



Economic assessment of energy efficiency investments in dwellings

Evaluación económica de inversiones de eficiencia energética en viviendas

HÉCTOR HERNÁNDEZ

Universidad Central de Chile, Obras Civiles y Construcción, Santa Isabel 1186, 8330601, Santiago de Chile. E-mail: hhernandezl@ucentral.cl

- ◊ The literature in appraisal of dwelling energy efficient investments is investigated, founding two approaches and examples.
- ◊ Five cases from publications are tackled finding that the static approach is more frequent than the dynamic approach.
- ◊ Literature shows that dynamic approach should be preferred, but its use is scarce.

In order to improve the energy performance of buildings, the need to value economically investments of energy efficiency associated with the rehabilitation of dwellings arises. This point of view provides an useful tool for analysts who start in the economic appraisal of energy efficiency investments. The present research gives a conceptual framework for the economic assessment of these types of investments in dwellings. As a result, it is possible to identify two techniques in the appraisals of this nature: dynamic and static approaches. Both methods contrast the benefits (energy savings) with the costs of investments over time. However, they differentiate the opportunity and the moment when investment must be carried out given an uncertainty scenario. This conceptual precision allows the study of several publications where different alternatives in retrofitting houses were evaluated, confirming the considerations that must be taken into account when economic modelling is made: the type of approach to be used (dynamic or static) and; at the definition of the investment alternatives and scenarios, the aspects of time, irrevocability and uncertainty.

Dwelling efficiency energy; Energy efficiency investments; Energy retrofit; Economic appraisal

- ◊ Se ha investigado la literatura en la evaluación de las inversiones en eficiencia energética de viviendas, encontrando dos enfoques y ejemplos.
- ◊ Se han abordado cinco casos de publicaciones, observándose que el enfoque estático es más frecuente que el dinámico.
- ◊ La literatura muestra debe preferirse el enfoque dinámico, pero su uso es escaso.

En pro de la mejora del desempeño energético de los edificios, surge la necesidad de evaluar económicamente las inversiones de eficiencia energética asociadas a la rehabilitación de viviendas. Este punto de vista trata de ser una herramienta útil para analistas que se inicien en la evaluación económica de inversiones en eficiencia energética. La presente investigación muestra un marco conceptual de la evaluación económica de este tipo de inversiones en viviendas. Como resultado, es posible identificar dos enfoques presentes en los análisis económicos de esta naturaleza: el dinámico y el estático. Ambos métodos contrastan los beneficios (ahorros energéticos) con los costes de las inversiones en el tiempo. Sin embargo, diferencian la oportunidad y el momento en que la inversión debe realizarse dado un escenario de incertidumbre. Esta precisión conceptual permite estudiar varias publicaciones donde se evaluaron diferentes alternativas de reacondicionamiento en viviendas, confirmando las consideraciones que deben tenerse presentes en momento de realizar la modelación económica: el tipo de enfoque a usar (dinámico o estático) y, en la definición de las alternativas de inversión y escenarios, los aspectos de tiempo, irrevocabilidad e incertidumbre.

Eficiencia energética de la vivienda; Inversiones en eficiencia energética; Reacondicionamiento energético; Evaluación económica

1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles siguen siendo la forma dominante de energía que impulsa la expansión global, proporcionando alrededor del 60% de la energía adicional y representando casi el 80% del total de suministros de energía al 2035 [1]. Así los edificios, que representan aproximadamente el 40% del consumo mundial de energía, desempeñan un papel

importante en el mercado de la misma; siendo responsables de un tercio de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero GEI relacionados con la energía, y se cree que representan aproximadamente las tres cuartas partes de las emisiones mundiales de GEI [2].

Por otra parte, el calentamiento global ha afectado seriamente el desempeño y sustentabilidad de los edificios, especialmente en términos de consumo de energía; donde la

energía consumida y las emisiones de dióxido de carbono de los edificios se espera aumenten drásticamente durante la vida operacional de los mismos [3].

Esto abre desafíos significativos en el campo de la edificación, sobre todo durante la etapa de operación; ya que la fase principal del ciclo de vida de las edificaciones en términos de demanda energética y emisiones de dióxido de carbono al ambiente. Para un caso de estudio chileno, la energía calculada sobre un horizonte de 50 años en un análisis de ciclo de vida representó el 89% de la energía asociada al edificio [4].

Lo anterior justifica la necesidad de hacer a las viviendas más eficientes, evidenciando el potencial de las inversiones en eficiencia energética de las mismas, donde el reacondicionamiento térmico de las envolventes y la modernización de los sistemas de instalaciones no solo buscan mejorar las condiciones de confort habitacional, sino idealmente prescindir del uso de energía no renovable (edificios energía cero o edificio energía neta cero).

Este consumo energético, al igual que los ahorros derivados de las mejoras en eficiencia energética, es complejo de estimar debido a su dependencia de muchas variables; principalmente, de la severidad climática, de la intensidad en el uso y de las características propias de las viviendas (envolvente y sistemas de instalaciones).

Los ahorros en energía son el principal *input* en las evaluaciones económicas y su complejidad de estimación refleja la incertidumbre en los resultados esperados.

A modo de ejemplo, se puede citar la diferencia que presenta la estimación del consumo de energía para generar las condiciones de confort térmico en viviendas para España y para la UE, que se estima representan el 43% y 67% del total de energía consumida por la vivienda respectivamente [5].

Es claro que a mayor severidad climática y menor desempeño de la vivienda el consumo de energía aumenta, de ahí la importancia de reacondicionar las viviendas que no presentan una dotación de rendimiento energético (Energy Performance Endowment EPE) adecuado.

El EPE hace referencia a un amplio rango de atributos (tamaño, compacidad, etc.) y elementos (componentes, equipamiento, etc.) que tienen un impacto sobre el consumo de energía posterior en el edificio [6].

Por tanto, las inversiones en eficiencia energética buscan mejorar el EPE de las viviendas; cuyo valor de inversión, costo de capital, gastos operacionales, vida útil, ahorros energéticos, entre otras variables vinculadas a la mejora, son *inputs* a considerar en las evaluaciones económicas de eficiencia energética.

El nivel de inversión en EPE dependerá, entre otras cosas, de la magnitud de la rehabilitación, de la tecnología asociada, de la adaptabilidad de las mejoras a la vivienda y del momento en que se realiza la mejora. En este contexto, una variedad de métodos pueden usarse para evaluar la

viabilidad económica de las mejoras en una vivienda. El valor presente neto (Net Present Value NPV), la tasa interna de retorno (Overall Rate of Return ORR), relación de coste-beneficio (Benefit Cost Ratio BCR), el periodo de recuperación descontado (Discounted Payback Period DPP) o un simple periodo de recuperación (Simple Payback Period SPP) pueden ser usados para evaluar la factibilidad económica de medidas de mejora en las viviendas donde se ha identificado que el NPV es la técnica más usada [7].

Sin embargo, algunos estudios muestran que los resultados de las conclusiones basadas en estos métodos pueden ser erróneas y engañosas, principalmente por dos razones:

- ♦ primero, pocos estudios dedican suficiente atención a los beneficios no monetarios y a los costes relacionados con la calidad energética de los edificios y;
- ♦ la segunda razón es metodológica: cuando las inversiones abarcan un grado significativo de irrevocabilidad económica, hay que tener en cuenta este factor pues las inversiones en EPE son altamente irrevocables y pocos evaluadores están familiarizados con la irrevocabilidad y su análisis. Verbruggen et al. [6] establecen que una metodología adecuada - segunda razón - para la toma de mejores decisiones debe considerar tres esferas de análisis: el tiempo futuro, la incertidumbre y la irrevocabilidad bajo un enfoque dinámico para evitar respuestas erróneas en los análisis del NPV.

Consecuentemente, la presente publicación presenta los métodos de evaluación de inversiones en eficiencia energética útiles en los análisis económicos de propuestas que permitan mejorar el desempeño energético de viviendas con bajo nivel de EPE; esperando ser una herramienta útil para analistas que inicien en la evaluación económica de inversiones de eficiencia energética en viviendas.

Para esto se proponen los siguientes objetivos:

- a. Definir un marco referencial respecto a la evaluación económica de inversiones en eficiencia energética.
- b. Estudiar publicaciones recientes donde se evalúen inversiones privadas de eficiencia energética en edificaciones y seleccionar algunas convenientemente para su revisión y análisis.
- c. Concluir respecto a las metodologías usadas y a las consideraciones que se deben tener en cuenta al momento de evaluar inversiones de eficiencia energética en viviendas.

2. METODOLOGÍA

Se ha estudiado la bibliografía respecto a los métodos existentes para la evaluación económica de inversiones en eficiencia energética, que permite establecer un marco conceptual para la revisión de algunas publicaciones recientes donde se evalúan económicamente alternativas de inversión privada de eficiencia energética en edificaciones.

Las publicaciones se han recogido de importantes revistas del área de energía (Energy and Buildings, Applied Energy, entre

otras), para las cuales se han revisado las metodologías usadas y se han seleccionado algunas convenientemente para su análisis (dos donde se plantea claramente los métodos dinámico y estático en la evaluación de inversiones de eficiencia energética en viviendas y otras tres donde se evalúa la rehabilitación de la envolvente o cambios en los sistemas de instalaciones de las viviendas) con la finalidad de concluir sobre aspectos relevantes en la evaluación privada de inversiones de eficiencia energética en viviendas.

3. CONSIDERACIONES EN LAS EVALUACIONES DE INVERSIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

El tiempo futuro, la incertidumbre y la irrevocabilidad corresponden a una trilogía que, de acuerdo a Verbruggen et

al [6] y [8], siempre debe estar presente en la evaluación económica de inversiones de eficiencia energética en viviendas. Así, el dueño de hogar que desea invertir en una mejora de eficiencia energética está evaluando una decisión futura, donde por definición el futuro es incierto o desconocido. En esto evidencia el “tiempo futuro” y la “incertidumbre” vinculadas a la decisión de invertir en eficiencia energética. Sin embargo, el concepto de “irrevocabilidad” es algo más complejo de identificar y está asociado fuertemente a las características del atributo o de la inversión en eficiencia energética. La figura 1 muestra, a través de domos de complejidad, la relación entre lo que Verbruggen define como desconocimiento o duda (doubt), tiempo futuro (time) y la irrevocabilidad (irrevocability). A continuación se describe cada uno de ellos para una mejor comprensión de estos conceptos.

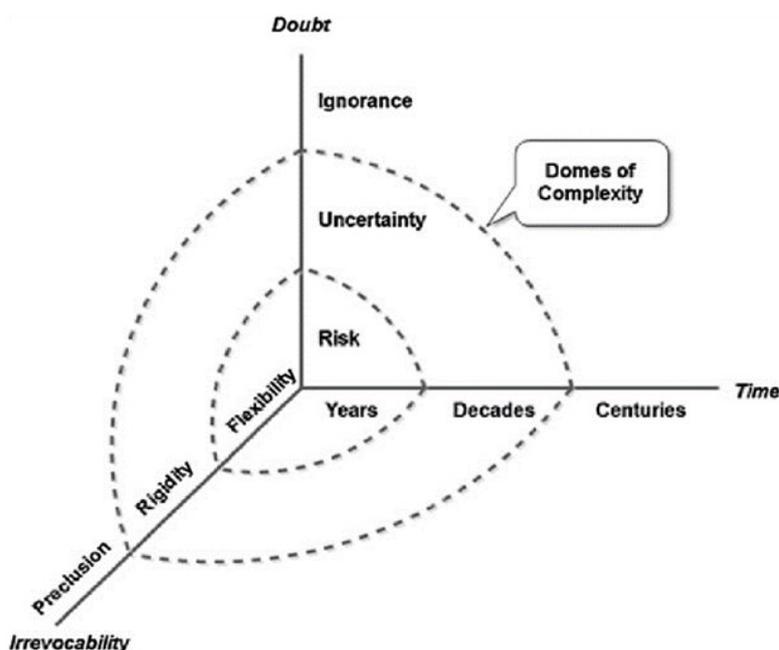


Figura 1: Tridimensionalidad para la contextualización de inversiones en eficiencia energética. Fuente: Verbruggen [8].

3.1. EL TIEMPO FUTURO

Cuando el dueño de hogar decide invertir en una mejora de eficiencia energética lo hace mirando hacia el futuro, pues no puede decidir sobre el pasado. Esta decisión, o las repercusiones de esta decisión, pueden tener impactos hoy, mañana o mucho más lejos en el tiempo. En el eje “Time” de la figura 1, se aprecia la graduación del futuro que define Verbruggen, la que va de años a siglos [8]. En este contexto, hay tres aspectos importantes a considerar en la inversión de eficiencia energética vinculadas al “tiempo futuro”, que son:

- El momento en que se realiza la inversión (hoy, mañana o un año más tarde, o mucho más allá).
- El horizonte de la inversión (vida útil de la inversión).
- El coste del capital, es decir, la tasa de descuento que es aplicada en las evaluaciones económicas de inversiones en eficiencia energética basadas en el NPV.

La ecuación (1) representa el NPV para una inversión de

eficiencia energética. Donde I_0 representa la inversión hoy de una alternativa A de eficiencia energética (o el Valor Presente de todos los Costes de dicha alternativa PVC_A); la cual debe ser compensada por el valor presente de todos los beneficios futuros que acarree dicha alternativa de inversión PVB_A descontados a una tasa d , para lograr en el límite de aceptación que el NPV sea igual a cero ($I_0 = PVB_A$). En esto se evidencia el poder de la tasa descuento d , que al ser positiva y significativa, mostrará valores pequeños para PVB_A en relación a la inversión cuanto más allá se perciban estos beneficios en el horizonte de análisis H . Esto debido al crecimiento exponencial del factor $(1+d)^n$, donde n es el momento del tiempo en que se evidencian los beneficios futuros B_n .

$$NPV = -I_0 + PVB_A; \quad \text{donde } PVB_A = \sum_{n=1}^H \frac{B_n}{(1+d)^n} \quad (1)$$

En este sentido, y sobre todo en inversiones de eficiencia energética cuyos beneficios se reflejan a mayor plazo, la tasa de descuento d es un parámetro significativo que puede hacer inviables las inversiones ($NPV < 0$) o que el periodo recuperación de la inversión (SPP) sea tardío. En la misma dirección, Weitzman [9] sugiere incorporar tasas de descuento decrecientes en cualquier metodología costo-beneficio para evaluar proyectos con impacto ambiental a largo plazo.

Así, propone una tasa "normal baja" real para los primeros 25 años entre 3-5%, una tasa de interés instantáneo de 2% para periodos entre 25 y 75 años y , una tasa de interés instantáneo de 1% para periodos entre 75 años a 300 [10].

3.2. EL DESCONOCIMIENTO O DUDA

Verbruggen establece que hay dudas (doubt) vinculadas al proceso de inversión en edificios, dudas vinculadas a nuestro desconocimiento sobre los eventos que pueden ocurrir y sobre la probabilidad de ocurrencia de estos eventos futuros; estableciendo una línea de duda - "doubt" que define tres grados de desconocimiento: el riesgo, la incertidumbre y la ignorancia (ver figura 1). En este proceso la mayoría del desconocimiento pertenece a la clase baja de riesgo. El riesgo puede ser estudiado y medido para identificar los eventos que pueden tener un impacto sobre el proyecto y su probabilidad de ocurrencia.

La incertidumbre proviene de cambios repentinos en los sistemas políticos, sociales, económicos y técnicos que afectan el proyecto del inversionista, eventos que pueden estudiarse pero con muy poca información acerca de sus probabilidades, por ejemplo cuando el cambio climático propende a cambios drásticos en los precios futuros de los combustibles fósiles y de la red de energización.

Por otro lado, la ignorancia es profundamente problemática, ya que no se pueden pronosticar los eventos futuros y , con mayor razón, tampoco sus probabilidades. Por ejemplo, la aparición de tecnologías futuras o impactos catastróficos provocados por el cambio climático o por accidentes nucleares [6] y [8]. Así, la línea de duda es graduada a partir del conocimiento que se tenga sobre eventos futuros, considerando la posibilidad de pronosticar el evento y su probabilidad (ver tabla 1).

<i>Depth of doubt</i>	<i>Events</i>	<i>Probabilities</i>
<i>Risk</i>	X	X
<i>Uncertainty</i>	X	?

Tabla 1: Niveles de profundidad de la duda: Riesgo, incertidumbre e ignorancia. Verbruggen et al. [6]

Consecuentemente, es esperable que las modelaciones o evaluaciones de las inversiones en eficiencia energética en general contengan aspectos de riesgo, menos frecuente aspectos de incertidumbre y difícilmente aspectos de ignorancia, aunque estos eventos afecten las decisiones o los resultados de inversiones en eficiencia.

3.3. LA IRREVOCABILIDAD

La irrevocabilidad es un atributo de cada decisión y como su definición revela es: "una asignación irrevocable de recursos" y presenta diferentes grados [8]. Verbruggen explora el concepto de la irreversibilidad en la economía y muestra que se requiere de una métrica viable para medir los grados de irrevocabilidad. Las métricas factibles se basan en los costes de reversión implícitos en un momento dado en el futuro para "deshacer" una decisión anterior. "Deshacer" se considera factible al aceptar la sustituibilidad de todos los tipos de bienes y valores.

Los edificios están hechos de elementos y materiales sustituibles (ventanas, muros, pavimentos, equipamiento, etc.) y deshacer una asignación de recursos pasada es técnicamente factible a un coste que puede ser estimado [6] y [8].

La figura 1 muestra los 3 grados de irrevocabilidad: flexibilidad (irrevocabilidad débil), rigidez (irrevocabilidad media) y preclusión (irrevocabilidad fuerte). En este último se imposibilitan los cambios o el deshacer un atributo en una vivienda dado los altos costes de reversión involucrados en la decisión.

La figura 2 muestra la distribución de los costes de reversión o costes de deshacer una decisión de inversión en una vivienda en el horizonte de tiempo para los tres grados de irrevocabilidad.

- ♦ Una irrevocabilidad fuerte (preclusión) es cuando los costes de inversión en el futuro permanecen por encima de los costes iniciales de referencia (el punto de referencia para clasificar la irrevocabilidad es el coste de inversión en el tiempo 0), pero decaen el tiempo.
- ♦ Una irrevocabilidad media (rigidez) es cuando el costo de deshacer es más alto que los costos iniciales en tiempo cero y durante algunos años, pero luego caen por debajo de los costos iniciales.
- ♦ Una irrevocabilidad débil (flexibilidad) es cuando la inversión podría deshacerse a un valor igual o menor que los costos iniciales.

El costo de reversión o deshacer no solo considera el costo de remoción o demolición de un elemento de la vivienda (cambio en la decisión original), sino también el costo de la inversión si este representa un costo hundido (no se puede revender o transar), el que decae en el tiempo debido a la depreciación de la inversión.

Como ejemplos, la construcción de un sistema geotérmico que requiera pasar tuberías por debajo de la vivienda que ya está construida presenta una irrevocabilidad fuerte (preclusión); el cambio de ventanas por unas de menor transmitancia térmica o el aislamiento de la techumbre en la vivienda presentan una irrevocabilidad media (rigidez) y ; el deshacerse de un equipo que no puede ser revendido pero que no genera costos de remoción en la vivienda representa una revocabilidad baja (flexibilidad).

Cuando no existe costo de remoción de un elemento (suponga también un equipo) y este puede ser reutilizando o vendido al

precio inicial pagado o a su valor residual durante su vida útil (valor depreciado), la decisión es totalmente revocable en todo momento y representa la abscisa en el gráfico de la figura 2.

Consecuentemente, si no es considerada la irrevocabilidad en las decisiones de construcción, las consecuencias en el futuro podrían establecer cambios prohibitivos en la vivienda debido al monto de recursos involucrados.

Verbruggen et al [6] establecen que las características de irrevocabilidad de las inversiones en eficiencia energética estimulan la generación inmediata de edificios muy eficientes (pasivos) en lugar de edificios estándares que obedecen a la construcción y que en su mayoría son aconsejados sobre la base metodológica convencional del NPV o análisis de costos en el ciclo de vida LCC (Life Cycle Cost).

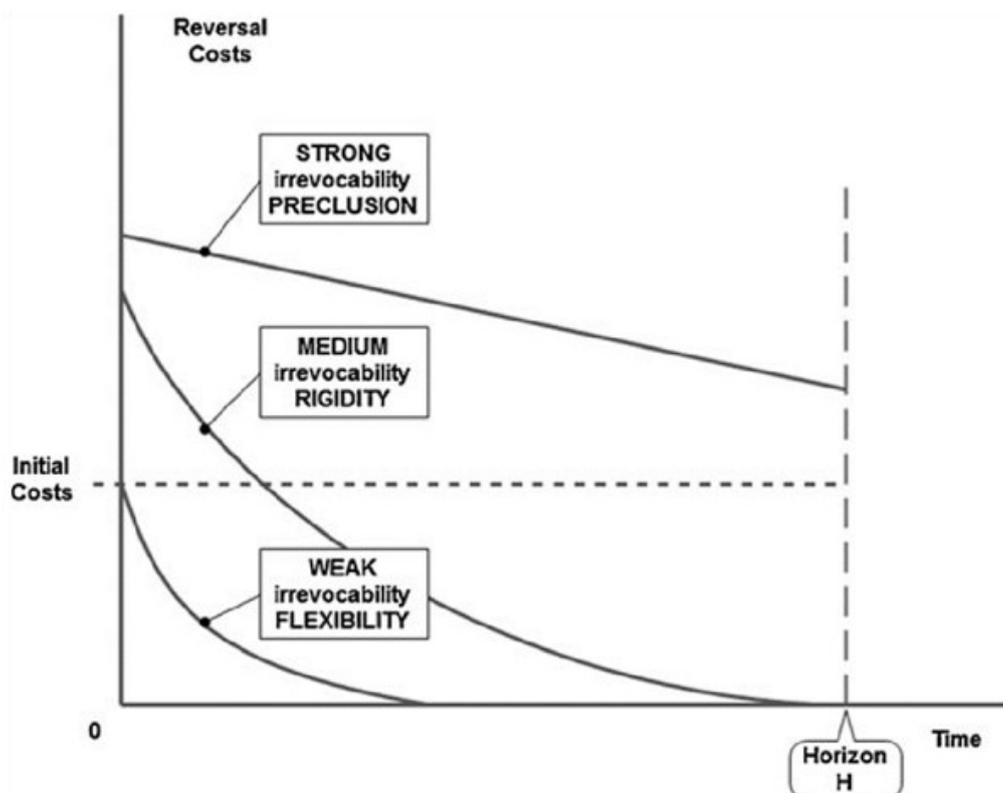


Figura 2: Costos de reversión sobre el tiempo como medida de irrevocabilidad. Fuente: Verbruggen [8].

4. VIVIENDAS CON BAJO EPE

Verbruggen et al [6] y [8] introducen el concepto de “Energy Performance Endowment” para una vivienda, poniendo énfasis en la palabra “Endowment” (Dotación o cualidad) y extendiendo el concepto asociado a “Energy Performance” de la Directiva de la UE.

EPE es la capacidad incorporada (compuesta por atributos, estructuras, instalaciones, equipos, etc.) de un edificio que en gran medida determinan el uso de energía entregada a la vivienda para cubrir las funciones deseadas por sus ocupantes. “Endowment” comprende, por ejemplo, la orientación, la compacidad, elementos de construcción pasiva, el aislamiento y la estanqueidad al aire, las celosías de sombreado, equipos de distribución de calor, sensores, medidores, etc.

Esta dotación o cualidad en los edificios permitirán minimizar el uso de los recursos o gestionar su uso (piense, por ejemplo, en la utilización de un medidor de consumo o en el cambio de orientación de las celosías de una ventana en invierno).

La palabra “Endowment” está estrechamente vinculada a la

inversión de eficiencia energética en una vivienda (incorporar un intercambiador de calor, mejorar el aislamiento en muros, incorporar un colector solar, modernizar ventanas, etc.) y, por tanto, puede presentar diferentes grados de irrevocabilidad conforme al apartado 3.3.

De este modo, y definiendo una clasificación para el EPE, será más sencillo identificar oportunidades de mejora en viviendas con pobre (bajo) o mediocre EPE y, contrariamente, más complejo en viviendas con excelente EPE. Ahora bien, es importante destacar que independiente del nivel de EPE que presente la vivienda, la irrevocabilidad de la mejora puede ser débil, media o fuerte.

Consecuentemente, una vivienda con bajo EPE presenta atributos (tamaño, compacidad, etc.) y elementos (componentes de envolvente, equipamiento, etc.) que exhiben un bajo o inadecuado impacto sobre el consumo energético posterior [6] y [8]. Así, una vivienda que exhibe pocas oportunidades de mejoras en eficiencia energética (edificios energía cero o edificio energía neta cero) y otra que presenta muchas oportunidades de mejoras podrían definir los límites en la graduación del EPE.

5. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE INVERSIONES DE EFICACIA ENERGÉTICA

El estudio bibliográfico muestra dos métodos usados en las evaluaciones de inversiones en eficiencia energética en viviendas. Uno denominado evaluación convencional o estática y otro denominado modelo secuencial de decisión o dinámico. Estos métodos se detallan a continuación.

5.1. EVALUACIÓN ESTÁTICA O CONVENCIONAL

La evaluación estática es aquella que sustenta la decisión de “invertir ahora o nunca” (escoger o perder) a partir de la metodología del NPV, que sumada a la generación de diferentes escenarios probables evalúa diferentes alternativas de inversión.

Así, el futuro es modelado por combinaciones de eventos y acciones, sea por ejemplo, la posible ocurrencia de k diferentes eventos (escenarios) S_i $\{i = 1, \dots, k\}$ y la disponibilidad de m diferentes alternativas de inversión en eficiencia energética A_j $\{j = 1, \dots, m\}$ para, por ejemplo, lograr reducir cierta cantidad de energía consumida por la vivienda al año en kWh/m² o las alternativas viables definidas por una restricción presupuestaria o de otro tipo.

De esta manera, se puede determinar el NPV (S_i, A_j) para todas las combinaciones $k \times m$ que pueden ser estimadas en una hoja de cálculo (ver tabla 2) o partir de un modelo probabilístico más sofisticado (Simulación Montecarlo), pues cada escenario tendrá una probabilidad de ocurrencia P_i [6]. En este sentido, dos criterios de decisión conservadores suelen usarse [6] y [11]:

1. Maximizando el mínimo NPV de los diferentes escenarios propuestos, haciendo que el mejor de los peores escenarios para cada alternativa sea decidido. Es decir, la decisión será A_j que maximice el mínimo NPV (S_i, A_j) para $i = \{1, \dots, k\}$ y $j = \{1, \dots, m\}$ (ver penúltima fila en tabla 2).
2. Maximizando el NPV esperado, donde las probabilidades se basan en una estimación conservadora resultante de una simulación. Se asume una distribución de probabilidad para las variables asociadas a la generación de los escenarios, por ejemplo, la variación del precio de la energía. Es decir, la decisión será A_j que maximice el mínimo NPV $\sum P_i * NPV(S_i, A_j)$ para $i = \{1, \dots, k\}$ y $j = \{1, \dots, m\}$ (ver última fila tabla 2).

Desde que el primer criterio excluye la información sobre las probabilidades vinculadas a los eventos, la regla recomendada es incluir la probabilidad evaluada y maximizar el VAN esperado por alternativa.

Verbruggen et al [6] establecen que esta metodología es un buen primer paso en la evaluación de la inversión, pero puede "dar respuestas muy equivocadas" cuando el análisis se detiene aquí.

Sus deficiencias consisten en suponer que el conjunto de escenarios futuros se compone de trayectorias iniciales que empiezan con la inversión (año 0) y terminan en el año H (principalmente con el desmantelamiento).

Esta suposición estática no refleja los procesos de la vida real que en realidad son secuenciales: las decisiones y los sucesos alternan con el tiempo [6], lo que da origen al enfoque dinámico.

Chance	Events	Alternative investments $A_j, \{j = 1, \dots, m\}$			
		A_1	A_2	...	A_m
P_1	S_1	NPV(S_1, A_1)	NPV(S_1, A_2)	...	NPV(S_1, A_m)
P_2	S_2	NPV(S_2, A_1)	NPV(S_2, A_2)	...	NPV(S_2, A_m)
...
P_k	S_k	NPV(S_k, A_1)	NPV(S_k, A_2)	...	NPV(S_k, A_m)
Decision rule					
A_j that maximizes minimum NPV		Minimum NPV(S_i, A_1) $i \{1, \dots, k\}$	Minimum NPV(S_i, A_2) $i \{1, \dots, k\}$...	Minimum NPV(S_i, A_m) $i \{1, \dots, k\}$
A_j that maximizes expected NPV		$\sum_i P_i \cdot NPV(S_i, A_1)$	$\sum_i P_i \cdot NPV(S_i, A_2)$...	$\sum_i P_i \cdot NPV(S_i, A_m)$

Tabla 2: Hoja de cálculo para la estimación del NPV (S_i, A_j) para todas las combinaciones $k \times m$. Verbruggen et al [6].

5.2. EVALUACIÓN DINÁMICA O SECUENCIAL DE DECISIÓN

El modelo secuencial de decisión o dinámico sustenta la decisión de “invertir ahora o invertir después” (esperar y aprender).

Este modelo es crítico para analizar inversiones que abarcan periodos largos (más allá de 30-40 años), pero también es apropiado y recomendado para analizar muchas inversiones de corto plazo [6].

La toma de decisiones secuencial considera nodos de decisión dicotómicos consecutivos en el proceso de toma de decisiones, así el carácter secuencial es modelado como un flujo alterno de evento-decisión, evento-decisión, y así sucesivamente;

donde la decisión en cada nodo será “invertir” o “no invertir” (esperar).

Este último con el objetivo de obtener mejor y mayor información mientras los recursos se mantienen a la espera o son usados para otros fines.

Así, el proceso puede ser representado como un árbol de decisiones probabilístico, donde el inversionista invierte (favorable para la alternativa A) con probabilidad $(1 - p_A)$ o espera (no favorable para la alternativa A) con probabilidad p_A , y donde las decisiones futuras están condicionadas a los eventos y decisiones anteriores.

La probabilidad p_A es determinada a partir de la frecuencia

de alcanzar un mayor NPV en el período siguiente ($t+1$) y es usada en calcular el valor presente neto esperado del periodo siguiente $E(NPV_{t+1})$. La ecuación (2) muestra esta situación, donde $NPV_{A,S,t}$ (Valor Presente Neto de la Alternativa A_j bajo el escenario S_i en el tiempo t) y $NPV_{A,S,t+1}$ (Valor Presente Neto de la Alternativa A_i bajo el escenario S_i en el tiempo $t+1$) resultan de una simulación Monte Carlo, siendo la diferencia el progreso de un periodo [11].

$$E(NPV_{A,S,t+1}) = NPV_{A,S,t} p_A \{NPV_{A,S,t+1} > NPV_{A,S,t}\} \quad (2)$$

La figura 1 muestra la estructura de la decisión secuencial, evidenciando la posibilidad de retrasar la inversión (alternativa A) periodo a periodo dependiendo del valor de $E(NPV_{A,S,t+1})$, es decir, el Valor Presente Neto Esperado para el periodo siguiente de la alternativa A_j dado el escenario S_i . Así la inversión ocurre en $t=0$ si el $E(NPV_{A,S,t+1})(1+d)^{-1} < NPV_{A,S,t}$

En caso contrario, el inversionista debe esperar un periodo mientras se gana información que disipe cierta incertidumbre para evaluar en $t=1$ si $E(NPV_{A,S,t+2})(1+d)^{-1} < NPV_{A,S,t+1}$ y decidir nuevamente si se invierte o espera, y así sucesivamente en el horizonte de análisis.

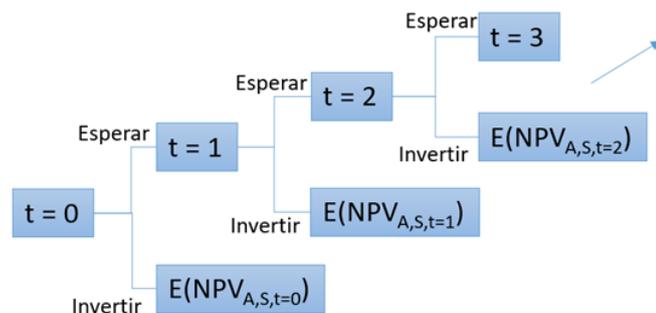


Figura 3: Estructura de evaluación secuencial de decisión. Fuente: Kumbaroglu y Madlener [11]

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conforme a la metodología propuesta, varias publicaciones vinculadas a la evaluación de eficiencia energética en viviendas fueron revisadas, de las cuales se pudo apreciar que la mayoría de las publicaciones utilizaban análisis estáticos y escasamente análisis secuenciales de decisión o dinámicos.

Por lo tanto, se mantiene el escenario definido por Verbruggen et al. [6], cuando plantean que aunque se consideran aspectos de riesgo e incertidumbre en la generación de escenarios sigue siendo escasa la evaluación de las inversiones de eficiencia energética bajo un modelo de simulación secuencial o dinámica.

La revisión bibliográfica permitió establecer criterios para el estudio y posterior análisis de las publicaciones seleccionadas.

Del total de publicaciones revisadas, cinco fueron seleccionadas, dos de ellas donde se abordan claramente las metodologías estática y dinámica en el reacondicionamiento de viviendas y otras tres investigaciones donde también se evalúan inversiones de reacondicionamiento en viviendas, ya sea vinculadas a minimizar la demanda (envolvente) o el consumo (sistemas de instalaciones) de energía, para reflejar los enfoques presentes en publicaciones recientes.

A continuación se listan estas publicaciones seleccionadas:

1. "Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings" (Kumbaroglu y Madlener, 2012).

En esta publicación ambos modelos se aplican en la evaluación de alternativas de decisión y que, según los autores, corresponde a la primera aplicación del enfoque dinámico en la evaluación de alternativas de inversión de eficiencia energética [11].

2. "Life Cycle Cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings" (Morrisey y Horne, 2010).

En esta publicación, a partir de la evaluación de alternativas de mejoramiento térmico, se detallada la metodología estática y se presentan hojas de cálculo en la estimación del NPV(S_i, A_i) conforme a la tabla 2 [12].

3. "Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings" (Ciulla et al. 2016).

Investigación reciente donde varias alternativas de revestimiento son analizadas en edificios de referencia [13].

4. "An Investigation Into the Cost Optimality of the Passive House Retrofit Standard for Irish Dwellings Using Life Cycle Cost Analysis" (Coyle, 2016).

Investigación reciente donde se analiza un edificio reacondicionado a partir de diferentes alternativas de inversión (en la envolvente y sistemas de la vivienda) que van desde no hacer nada hasta lograr un edificio pasivo [14].

5. "Techno-economic assessmet of solar assisted heat pump system retrofit in the Canadian Housing Stock" (Asae et al. 2017).

Investigación reciente donde se evidencia la fuerte irrevocabilidad que presenta la inversión de sistemas solares térmicos que imposibilitaron la elección ciertas viviendas para su implementación (requerimiento de superficie expuesta al sol) [15].

La tabla 3 muestra los hallazgos vinculados a los métodos de evaluación económica usados en las publicaciones.

Estos fueron tabulados conforme al tipo de edificio estudiado y las alternativas de mejora posibles en él (A_i), al método usado (estático o dinámico) y la definición de escenarios, a las consideraciones en la estimación de los flujos de caja para la determinación del indicador económico (NPV, LCC u otro) y, a otros aspectos misceláneos a destacar en la evaluación de las alternativas de inversión.

Referencia	Tipo de edificio e identificación de las alternativas de mejora	Método usado y definición de escenarios	Consideraciones en la definición de los flujos	Otros aspectos a destacar
1. Kumbargoglu y Madlener [11]	Rehabilitación de un edificio de administración pública, donde se analizan diferentes alternativas de inversión que consideran aislamiento de envolvente (mejorar muros, techo o ventanas) y/o diferentes alternativas para los sistemas de instalaciones.	Los enfoques estático y dinámico son contrastados a partir del NPV, donde los escenarios son modelados a partir de la estimación de cambios en el precio de la energía.	Diferencia costos y beneficios dependiendo se trate de un edificio para ser usado por el dueño o es arrendado. La tasa de interés usada es de 4,22% y se asume autofinanciación. Se considera un incremento de 11% en la renta dada la mejora. La trayectoria de los precios de la energía considera un horizonte de 16 años y la evaluación dinámica cuatro periodos $t=0, 2, 4$ y 6 años.	Se explican en detalle los métodos propuestos y se evidencian las diferencias. Se muestran rangos de valores para parámetros típicos en las evaluaciones económicas de inversiones de eficiencia energética. Se muestra que la alta volatilidad en el precio de la energía da valor a la decisión de "esperar" en el modelo dinámico.
2. Morrissey y Horne [12]	Contrasta los resultados promedios en la modelación de 100 viviendas para propuestas de desempeño térmico mejorado. Para esto definen 4 alternativas: base ($182\text{MJ}/\text{m}^2$), de eficiencia mejorada, de estándar internacional y de alta eficiencia; los cuales representan ahorros de 0%, 24%, 45% y 65% en la energía anual requerida para el acondicionamiento térmico conforme a la base de referencia.	Es usado el método estático a partir de del NPV. Establece que los costos son difíciles de estimar y generan cierta incertidumbre. Se definen dos escenarios en base a la tendencia en el precio de la energía (gas y electricidad). "altos" y "bajos" precios.	Considera el incremento marginal del valor residual de la vivienda en función de la eficiencia energética de la envolvente, medidas de ahorro energético y el costo del capital. El NPV es calculado en 4 horizontes de análisis: 5, 10, 25 y 40 años. Para 0-30 años se usó una tasa real de 3,5% y para 30-75 años de 3% (inflación 3,32%). Se considera una vida útil del edificio de 70 o más años.	Muestra parámetros interesantes en las viviendas estudiadas como son el área externa de muros, razón muro/piso, razón, ventana/muro, entre otros. Se muestra el proceso de estimación del NPV para el análisis estacionario de los escenarios propuestos.
3. Ciulla et al. [13]	Dos edificios (con diferente relación superficie expuesta al exterior/volumen) son modelados en cuatro zonas climáticas, en los cuales se aplican varias acciones de reacondicionamiento para la generación de 8 alternativas que contrastan los desempeños de los dos edificios de referencia.	Utiliza el enfoque estático, basado en el NPV, para determinar el periodo de recuperación de la inversión SPP. No hay aspectos de incertidumbre relevantes que se aborden. Se presenta un escenario más bien determinístico.	Son estimados los ahorros de energía a partir de la estimación de las demandas en calefacción y refrigeración en kWh/m^2 al año. Los costos del reacondicionamiento se establecen en moneda local, por lo que se aplica una tasa nominal que no queda explícita.	Las modelación de las alternativas por edificio y clima permiten, a partir del ahorro, priorizar las 8 alternativas de inversión en la vivienda para cada zona climática.
4. Coyle [14]	El caso de estudio corresponde a una vivienda, profundamente reacondicionada para producir una reducción del 90% en los costos operacionales del combustible, la demanda de energía primaria y las emisiones de CO_2 . Define 4 alternativas de análisis (base, base con nuevo sistema de instalación, base con mejora de envolvente y transformación hacia casa pasiva).	Es usado el método estacionario a partir del enfoque LCC. Se definen escenarios de sensibilización en los costos de construcción, inflación en combustibles, y variación en los ahorros energéticos operacionales, entre otros.	Considera el capital y los costos operacionales en el ciclo de vida, una tasa de interés real de 4% (tasa hipotecaria) para el horizonte de análisis de 30 años. Inflación de 2% y 4% para la tasa de crecimiento del precio de la energía. Y un valor residual de 40% de la inversión. Los costos de inversión y ahorros en energía son calculados por cada alternativa.	Muestra que el estándar de vivienda pasiva puede ser rentable para un propietario privado, con la combinación correcta de tasas de interés ($\leq 4\%$), inflación de combustible ($\geq 4\%$), períodos de inversión a largo plazo (≥ 30 años) y la inclusión de residuales valores.
5. Asae et al. [15]	Para casas elegibles por áreas geográficas, donde la inversión en eficiencia energética es viable técnicamente. Modelado con un sistema solar térmico SAHP (Solar Assisted Heat Pump System). Las alternativas quedan definidas para 10 áreas geográficas y para 4 tipos de combustible (electricidad, gas natural, petróleo y madera), por la determinación del consumo anual de energía en la vivienda no elegible, elegible y elegible con la mejora.	Presenta un enfoque estático basado en un periodo de recuperación de la inversión permitido que; para los ahorros en energía, una tasa de crecimiento en el precio de combustibles, entre otros, define el costo tolerable para la inversión en eficiencia energética (TCC). Se generan 3 escenarios para la tasa de crecimiento de la energía (bajo, medio y alto).	Considera el incremento en el precio de la energía, el ahorro en la energía dependiendo del tipo de energía, los costos operacionales del SAHP y la tasa de descuento sensibilizada en 3%, 6% y 9% con base a tasas bancarias. El periodo permitido para la recuperación de la inversión es de 6 y 10 años.	Muestra una metodología basa en el NPV, pero donde el costo de capital debe ser estimado para un periodo de recuperación permitido (Tolerable Capital Cost TCC).

Tabla 3: Hallazgos vinculados a los análisis económicos en las investigaciones analizadas. Elaboración propia a partir del estudio de 5 publicaciones.

De la revisión bibliográfica y del análisis de la tabla 3, se aprecia que las alternativas de evaluación se generan a partir de uno o más edificios de referencia, los que al incluir una o más inversiones de eficiencia energética definen las alternativas A_i para la evaluación económica.

No se evidencian restricciones en el número de alternativas; sin embargo, por razones de presentación y manejo de la información no sería recomendable un número elevado (piense en la presentación de la tabla 2 en el enfoque estático).

En las investigaciones seleccionadas, el número máximo de alternativas de inversión en eficiencia energética para las viviendas evaluadas fue 8.

En torno a la definición de los escenarios de análisis, la variación en el precio de la energía es el evento más recurrente. Evento que puede ser modelado determinística o estocásticamente, pero que presenta cierta dificultad en la definición su tendencia dado el número importante de modelos y variables asociadas a su predicción, no existiendo un consenso acerca de la mejor forma de captar la verdadera dinámica de los precios de la energía [11].

Se destaca la posibilidad de considerar el cambio climático como una variable de incertidumbre en la generación de escenarios [6], pues el desempeño de las alternativas de inversión en eficiencia energética varía conforme al clima según evidencia Ciulla et al. [13] en la priorización de las alternativas de inversión.

En relación a la definición de los métodos de análisis, escasos fueron los casos donde se apreciaron enfoques dinámicos, siendo predominante el enfoque estático.

Esto podría deberse a la complejidad en la estimación de la probabilidad p_A necesaria para la determinación del NPV esperado en la estructura de secuencial de decisión (figura 3). Sin embargo, Verbruggen et al. [6] presentan un caso de ilustrativo donde en la modelación de situaciones presentes y futuras de decisión se toman valores plausibles para aspectos de tiempo e incertidumbre.

Reflejando la posibilidad de prescindir de modelos complejos, donde la presentación de las diferentes combinaciones de alternativas inversión y escenarios posibles no dejan de ser una modelación, con sus respectivas limitaciones y ventajas, que deben quedar definidas y aceptadas por el evaluador en su metodología de trabajo.

En torno a la determinación del NPV ($Ec1$), en general los flujos positivos quedan definidos por los ahorros en energía, por los incrementos en el valor residual de la vivienda, por los incrementos en la renta de la vivienda si se supone su arriendo y, por los subsidios u otros beneficios análogos considerados por el analista.

Por otro lado, los flujos negativos quedan definidos por la inversión inicial (costos de construcción, costos de equipos y sistemas, costos de montaje u otros costos o gastos necesarios para la puesta en servicio de la mejora en la vivienda) y, por los costos de mantenimiento y operación.

En cuanto a la tasa de descuento estimada, esta decrece para

periodos más lejanos, siendo consecuente con lo planteado por Weitzman cuando sugiere incorporar tasas de descuento decrecientes en cualquier metodología costo-beneficio para evaluar proyectos con impacto ambiental a largo plazo [10].

Así, las tasas que se presentan en las evaluaciones económicas bordean el 4% para los primeros 25 o 30 años y luego decrecen en el horizonte de análisis.

Finalmente, son los horizontes de análisis los que presentan mayor dispersión, quedando supeditados a las características de las inversiones en eficiencia energética (vida útil, materialidad, otros) y la estimación de parámetros en la definición de los escenarios, por ejemplo, la proyección del precio de la energía.

7. CONCLUSIONES

Se logra precisar un marco referencial respecto a la evaluación económica de inversiones en eficiencia energética, con énfasis en el reacondicionamiento de viviendas; definiéndose dos enfoques presentes en los análisis económicos de esta naturaleza: el dinámico y el estático.

Esto permite estudiar publicaciones donde se evalúan diferentes alternativas de inversión, estableciéndose consideraciones que se deben tener en cuenta al momento de evaluar económicamente este tipo de inversiones.

Así, al momento de evaluar inversiones de eficiencia energética en viviendas se deben tener presentes el tipo de enfoque a usar (dinámico o estático) y, los aspectos de tiempo, irrevocabilidad e incertidumbre asociados a las alternativas y escenarios de modelación.

Ambos enfoques, dinámico o estático, toman de referencia indicadores económicos basados en la determinación del valor presente de flujos futuros que son contrastados con una inversión inicial (Por ejemplo, NPV o LCC).

Sin embargo, el enfoque estático supone decidir invertir ahora o nunca (escoger o perder) y el enfoque dinámico supone decidir invertir ahora o después ("esperar y aprender"), donde el "esperar" queda supeditado a escenarios de incertidumbre, por ejemplo, a la volatilidad en el precio de la energía.

Siendo poco frecuentes los análisis dinámicos en las evaluaciones de inversiones de eficiencia energética en viviendas, a pesar de su conveniencia y a que los análisis estáticos presenten aspectos de incertidumbre.

En las alternativas de inversión estudiadas se vio reflejada la trilogía definida por Verbruggen (aspectos de tiempo, incertidumbre e irrevocabilidad); ya que los horizontes de análisis (tiempo futuro) están vinculados a, por ejemplo, la vida útil de las diferentes alternativas de inversión; por otro lado, la incertidumbre queda definida por los escenarios modelados para evaluar las diferentes alternativas de inversión, generalmente definidos por la variación que experimentan los precios de energía en el tiempo y; por último, la irrevocabilidad está fuertemente relacionada a los costos de las alternativas de inversión, por ejemplo, la

instalación de un sistema solar térmico en techumbres con mala orientación al sol o poca superficie hacían prohibitivo su aplicación en ciertas viviendas (vivienda no elegible en la publicación de Asae et al). Lo anterior evidencia cómo estos aspectos se interrelacionan al momento de evaluar las diferentes alternativas de inversión en el reacondicionamiento de viviendas.

Las publicaciones estudiadas muestran que todas las metodologías adoptadas, ya sea bajo un enfoque dinámico o estático, presentan diferencias en los parámetros o en los supuestos que son adoptados para realizar los análisis. Aspectos que derivan del contexto en que se realiza la modelación; por ejemplo, geográfico, económico, político o social.

Así, diferentes climas, diferentes tipologías constructivas, diferentes precios de energía, diferentes hábitos de las personas, entre otros, definirán los ahorros energéticos y los costos de inversión que son contrastados; por tanto, el contexto de modelación debe quedar claramente definido por el analista en la evaluación de inversiones de eficiencia energética.

Finalmente, destacar el postulado de Verbruggen en torno a que las características de irrevocabilidad en las inversiones de eficiencia energética estimulan la generación inmediata de edificios muy eficientes en lugar de edificios estándares. Pues es esperable que los edificios corrientes (bajo o mediocre EPE) presenten oportunidades de mejora con un alto grado de irrevocabilidad, imposibilitando la decisión de cambios futuros en la vivienda.

8. REFERENCIAS

[1] British Petroleum. (2017). Recuperado el 1 de Enero de 2017, de BP Global - Statistical Review of World Energy: <http://bp.com/statisticalreview>.

[2] Nejat, P., Jomehzadeh, F., Mahdi Taheri, M., Gohari, M., & Adb Majid, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO2 emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO2 emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, marzo 2015, págs. 843-862.

[3] Yau, Y., & Hasbi, S. (2013). A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18, febrero 2013, Pág. 430-441.

[4] Cárdenas, J. P., Muñoz, E., Riquelme, C., & Hidalgo, F. (2015). Simplified life cycle assesment applied to structural insulated. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 30 N° 1, abril, págs. 33-38.

[5] IDAE, I. p. (2015). *Energy Efficiency Trends and Policies in SPAIN*. España: IDAE.

[6] Verbruggen, A., Al Marchohi, M., & Janssens, B. (2011). The anatomy of investing in energy efficient buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 4, Issue 4, abril 2011, Pág. 905-914.

[7] Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., & Ledo, L. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, Volume 55, December 2012, Pages 889-902.

[8] Verbruggen, A. (2012). Financial appraisal of efficiency investments: why the good may be the worst enemy of the best. *Energy Efficiency*, Vol. 5, November 2012, Issue 4, pp 571-582.

[9] Weitzman, M. (1998). Why the Far-Distant Future Should Be Discounted at Its Lowest Possible Rate. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 36, Issue 3, noviembre 1998, Pág. 201-208.

[10] Weitzman, M. (1999). Just Keep Discounting, but. En P. Portney, & J. Weyant, *Discounting and Intergenerational Equity* (págs. 23-30). Washington DC: Resources for the Future.

[11] Madlener, R., & Kumbaroğlu, G. (2012). Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 49, Junio 2012, Pág. 327-334.

[12] Morrissey, J., & Horne, R. (2011). Life cycle cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 43, Issue 4, Abril 2011, Pág. 915-924.

[13] Ciulla, G., Galatioto, A., & Riccio, R. (2016). Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 128, septiembre 2016, Pág. 649-659.

[14] Coyle, D. (2016). An Investigation Into the Cost Optimality of the Passive House Retrofit Standard for Irish Dwellings Using Life Cycle Cost Analysis. *Journal of Sustainable Design & Applied Research*, Vol. 4: Iss. 1, Article 2.

[15] Rasoul Asaee, S., Ismet Ugursal, V., & Beausoleil-Morrison, I. (2017). Techno-economic assessment of solar assisted heat pump system retrofit in the Canadian housing stock. *Applied Energy*, Vol. 190, marzo 2017, Pág. 439-452.

WHAT DO YOU THINK?

To discuss this paper, please submit up to 500 words to the editor at 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.