time buildings or units thereof are built, reformed, rehabilitated sold or rented. For existing buildings, the certificate will include a proposal of a series of measures to improve the energy rating, and the impact of each measure will be indicated.

The aim of this work is to study, in detail, the results obtained after implementing energy saving measures in existing buildings, through the creation of marginal abatement cost curves, showing the results in savings obtained in relation to the cost of implementing the measure.

**Keywords:** *Marginal abatement cost curves; Energy certification; Energy efficiency; Emissions*

## **ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE CURVAS DE COSTE MARGINAL**

En la Unión Europea, cerca de la mitad de la energía que se consume lo hace en sector de la edificación. Esto, unido al compromiso de alcanzar lo acordado en el Protocolo de Kioto, en cuanto a consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero, hacen que se estén produciendo cambios en la normativa reguladora del sector, orientándose el mismo hacia la consecución de edificios de bajo coste energético.

En España, desde el 1 de junio de 2013, es obligatorio poner a disposición de los compradores y/o usuarios el certificado de eficiencia energética cada vez que se construyan, reformen, rehabiliten, vendan o alquilen edificios o unidades de estos. En el caso de edificación existente, el certificado propondrá una serie de medidas destinadas a mejorar la calificación energética, indicando el impacto de cada una de ellas.

El objetivo del presente trabajo es estudiar pormenorizadamente los resultados obtenidos tras implementar las diferentes medidas de ahorro energético en edificación existente, a través de la creación de curvas marginales a largo plazo, mostrando los resultados de ahorro obtenidos en relación con el coste de aplicación de la medida.

**Palabras clave:** *Curvas de coste marginal; Certificación energética; Eficiencia energética; Emisiones*

Correspondencia: c/ Lázaro Rivas, 37. Villaverde del Río (Sevilla). C.P. 41318

## 1. Introducción

El conjunto edificatorio existente es el responsable de aproximadamente el 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de entre el 30 y 40% de la demanda energética del mundo industrializado (Erlandsson y Borg, 2003). Por ejemplo, en la Unión Europea, el 40% del consumo energético proviene del sector de la edificación (Unión Europea, 2010). Debido a esto, se han realizado investigaciones para intentar paliar el efecto del consumo energético de los edificios en el clima dado el gran potencial económico de ahorro energético y de reducción de emisiones existente en los mismos (Informe del Panel Internacional sobre el Cambio Climático [IPICCC], 2007).

A la hora de seleccionar las medidas para la rehabilitación energética de los edificios, es importante hacer un balance entre la inversión inicial y el coste de explotación que conlleva cada medida. Si sólo nos centramos en seleccionar aquellas medidas que minimicen los costes de explotación, será necesaria una gran inversión inicial (Jacob, 2006). Una forma de solucionar este problema es mediante el cálculo de los costes marginales a largo plazo de cada medida, los cuales pueden ser visualizados ordenadamente en una gráfica, facilitando así la elección del técnico (Banaitiene et al., 2008). Dichas gráficas se denominan curvas de coste marginal a largo plazo (CCMLP en adelante).

Desde la creación de la primera CCMLP (Universidad de Stanford, 1993), las CCMLP han jugado un papel importante en la lucha contra el cambio climático (Kesicki, 2013), debido a que permiten la presentación, de una manera muy simple, de los datos económicos asociados a la mitigación del cambio climático. Existen multitud de estudios donde se definen CCMLP, todas con el objeto de servir de herramientas en la toma de decisiones en las políticas contra el calentamiento global (McKinsey & Company, 2008) (Gobierno de Chile, 2009).

Las CCMLP las podemos clasificar en curvas basadas en modelos y curvas basadas en la valoración de expertos (Kesicki, 2010). Dado que nuestro estudio se basa en el sector residencial y en criterios de microeconomía, las curvas de coste marginal creadas serán del tipo basadas en expertos.

En función del objeto de la rehabilitación del edificio, los técnicos pueden buscar la mejor relación coste marginal-beneficio según diferentes parámetros: económicos, reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, reducción del consumo de energía primaria y/o reducción del consumo de energía final. Además, es de utilidad el conocer la clasificación de las medidas en función de su eficacia y no sólo cuál es la óptima (Wang et al., 2005). Junto a lo anterior, las curvas han de ser capaces de dar información de cada medida de rehabilitación energética, facilitando así su identificación (Junghans, 2013).

Con esta investigación se persigue definir un método de optimización capaz de clasificar las medidas de rehabilitación energética aplicables a edificios existentes en función del potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y/o consumos primario y/o final. Tomando como punto de partida una metodología diseñada para su aplicación a nivel estatal en España (Economics for Energy, 2011). Para el cálculo del impacto de cada una de las medidas consideradas se utiliza el software CE3X v1.1., Procedimiento Reconocido para la certificación energética de edificios existentes en España (Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía [IDAE], 2012).

En este campo de estudio, la optimización energética se define como el procedimiento para encontrar las medidas con mayor potencial económico de reducción de emisiones y/o consumo energético, en función de varias variables (Machairas et al., 2014).

El criterio utilizado para la evaluación de las diferentes medidas ha sido el coste del ciclo de vida de cada una de las mismas, incluyendo en el mismo los costes de implantación, consumo energético (en su caso) y mantenimiento.

## 2. Objetivo

El objetivo principal de la presente investigación es desarrollar una metodología de comparación de medidas de ahorro energético basada en el análisis a largo plazo.

## 3. Metodología

En el presente estudio se presenta una metodología para la creación de CCMLP basadas en el análisis del coste del ciclo de vida de las diferentes medidas de rehabilitación energética que podemos llevar a cabo en un edificio existente.

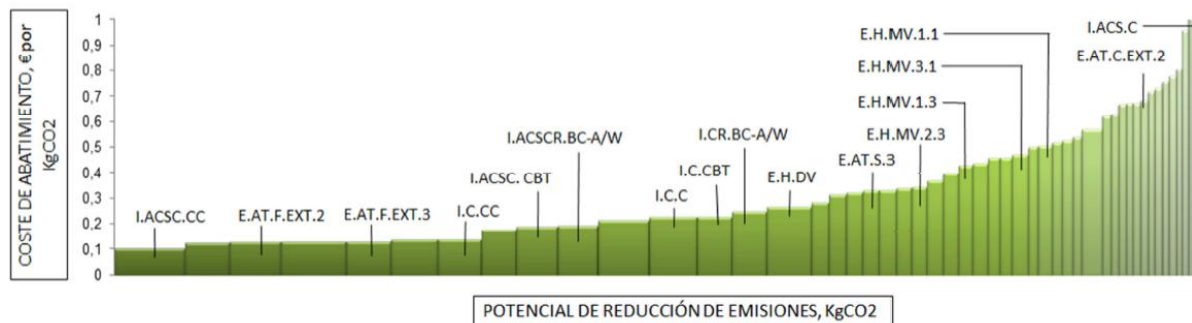
El desarrollo de la investigación se ha dividido según lo siguiente:

- Paso 1. Definición de la metodología de creación de CCMLP.
- Paso 2. Aplicación en casos reales.
- Paso 3. Análisis de resultados

### 3.1. Definición de la metodología de creación de CCMLP

La CCMLP se define como un gráfico que indica el coste de abatimiento, normalmente en \$ o € por KgCO<sub>2</sub> o KWh ahorrado, asociado con el potencial de reducción de emisiones o consumo energético (KgCO<sub>2</sub>/año o KWh/año) (Kesicki, 2011). Como ya se ha referido en el punto 1. Introducción, se utilizará la metodología de CCMLP del tipo basadas en expertos, las cuales, como muestra la figura 1, contrastan el coste marginal de reducción de cada medida en el eje Y frente al potencial de reducción de emisiones en el eje X.

Figura 1. Ejemplo de CCMLP basada en la valoración de expertos (expert-based)



Tradicionalmente, estos gráficos se han usado como herramientas de ayuda en la toma de decisiones en políticas medioambientales (Kuik et al., 2009). La innovación que comprende este trabajo es la adaptación del modelo para su aplicabilidad en edificios existentes de forma individualizada.

Para la definición numérica de las CCMLP, nos basaremos en la metodología desarrollada en el documento "Potencial económico de reducción de la demanda de energía en España" (Economics for Energy, 2011), en el cual se define la ecuación (1):

$$CMLP = C_{INV} * \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + Opex \quad (1)$$

Donde:

- C<sub>INV</sub>: la inversión inicial necesaria para la implantación de la medida de rehabilitación energética (€)

- $i$ : índice de inflación
- $n$ : número de años de vida útil
- $Opex$ : coste del ciclo de vida de la medida implantada. Incluye: costes de mantenimiento, operación y consumo energético.

El primer término de la ecuación (1) representa la inversión inicial necesaria para implantar una determinada tecnología, repartida alícuotamente entre los años de vida útil de esta.

Para la definición del coste del ciclo de vida, se desarrolla, como fruto de la investigación realizada, la siguiente ecuación (2):

$$Opex = \frac{(\alpha * \beta + \gamma) * \frac{(1+i)^n - 1}{i * (1+i)^n}}{n} \quad (2)$$

Donde:

- $\alpha$ : consumo energético anual de la nueva tecnología, en su caso (kWh/año)
- $\beta$ : coste de la energía utilizada (€/kWh para la energía eléctrica o en €/kg para la biomasa)
- $\gamma$ : porcentaje anual estimado de gasto derivado del mantenimiento
- $i$ : índice de inflación
- $n$ : número de años de vida útil

El sistema de cálculo se ha implementado en una herramienta basada en Microsoft Excel, en la cual se ha diseñado un sistema de entrada de datos que, automáticamente, nos posibilita la obtención de las CCMLP buscadas.

Los datos energéticos y de ahorro de emisiones y consumos de energía primaria y final han sido obtenidos a partir del uso del Procedimiento Reconocido para la certificación de la eficiencia energética de edificios existente CEX3 V1.1.

Por otro lado, paralelamente a la definición de la metodología de creación de CCMLP, se realizó una búsqueda exhaustiva sobre las posibles medidas de rehabilitación energética factibles de llevar a cabo en edificación existente. En total se enumeraron 48 medidas, comprendiendo medidas encargadas de reducir la demanda energética (medidas pasivas o de actuación sobre la envolvente térmica) y medidas orientadas a reducir el consumo energético (medidas activas o de actuación sobre las instalaciones térmicas). Las diferentes medidas han sido dotadas con un código propio con objeto de facilitar su identificación en las CCMLP.

**Tabla 1. Medidas pasivas de ahorro energético**

		Código
Adición de aislamiento térmico	En fachada por el exterior	E.AT.F.EXT.
	En fachada por el interior	E.AT.F.INT.
	En cubierta por la parte superior	E.AT.C.EXT.
	En cubierta por la parte inferior	E.AT.C.INT.
	En suelos por la parte superior	E.AT.S.

Modificación de huecos	Sustitución de vidrios	E.H.V.
	Sustitución de marcos y vidrios.	E.H.MV
	Mejora de estanqueidad.	E.H.E
	Doble ventana	E.H.DV.
	Disposición de elementos de protección solar (toldos)	E.H.PS.

Para cada una de las medidas de adición de aislamiento térmico enumeradas en la tabla 1, se han simulado cuatro tipos de aislantes térmicos con diferentes valores de conductividad térmica y espesor igual a 3 cm. En la tabla 2 se muestra una clasificación de ejemplo, la cual se repite para los casos restantes. Los materiales aislantes utilizados son:

- EPS: poliestireno expandido
- MW: lana mineral
- PUR+CO<sub>2</sub>: poliuretano proyectado con CO<sub>2</sub> en celdas cerradas
- XPS+CO<sub>2</sub>: poliestireno extruido con CO<sub>2</sub> en celdas cerradas

**Tabla 2. Subcategorías de medidas pasivas: Adición de aislamiento térmico en cubiertas por el exterior**

	Material	Conductividad térmica (W/mK)	Código
Adición de aislamiento térmico en fachada por el exterior	EPS	0,037	E.AT.C.EXT.1
	MW	0,031	E.AT.C.EXT.2
	XPS+CO <sub>2</sub>	0,038	E.AT.C.EXT.3
	PUR+CO <sub>2</sub>	0,035	E.AT.C.EXT.3

Para las modificaciones de huecos se tendrán en cuenta varios materiales. Por un lado se contemplarán vidrios dobles, bajo emisivos y de control solar, mientras que para los marcos, se atenderá a marcos metálicos con rotura de puente térmico, marcos de PVC y marcos de madera.

**Tabla 3. Subcategorías de medidas pasivas: Modificación de huecos: sustitución de vidrios y sustitución de marcos y vidrios**

	<b>Material</b>	<b>Tipo vidrio / Tipo marco y vidrio</b>	<b>Código</b>	
Modificación de huecos		Vidrio doble	E.H.V.1	
		Vidrio doble bajo emisivo	E.H.V.2	
		Vidrio de control solar	E.H.V.3	
	Sustitución de marcos y vidrios		Marco met. con RPT + vidrio doble	E.H.MV.1.1
			Marco met. con RPT + vidrio bajo emisivo	E.H.MV.1.2
			Marco met. con RPT + vidrio de control solar	E.H.MV.1.3
			Marco PVC + vidrio doble	E.H.MV.2.1
			Marco PVC + vidrio bajo emisivo	E.H.MV.2.2
			Marco PVC + vidrio de control solar	E.H.MV.2.3
			Marco madera + vidrio doble	E.H.MV.3.1
			Marco madera + vidrio bajo emisivo	E.H.MV.3.2
			Marco madera + vidrio de control solar	E.H.MV.3.3
		Aumento de la estanqueidad al aire	E.H.E.	
	Doble ventana	E.H.DV.		
	Disposición de elementos de protección solar (toldos)	E.H.PS.		

**Tabla 4. Subcategorías de medidas pasivas; propiedades térmicas de vidrios**

<b>Tipología</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Transmitancia térmica (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Factor solar</b>
Vidrio doble	4 + 6 + 4	3,30	0,75
Vidrio doble bajo emisivo	4 + 6 + 4	2,70	0,70
Vidrio de control solar	4 + 6 + 4	2,40	0,30

**Tabla 5. Subcategorías de medidas pasivas; propiedades térmicas de marcos**

<b>Material</b>	<b>Transmitancia térmica (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Absortividad</b>
Metálico con rotura de puente térmico entre 4 y 12 mm	4,00	0,55
PVC de dos cámaras	2,20	0,55
Madera de densidad media alta	2,20	0,55

Las propiedades físicas de los materiales han sido tomadas del Catálogo de Elementos Constructivos del Código Técnico de la Edificación (Gobierno de España, 2010). Por su parte, el coste de las medidas se calcula en base a lo especificado en el Banco de Costes de la Construcción de Andalucía (Junta de Andalucía, 2013).

Por otro lado, las medidas activas estuvieron orientadas a mejorar los procesos de producción de agua caliente sanitaria (ACS en adelante), calefacción y refrigeración.

**Tabla 6. Medidas activas de ahorro energético**

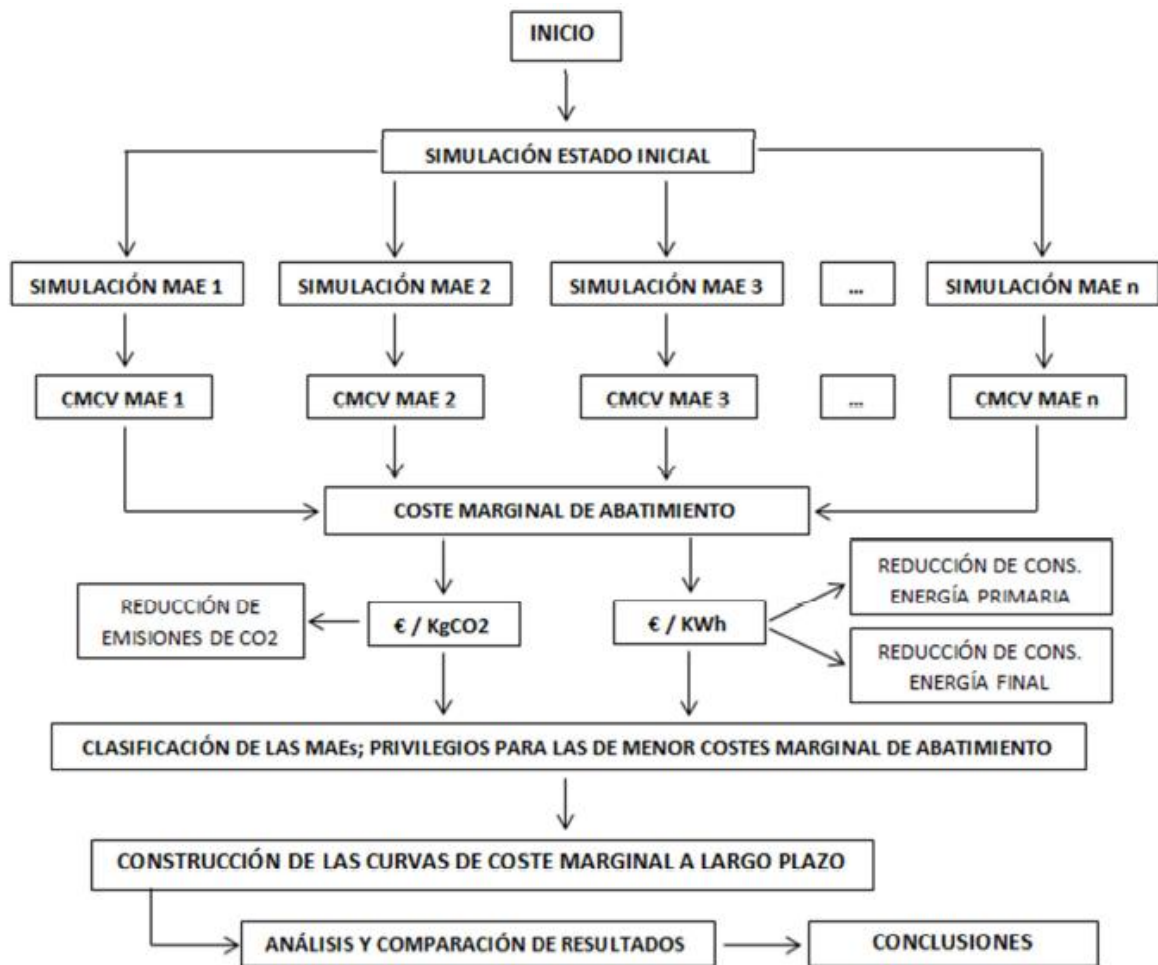
		<b>Código</b>	
ACS	Caldera convencional con acumulación	I.ACS.C.	
	Caldera convencional	I.C.C.	
Calefacción	Caldera de condensación	I.C.CC.	
	Caldera de baja temperatura	I.C.CBT	
ACS y calefacción	Caldera convencional	I.ACSC.C	
	Caldera de condensación	I.ACSC.CC	
	Caldera de baja temperatura	I.ACSC.CBT	
	Bomba de calor aire/agua	I.ACSC.BC-AW.	
Calefacción y refrigeración	Bomba de calor aire/aire	I.CR.BC-A/A	
	Bomba de calor aire/agua	I.CR.BC.A/W	
Calefacción, refrigeración y ACS	Bomba de calor aire/agua	I.ACSCR.BC-A/W	
Contribuciones de energías renovables	ACS	Energía solar térmica + caldera convencional	I.ER.ACS.ST+C
		Caldera de biomasa	I.ER.ACS.BIO.
	ACS y calefacción	Energía solar térmica + caldera de condensación	I.ER.ACSC.ST+CC
		Caldera de biomasa	I.ER.ACSC.BIO

Tras el proceso de recopilación de medidas de rehabilitación energética, se reprodujeron un total de 96 simulaciones situaciones mejoradas, puesto que la metodología se aplicó a dos casos individuales.

### 3.2. Resumen de la metodología implementada

La figura 2 muestra, de forma esquematizada el proceso de cálculo y comparación desarrollado en el presente estudio.

Figura 2. Esquema de procedimiento de cálculo y comparación de MAEs



- MAE: medida de ahorro energético
- CMCV: coste marginal del ciclo de vida (€)

#### 4. Casos de estudio

Para comprobar los resultados obtenidos con el uso de la herramienta, se simularon dos edificaciones reales localizadas en distintos puntos de la provincia de Sevilla (Capital y Sierra Norte). Se trata, por un lado, de un edificio de viviendas plurifamiliar y, por otro, una vivienda unifamiliar entre medianeras. Se procedió a realizar una exhaustiva toma de datos de los edificios, con objeto de ajustar los resultados a la realidad.

El edificio de viviendas plurifamiliar consta tres plantas (baja más 2), estando la planta baja destinada a uso comercial y la primera y segunda a uso residencial, donde encontramos 4 viviendas individuales. La superficie útil total del edificio es de 371,0 m<sup>2</sup>. Consta de dos fachadas principales, de orientaciones este y sureste. Además posee dos patios interiores. En todas las fachadas encontramos huecos de ventanas y balcones, en un ratio aproximado del 20% con respecto a la superficie opaca. Los huecos están compuestos en su totalidad por marcos metálicos sin rotura de puente térmico y vidrios simples estándar (transmitancia térmica de marcos y vidrios: 5,70 W/m<sup>2</sup>K; factor solar del vidrio: 0,82). La transmitancia térmica es de 1,03 W/m<sup>2</sup>K para las fachadas, 1,86 W/m<sup>2</sup>K para las cubiertas y de 2,56 W/m<sup>2</sup>K para el forjado que separa planta baja de primera (al no estar en uso, el local se



considera como espacio no habitable). Cada una de las habitaciones de cada vivienda está dotada de un radiador eléctrico por acumulación, mientras que en las zonas de salón-comedor encontramos un equipo por expansión directa bomba de calor con rendimientos medios estacionales de 200% en calefacción y 150% en refrigeración. Cada vivienda está dotada de un calentador para ACS a butano, con un rendimiento de combustión del 85%.

La vivienda unifamiliar consta de 2 plantas (baja más 1), estando destinada en su totalidad a uso residencial. La superficie útil considerada en la simulación es 105,0 m<sup>2</sup>. Sus fachadas principales tienen orientación norte y suroeste, con superficies de 30,25 m<sup>2</sup> cada una. Encontramos huecos en cada una de las fachadas, con propiedades térmicas idénticas a las ya descritas para la vivienda plurifamiliar, y en un ratio medio del 22%. La transmitancia térmica es de 1,31 W/m<sup>2</sup>K para las fachadas y de 1,28 W/m<sup>2</sup>K para las cubiertas. En las dos habitaciones principales, junto con el comedor, encontramos un equipo por expansión directa bomba de calor con rendimientos medios estacionales de 201% en calefacción y 157% en refrigeración. También posee una caldera estándar para ACS por combustión de butano, con un rendimiento de combustión del 85%.

## 5. Resultados

Con el proceso de cálculo descrito se obtienen, por un lado 3 curvas de coste marginal a largo plazo para cada edificio simulado, similares a la que aparece en la figura 1, junto con una tabla en la que se indican las propiedades de cada una de las medidas de ahorro energético tenidas en cuenta. Cada una de las curvas marginales se referirá a ahorro energético primario, ahorro energético final y ahorro de emisiones CO<sub>2</sub>.

A continuación se adjunta, a modo de ejemplo, la tabla resumen obtenida para el edificio de viviendas plurifamiliar en el caso de la comparación por reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. En la misma, las MAEs aparecen clasificadas en función de su coste marginal de abatimiento (€/KgCO<sub>2</sub>), de menor a mayor.

**Tabla 7. Resultados MAEs en función del ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub>; vivienda plurifamiliar**

MAEs	Coste de abatimiento (€/kgCO <sub>2</sub> )	Potencial de ahorro en emisiones (kgCO <sub>2</sub> /año)	Potencial de ahorro económico (€/año)	Periodo de retorno (años)	¿Retorno en vida útil?
I.CR.BC-A/A	0,428	11112,840	1776,816	7,447	SI
I.ER.ACSC.ST+CC	0,432	12135,670	3130,434	10,836	SI
I.ER.ACSC.BIO	0,452	18079,100	2595,956	26,358	NO
E.AT.F.EXT.1	0,543	7602,070	1624,865	15,494	SI
E.AT.F.EXT.2	0,557	7740,290	1651,801	18,159	SI
I.ACSC.CC	0,571	8846,040	2287,667	9,868	SI
E.AT.F.EXT.3	0,597	7602,070	1621,697	21,610	SI
I.ACSC.C	0,599	7906,150	2221,086	7,939	SI
E.H.PS	0,726	5888,150	1255,685	9,251	SI
I.C.CC	0,748	7187,410	1536,135	12,539	SI
I.ACSCR.BC-A/W	0,803	8735,470	1777,638	24,800	NO
I.ACSC.CBT	0,825	6828,040	1746,534	14,283	SI
I.C.C	0,904	6026,370	1285,791	13,715	SI
I.CR.BC-A/W	0,947	7602,070	1028,950	37,697	NO
I.ACSC.BC-A/W	0,952	8188,400	1586,710	33,227	NO
I.C.CBT	0,966	5971,080	1274,700	17,170	SI

E.AT.S.2	1,310	2819,680	604,473	17,022	SI
E.AT.S.1	1,366	2709,100	578,329	17,418	SI
E.AT.S.4	1,382	2736,740	586,252	21,234	SI
E.AT.S.3	1,395	2681,460	574,367	19,414	SI
E.H.DV	1,443	2874,960	611,602	37,031	SI
E.H.MV.2.3	1,522	2736,740	582,290	38,922	SI
I.ER.ACS.ST+C	1,558	3096,120	1301,367	7,117	SI
E.H.MV.2.2	1,613	2626,170	562,484	43,252	SI
E.H.MV.2.1	1,690	2405,020	511,781	37,082	SI
I.ER.ACS.BIO	1,905	4063,650	1120,005	42,106	NO
E.H.MV.1.3	2,108	2128,580	453,948	64,942	NO
E.H.MV.3.3	2,147	2736,740	582,290	59,700	NO
E.AT.F.INT.2	2,202	1713,920	369,180	24,507	SI
E.H.MV.1.2	2,260	2018,000	431,766	72,134	NO
E.H.MV.3.2	2,274	2626,170	562,484	64,761	NO
E.AT.F.INT.4	2,341	1680,990	349,374	37,459	SI
E.H.MV.3.1	2,387	2405,020	511,781	60,723	NO
E.H.MV.1.1	2,442	1796,850	381,856	67,551	NO
E.AT.F.INT.3	2,444	1575,700	335,906	31,732	SI
E.H.V.3	2,611	1465,130	310,555	13,487	SI
E.AT.C.INT.2	2,842	1299,260	279,658	19,876	SI
E.H.V.2	2,925	1326,910	285,203	18,368	SI
E.AT.C.EXT.2	2,957	1299,260	279,658	34,279	SI
E.AT.C.INT.4	3,011	1243,970	263,813	25,553	SI
E.AT.C.INT.1	3,038	1216,330	257,475	20,537	SI
E.AT.C.INT.3	3,114	1188,690	254,307	21,288	SI
E.AT.C.EXT.1	3,161	1216,330	257,475	36,209	SI
E.AT.C.EXT.4	3,162	1243,970	263,813	44,798	SI
E.AT.C.EXT.3	3,294	1188,690	254,307	44,003	SI
E.H.V.1	3,602	1050,470	221,825	8,301	SI
E.AT.F.INT.1	3,762	1003,350	339,867	25,430	SI
I.ACS.C	10,357	497,590	212,468	11,622	SI

## 6. Conclusiones

Antes de proceder a la selección de las medidas óptimas en función del coste de abatimiento marginal, hay que comprobar que las mismas producen un reembolso de la inversión dentro de su período de vida útil. Si no es así, no se considerarán rentables.

En los dos casos considerados en el estudio, la mayoría de medidas más favorables son aquellas que comprenden la implementación de tecnologías que aporten energía procedente de fuentes renovables. A su vez se comprueba como en la mayoría de los casos coinciden las tres medidas óptimas para su ejecución, así como las tres más desfavorables, aunque rentables.

**Tabla 8. Resumen de resultados; vivienda plurifamiliar**

	<b>Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub></b>	<b>Reducción consumo energético primario</b>	<b>Reducción consumo energético final</b>
Medidas más favorables	I.CR.BC A/A	I.CR.BC A/A	I.ER.ACSC.BIO
	I.ER.ACSC.ST+CC	I.ER.ACSC.ST+CC	I.CR.BC A/A
	I.ER.ACSC.BIO	E.AT.F.EXT.1	I.ER.ACSC.ST+CC
Medidas más desfavorables	E.H.V.1	E.AT.C.EXT.3	E.AT.C.EXT.3
	E.AT.F.INT.1	E.H.V.1	E.H.V.1
	I.ACS.C	I.ACS.C	I.ACS.C

Cabe resaltar que la metodología utilizada no da preferencia a las medidas pasivas, sino a aquellas encargadas de sustituir las instalaciones térmicas existentes.

Las medidas relativas a la adición de aislamiento térmico por el exterior en fachadas están mejor clasificadas que las que lo hacen por el interior, dado que, aún su mayor coste de implantación, producen mayores beneficios debido a la mayor reducción de la demanda energética provocada por la eliminación de los puentes térmicos existentes en los cerramientos.

Como conclusión final, se considera que la metodología de creación de curvas de coste marginal a largo plazo podría ser válida como herramienta de selección de medidas de ahorro energético aplicables a edificación existente, aunque sería recomendable el realizar otras comparaciones de los resultados con otros instrumentos económicos, como, por ejemplo, el Valor Actual Neto, para cerciorarnos con mayor garantía de que los resultados obtenidos son óptimos.

### **Agradecimientos**

Deseo mostrar mi más sincero agradecimiento a los Doctores D. Juan José Moyano Campos y D. Fernando Rico Delgado por su colaboración (Universidad de Sevilla), como tutores de Trabajo Fin de Máster, en la elaboración de la presente investigación.

### **7. Referencias**

- Banaitiene, N., Banaitis, A., Kakalauskas, A., Kazimieras Zavadskas, E. (2008). Evaluating the Life Cycle of a Building: a multivariant and multiple criteria approach. *OMEGA The International Journal of Management Science* 36, 429 - 441.
- Directiva 2010/31/EU del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 18 de junio de 2010, núm. 153, pp. 13-35.
- Economics for Energy (2011). Potencial económico de reducción de la demanda de energía en España. Vigo, 108 p. Disponible en: [http://www.eforenergy.org/docpublicaciones/informes/Informe\\_2011.pdf](http://www.eforenergy.org/docpublicaciones/informes/Informe_2011.pdf)
- Energy Modeling Forum (1993). Global Climate Change: Impacts of Greenhouse Gas Control Strategies. Stanford University, Stanford.
- Erlandsson, M. Borg, M. (2003). Generic LCA-methodology applicable for building, construction and operation services - today practice and development needs. *Build and Environment*, 38 (7), 919 - 938.
- Gobierno de Chile (2009). Estimaciones de costo y potencial de abatimiento de emisiones de gases de efecto invernadero para diferentes escenarios futuros. Chile, 282 p.
- Informe del Panel Internacional sobre el Cambio Climático (B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer). Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

- Climate. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA, 2007.
- Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción (2010). Catálogo de elementos constructivos, Versión 6.3. Disponible en: [http://www.codigotecnico.org/web/galerias/archivos/CAT-EC-v06.3\\_marzo\\_10.pdf](http://www.codigotecnico.org/web/galerias/archivos/CAT-EC-v06.3_marzo_10.pdf)
- Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (2012). Manual de usuario de calificación energética de edificios existentes CE3X, Version 1.1. Disponible en: [http://www.mityc.es/aplicaciones/CE3X/Manual\\_usuario%20CE3X\\_05.pdf](http://www.mityc.es/aplicaciones/CE3X/Manual_usuario%20CE3X_05.pdf)
- Jacob, M. (2006). Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments: the case of the Swiss residential sector. *Energy Policy* 34, 172 - 187.
- Junghans, L. (2013). Sequential equi-marginal optimization method for ranking strategies for thermal building renovation. *Energy and Buildings* 65, 10 - 18.
- Junta de Andalucía (2013). Banco de costes de la construcción de Andalucía (BCCA) 2013. Banco de precios. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/portalweb/web/areas/vivienda/texto/b28c72fc-4818-11e2-804b-e3c3905d6ca6>
- Kesicki, F. (2010). Marginal Abatement Cost Curves for Policy Making - Model-derived versus Expert-based Curves. *33rd IAEE International Conference*, June 6th-9th 2010. Rio de Janeiro.
- Kesicki, F. (2012). Intertemporal issues and marginal abatement costs in the UK transport sector. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17, p. 418 - 426.
- Kesicki, F. (2013). What are the key drivers of MAC curves? A partial-equilibrium modeling approach for the UK. *Energy Policy* 58, 142 - 151.
- Kesicki, F., Strachan, N. (2011). Marginal abatement cost (MAC) curves: confronting theory and practice. *Environmental Science & Policy* 14, 1195 - 1204.
- Kuik, O., Brander, L., Tol, R. S. J. (2009). Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis. *Energy Policy* 37, 1395 - 1403.
- Machairas, V., Tsangrassoulis A., Axarli, K. (2014). Algorithms for optimization of buildings design: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, 101 - 112.
- McKinsey & Company (2008). An Australian Cost Curve for Greenhouse Gas Reduction. Sydney, 28 p.
- Wang W., Zmeureanu, R., Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment* 40, 1512 - 1525.