

REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS: REVISIÓN DE MODELOS Y LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

¹Vilches Such, A.; ¹García Martínez, A.; ²Sánchez Montañés, B.

¹Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. Dpto. de Construcciones Arquitectónicas I

²Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. Dpto. de Historia, Teoría y Composición

Avda. Reina Mercedes nº2, 41012, Sevilla

e-mail: avilchessuch@gmail.com, agarcia6@us.es, beritosm@us.es

RESUMEN

En la actualidad, la rehabilitación de edificios es recomendación general para la reducción de la energía consumida por su uso y de las emisiones asociadas. Además, la rehabilitación de edificios permite la reutilización de materiales, prolongar la vida útil y evitar el impacto generado por la demolición y la nueva construcción. Sin embargo, la propia intervención también genera un impacto (energía incorporada en materiales, transporte y procesos de construcción), a veces, un cambio de instalaciones más eficientes no equivale a una reducción del consumo y además tiene una afección al funcionamiento de la ciudad.

La unión europea y el *Royal Institute of British Architecture* han definido estrategias para la reducción del impacto asociado a los edificios a través de la rehabilitación, sin embargo, ambos enfoques varían entre sí. Además, en la actualidad encontramos una disparidad de términos y conceptos asociados a la rehabilitación que no permiten clarificar los objetivos de una manera técnica y rigurosa. Frente a las incertidumbres actuales, la técnica de análisis de ciclo de vida permite abordar bajo una misma metodología ya contrastada los impactos potenciales asociados a la rehabilitación.

Si bien el impacto ambiental de la nueva construcción está en estudio, la publicación sobre rehabilitación es reducida en la literatura académica. En la construcción convencional los materiales suponen aproximadamente el 20% del impacto total del ciclo de vida, mientras que la energía en fase de uso es aproximadamente el 80%. Sin embargo, investigaciones recientes muestran cómo a medida que diseñamos los edificios con menor consumo energético la distribución anterior se está igualando, siendo el peso de los materiales alrededor del 40% de la energía total del edificio en comparación con el 60% del uso.

En este artículo, se muestran los conceptos, términos y modelos existentes en el panorama internacional para la definición de la rehabilitación de bajo impacto ambiental. Se propone una clasificación de los impactos de la rehabilitación, según la teoría del efecto rebote. Posteriormente se ha realizado una revisión de la metodología de análisis de ciclo de vida asociada a la rehabilitación, encontrando convergencias y diferencias entre diversos autores. Y finalmente, se concluye destacando aquellos puntos en común y qué líneas son necesarias de desarrollar para abordar de manera holística y global la rehabilitación de edificios y su impacto ambiental.

Keywords: rehabilitación, análisis de ciclo de vida, impacto ambiental, efecto rebote.

1.- Introducción

Cada día es mayor la conciencia sobre la protección ambiental, por ello, con el objetivo de reducir los daños producidos en nuestros ecosistemas, es recomendación general en el sector de la construcción la rehabilitación de edificios frente a nuevas obras de construcción. No obstante, mientras que la cuantificación de los impactos ambientales asociados a la nueva construcción está ampliamente estudiada, apenas se ha investigado sobre el impacto debido a los procesos y materiales ligados a la rehabilitación.

Para analizar el impacto ambiental de un material, sistema constructivo o incluso de edificios completos es necesario realizar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del mismo. Esta técnica permite cuantificar el impacto potencial de productos o procesos en el medio ambiente. Esta técnica está definida en los estándares internacionales ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 [1], [2] y su aplicación en la arquitectura cada vez es mayor.

Desde finales del siglo XX, existen numerosos ejemplos por todo el mundo de edificios cuyo impacto en el medio ambiente ha sido evaluado: Suecia [3]; Estados Unidos [4]; Japón [5]; Francia [6]; Nueva Zelanda [7]; España [8], [9]; China [10]; Escocia [11]; Suiza [12]; Grecia [13] o Emiratos Árabes Unidos [14]. El factor común de todos los proyectos es la elección del ACV como técnica más adecuada para estudiar el impacto que los edificios tienen en el medio ambiente.

Además, existen trabajos destacables sobre recopilaciones de edificios que aportan una comparativa y que permite obtener una visión global de la cuestión [15]–[17]. Ambos artículos muestran como la relación entre la energía incorporada en los materiales y la energía necesaria para la fase de uso del edificio supone el 20% frente al 80% respectivamente. No obstante, se destaca que la tendencia global es de realizar edificios con un bajo consumo energético durante su fase de uso, como consecuencia de este cambio de tendencia la relación anteriormente descrita está evolucionando al 40% de impacto asociado a los materiales del edificio y el 60% perteneciente a la fase de uso del edificio. Se observa que cuando el objetivo de las investigaciones es proponer edificios que al final de su vida tengan un bajo impacto en el medio ambiente, la tendencia general es reducir la energía en fase de uso que es la etapa del edificio con mayor impacto asociado. Para la construcción de este tipo de edificios suele ser necesario el incremento de los materiales utilizados (aislamiento térmico, dispositivos pasivos captadores o difusores de calor, instalaciones más eficientes, etc.). Este incremento de materiales supone aumentar la energía utilizada por los materiales de construcción y por lo tanto, representa una mayor contribución en el total del impacto causado por el edificio.

Sin embargo, a diferencia de los estudios realizados sobre obra nueva y pese a ser ampliamente recomendada la rehabilitación de edificios como estrategia de sostenibilidad ambiental, apenas se ha estudiado la intervención sobre edificios existentes a través de la técnica del ACV. Es una idea extendida que la rehabilitación nos permite reducir las emisiones que se generan al reutilizar los materiales existentes y que gracias a las rehabilitaciones energéticas es posible disminuir el consumo de energía en el uso del edificio (climatización, iluminación y aparatos eléctricos). Sin embargo, se debe ser consciente que la propia rehabilitación también genera un impacto debido a diferentes efectos directos, indirectos y agregados. Además, la rehabilitación de los edificios supone por lo general asumir la forma y distribución de huecos de un edificio, lo que supone una limitación de las estrategias bioclimáticas más favorables para la localización, a no ser que se opte por una intensa intervención sobre el edificio, lo que a su vez supone un mayor impacto ambiental. Por lo tanto, ¿se podría afirmar que cualquier rehabilitación tiene un impacto menor que la construcción de un nuevo edificio?

¿Dónde está el límite y como de cerca o de lejos se mueven las rehabilitaciones actuales?

En definitiva, para poder afirmar que la rehabilitación es la opción con un menor impacto ambiental debe ser valorada y estudiada relacionando los impactos producidos frente a los beneficios que aporta.

2.- Definiciones

Para definir los objetivos de reducción del impacto ambiental asociado al sector de la construcción, y en concreto a través de la rehabilitación, es necesario conocer como diversas instituciones internacionales están tomando la iniciativa y que conceptos se están utilizando.

La Comisión Europea envió el 1 de julio de 2014 una comunicación al Parlamento Europeo titulada “Oportunidades para la eficiencia de los recursos en el sector de la construcción” [18]. En este comunicado, la comisión recomienda la renovación de edificios con una mayor eficiencia de los recursos lo cual debería requerir de políticas que incorporaran un amplio abanico de impactos ambientales en todo su ciclo de vida.

En otro documento publicado por la Comisión Europea, el borrador del programa de trabajo 2014-2015 para el Horizonte 20/20 en el área de “Energía segura, limpia y eficiente” [19], se establece que la renovación de edificios existentes representa más del 17% del potencial de ahorro de energía de la UE hasta 2050. Para conseguir estos ahorros a largo plazo, se establece una tasa de renovación de nuestro parque edificado del 2-3% al año, siendo actualmente del 1,2%. Para cumplir este objetivo destaca que es necesario reducir los costes actuales e incrementar la rapidez con la que se efectúan las intervenciones para minimizar las molestias a los usuarios.

En el documento anterior, la comisión europea establece el objetivo de realizar una renovación holística y profunda (*holistic and deep renovation*) de los edificios. Esta caracterización de la intervención son nuevos términos aplicados a la renovación de los mismos. El informe define los términos holístico y profundo como:

- *Holístico (holistic)* – Considerando todas las posibilidades de rehabilitación a nivel de edificio junto con las oportunidades a nivel de distrito como biomasa, geotermia, calefacción de distrito, etc.
- *Profunda (Deep)* – Reducción tanto de la energía final como de la energía suministrada de un edificio de manera significativa comparada con los niveles anteriores a la renovación (Directiva 2012/27/EU de Eficiencia Energética).

La reducción de energía consumida gracias a una renovación profunda es un tema de debate debido a la ambigüedad y la falta de concreción cuantitativa. Se entiende por lo general que la reducción de la energía incluye los sistemas de climatización además de los sistemas de iluminación y otros electrodomésticos utilizados en la vivienda, y la reducción necesaria es de un 75% respecto a niveles pre-renovación [20]. Este límite del 75% marca un alto umbral que a menudo es difícil de conseguir mediante intervenciones solo en el edificio, lo que hace un reto llegar a los objetivos planteados para 2050.

Por otro lado, dentro de la literatura, tanto española como inglesa, vemos que existen diversas terminologías recurrentemente utilizadas en este ámbito: rehabilitación, renovación, restauración o reparación en español; o en inglés *retrofitting*, *refurbishment*, *renovation*, *repair* o *restoration*.

La utilización, a menudo dispar, de cada término en los artículos de investigación o en las propias publicaciones institucionales supone una barrera a la penetración y asunción de los conceptos ligado a cada una.

Mientras que en español el término de rehabilitación (*refurbishment* en inglés) es predominante, en inglés es ampliamente intercambiado por ‘*renovation*’. La propia

directiva anteriormente mencionada [19] menciona el concepto '*Holistic and Deep Renovation*' para referirse a una rehabilitación del edificio que tenga en cuenta una reducción significativa de la energía consumida así como que tenga en cuenta las posibilidades de instalaciones a nivel de distrito.

No obstante, estas medidas de reducción energética, por lo general, se basan en incorporación de aislamiento como medida pasiva o con la instalación de nuevos equipos eficientes, como medidas activas. Esta manera de intervenir sobre un edificio, que se basa en la adición de un nuevo material o componente, es nombrado de manera específica en inglés '*retrofitting*'. Se podría decir que, los términos *renovation* o *refurbishment* suelen incluir medidas de *retrofitting* pero además suponen otras mejoras estética o de cualidades espaciales de un edificio o habitación.

Por último, otros términos como reparación (*repair*) o restauración (*restoration*) se refieren a la acción de devolver un uso o función particular a un elemento o equipo. La restauración, técnica normalmente utilizada en edificios históricos, supone devolver a su estado original. En cambio la reparación, supone devolver a su función original, pero los materiales o algunas intervenciones pueden variar respecto al estado inicial.

Además de la discusión precedente, otra institución de referencia como es el Real Instituto Británico de Arquitectura (RIBA, *Royal Institute of British Architecture*) establece el Principio de Diseños y Rehabilitaciones de Bajas Emisiones de Carbono (*Principle of low Carbon Design and refurbishment*) en una de sus publicaciones en 2012 [21]. Este principio definido, si bien es sencillo de intuir cuál es su objetivo general, queda vagamente explicado en el documento y cuáles son los límites a los que se refiere en la rehabilitación, como ocurre en la actualidad con los edificios de energía casi nula o edificios NZEB. Acotar estos límites y definir bien cuales aspectos es importante para poder comparar los resultados entre diferentes estudios realizados. Es decir, si todos los estudios no incluyen las mismas partidas de la rehabilitación se obtendrán valores dispares que no podrán ser comparados, lo que genera incertidumbre entre los técnicos y una sensación de desconfianza hacia técnicas de cuantificación. No obstante, sí define que para realizar los estudios será necesario un análisis completo del ciclo de vida para este tipo de diseños y rehabilitaciones.

Como respuesta a la iniciativa del RIBA se publicó un artículo sobre *Low Carbon Housing Refurbishment (LCHR)* un paso más en la definición de la aplicación de este principio, en concreto a los edificios residenciales [22]. En este artículo se definen las barreras e iniciativas posibles para potenciar este tipo de rehabilitaciones desde la perspectiva de los arquitectos.

En definitiva, se destacan los esfuerzos por fijar un objetivo de reducción del impacto ambiental del sector de la construcción, y en concreto a través de la rehabilitación de edificios. Si bien, poco a poco se apunta al Análisis de Ciclo de Vida como técnica idónea para realizar estos estudios, todavía encontramos ambigüedades tanto en terminología como en los objetivos a los que se pretenden llegar. La proliferación de términos y de herramientas supone una dificultad añadida para los técnicos.

La definición de unos objetivos y términos claros es importante para poder establecer una hoja de ruta acordada por la comunidad científica, profesionales y legisladores, ya que de esta manera será posible acceder con seguridad y confianza a fuentes de financiación estables y necesarias.

3.- Metodología y objetivos

Una vez vistos los conceptos y disparidades que giran en torno a la rehabilitación de los edificios, esta comunicación tiene dos objetivos principales: clasificar de manera

ordenada los impactos asociados a la rehabilitación de edificios, y evaluar cómo la metodología de análisis de ciclo de vida ha abordado esta cuestión.

Para ello se ha realizado en primer lugar una categorización de los impactos ambientales asociados en función de los tres niveles del efecto rebote: efecto directo, indirecto y agregado, lo que permite abordar la rehabilitación de una perspectiva holística.

En segundo lugar, se ha extraído de la metodología de análisis de ciclo de vida aquellos aspectos más relevantes que suponen un cambio de perspectiva en la rehabilitación de edificios frente al estudio de la nueva construcción como herramienta capaz de aportar rigurosidad y comparabilidad entre estudios.

Para la realización del estudio se han tomado referencias que justifican la necesidad de estudiar el impacto ambiental en las diferentes categorías de manera global para la toma de decisiones.

4.- El efecto rebote en la rehabilitación

Anteriormente se ha referenciado que el potencial de ahorro de energía de la rehabilitación está en torno a un 17% en Europa hasta 2050 [19]. Para analizar estos datos, es necesario no solo conocer los ahorros energéticos producidos por la rehabilitación, sino que también hay que analizar los impactos asociados, es decir el llamado 'efecto rebote', y conocido como 'La Paradoja de Jevons', el cual está incluido por los modelos de cálculos energéticos y sus emisiones a nivel mundial [23].

Esta paradoja se formuló a mediados del siglo XIX a raíz de la eficiencia conseguida por los nuevos altos hornos de Bessemer y Henry Cort. Gracias a la introducción de oxígeno en los altos hornos se consiguió reducir la cantidad de carbón necesario para conseguir altas temperaturas en los procesos industriales, y de esta manera se consiguieron abaratar los costes. A raíz de esta reducción de los gastos fue posible la construcción de más altos hornos por parte de la industria, lo que finalmente se tradujo en un aumento global del consumo de carbón. Trasladando esta paradoja al consumo energético de los edificios y sus emisiones asociadas, los economistas Laurent y Cacheaux realizaron el informe "Policy options for carbon taxation in the EU" [23] considerando el efecto de la paradoja de Jevons en los ciclos de reducción del consumo de energía debido a los avances en eficiencia de los sistemas.

En concreto, el efecto rebote se divide en: efecto directo, efecto indirecto y efecto agregado [24]. A continuación se ha elaborado una categorización de elaboración propia asociando los impactos derivados de la rehabilitación de edificios que no suelen tenerse en cuenta de manera complementaria para la toma de decisiones.

4.1.- El efecto directo

El efecto directo describe como al incrementar la eficiencia de un tipo de energía o servicio energético aumenta el consumo de ese mismo tipo de energía o servicio. Es decir, al realizar viviendas más eficientes, será necesario un menor gasto en la factura eléctrica para conseguir el confort térmico. En algunos casos, los usuarios al tener que pagar menos por el confort de su vivienda demandarán más energía por un uso más intensivo ya que su factura será más reducida, por lo que en algunos casos se aumentará la energía demandada.

Este efecto es el incluido en los escenarios de evolución del consumo energético de Laurent y Cacheaux [23].

4.2.- El efecto indirecto

El efecto indirecto se debe a los recursos energéticos o a los impactos asociados a todos los materiales y obras necesarias para efectuar las obras de rehabilitación. La

fabricación de materiales, su transporte a obra y los procesos para su colocación en el edificio suponen de manera indirecta un impacto en el medio ambiente, a pesar de que en el futuro la vivienda consuma una menor energía.

Sin duda, a pesar de los pocos artículos existentes, este es el efecto más estudiado a través del análisis de ciclo de vida en la rehabilitación de edificios. En un comienzo, todos los impactos asociados a la fase de uso se nombró como '*recurring embodied resource and environmental effect*' (efectos ambientales y recursos incorporados periódicamente). Más tarde, en 2006, se realizó la diferenciación entre los recursos e impactos necesarios para mantener las condiciones confort en el edificio y aquellos necesarios para la reparación, sustitución o rehabilitación del edificio. A continuación se describen ambos conceptos:

(1998) *Recurring Embodied resource and environmental effects*: aquellos asociados con la rehabilitación y el mantenimiento del edificio y aquellos necesarios para el uso y operación del mismo. [25].

(2006) *Operating energy VS Recurring embodied energy* [15]:

- *Operating energy* (energía para fase de uso): Energía utilizada en los edificios durante su fase de uso, como por ejemplo: calefacción, refrigeración, ventilación, agua caliente, iluminación y otros equipos electrónicos.
- *Recurring embodied energy* (energía periódica incorporada): La suma de energía incorporada por un material utilizado en la fase de mantenimiento y rehabilitación del edificio.

En 2013, otra publicación del RIBA [26], la cual demandaba una mayor necesidad de estudios sobre los impactos generados por la intervención y rehabilitación de edificios realizaba otra distinción. Diferencia entre dos tipos de intervenciones, una de menor impacto realizada cada menos frecuencia (*fit-out A*) con un impacto de 100 kg de CO₂-eq / m² de superficie útil, y otra mayor, realizada por los usuarios de los edificios cada 5 años (*fit-out B*) de 100 a 200 kg de CO₂-eq / m² de superficie útil. Esta aproximación resulta sin embargo poco precisa, y el propio autor afirma que es necesario realizar una investigación más profunda en cómo afectan las intervenciones en los edificios en su ciclo de vida [26, pp. 58–60].

Para valorar la importancia en el global de esta serie de medidas, Yohanis et al. afirmaron que la energía incorporada, teniendo en cuenta la fase de rehabilitación y sustitución de un edificio, podría llegar a ser cercana a la energía de la fase de uso al final de su ciclo de vida para largos periodos de tiempo (más de 100 años) [27].

Otro ejemplo actual lo encontramos en el proyecto MARIE, es un proyecto europeo financiado por los fondos FEDER 2013-2015 y aborda la rehabilitación energética en relación a la creación de políticas que generen las mejores intervenciones posibles dirigidas desde la administración pública. De manera explícita define su informe [28] sus límites a externalidades y otros impactos generados debido a los procesos de rehabilitación.

4.3.- El efecto agregado

El efecto agregado, es un concepto más amplio que relaciona un aumento de la eficiencia de los sistemas con un aumento de la productividad, lo cual produce un aumento de la economía demandando más recursos y generando un nuevo impacto. Este último efecto es más complejo de detectar, relaciona los efectos ambientales con los económicos y sociales.

El efecto agregado de la rehabilitación debe ser analizado desde una mayor escala, teniendo en cuenta como actuaciones de conservación de un edificio supone revalidar la morfología y el metabolismo de la ciudad. Recientemente, el RIBA (*Royal Institute of British Architecture*), publicó un estudio sobre la energía usada por los edificios y sus emisiones de CO₂-eq. En esta publicación se enumeran tres factores

principales respecto al impacto imputable a un edificio: energía incorporada, energía de uso y energía del transporte [26]. Esta publicación, no solo pone en consideración los materiales utilizados por los edificios y la energía necesaria para su funcionamiento, sino que además incluye el transporte necesario para llegar al edificio. Desde esta perspectiva, rehabilitar un edificio supone mantener un punto de tensión en la ciudad que requerirá que las personas se desplacen hasta él. Si la localización no es accesible mediante transporte público, estaremos requiriendo del transporte privado para que los ocupantes del edificio lleguen hasta el mismo. El autor en este libro se pregunta, “¿sería mejor tener un edificio poco eficiente en el centro de Londres? ¿O por el contrario sería mejor un edificio muy eficiente energéticamente y con materiales sostenibles a las afueras de una ciudad poco densa?”. Por lo tanto, para poder responder satisfactoriamente a la rehabilitación desde una perspectiva ambiental es necesario ir más allá de esta disyuntiva, teniendo en cuenta tanto la localización del edificio, como los materiales empleados y su funcionamiento para conseguir valoración global y acertada.

Una comunicación sobre la rehabilitación de la estación de ferrocarril de Canfranc reflexiona además sobre aquellos aspectos ligados al uso al que se destina la rehabilitación y la intensidad del mismo [29]. Este estudio tiene en cuenta en su valoración, no solo los materiales empleados sino que además valora la influencia de la ocupación posterior del edificio, en esta línea, la propuesta de usos más intensivos y programas complementarios que permitan una mayor ocupación del edificio en el tiempo permitirá un mayor aprovechamiento de los edificios y de las necesidades de los ciudadanos.

Sin duda, es una reflexión necesaria ante cualquier rehabilitación que se plantee, siendo necesario tener en cuenta sus efectos directos, indirectos y agregados, es decir no solo se debe tener en cuenta el impacto del propio edificio, sino también las sinergias que se generan en torno a él.

5.- Metodología de acv y rehabilitación

Como se ha visto en el apartado anterior, la rehabilitación supone no solo beneficios ambientales, sino que además tiene unos impactos categorizados en efectos directos, indirectos y agregados que han de ser tenido en cuenta.

Los impactos ambientales potenciales de un sistema son cuantificados a través de la técnica del análisis de ciclo de vida. La metodología de ACV está reconocida por las normas europeas y españolas como normas UNE-EN ISO 14040 [1] y UNE-EN ISO 14044 [2]. Diversos autores [16], [30] reconocen que el sector de la construcción afronta retos adicionales al resto de sectores en el estudio del ciclo de vida de su producto. Estos retos son:

- Impactos específicos en un lugar que varía en cada caso de estudio.
- Complejidad en la modelización de todos los elementos intervinientes.
- Escenarios inciertos debido al desconocimiento de cómo los ocupantes usarán el edificio.
- La complejidad en estudiar la calidad del ambiente interior de un espacio.
- Inclusión de datos sobre materiales reciclados y no industrializados.

Debido a esta complejidad, algunos autores [30] recomiendan no utilizar un acercamiento lineal y estático, que es el definido por normas europeas UNE EN 15978 Evaluación de la sostenibilidad ambiental [31]. En contraposición a la metodología actual que empieza con la construcción, luego el uso (incluyendo el mantenimiento), y finalizando con las fases de demolición y tratamiento de residuos, recomiendan usar servicios suministrados como la unidad funcional. Es decir, debido al desconocimiento de cómo serán usados los edificios por los ocupantes, se debería de tratar a los edificios como proveedores de servicios

dinámicos que pueden cambiar con modificaciones y reconstrucciones en el tiempo, usando una metodología secuencial en ACV, y desarrollando una estructura del modelo de ACV flexible que permita elecciones de los usuarios. Este acercamiento a una metodología dinámica del ACV es llevada a cabo en 2012 por Collinge, O. [32] en el caso de estudio de un edificio institucional y el estudio de la evolución de diferentes escenarios de mix energético asociado a energías renovables.

5.1.- Metodología basada en escenarios

La particularidad del ACV de la rehabilitación frente a obra nueva es que por lo general se estudian varias opciones (de 3 a 5) para ver cuál es la más idónea [33]–[35]. Por lo tanto no es una metodología secuencial, sino una metodología dinámica. Esta metodología se define como:

- Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA): Acercamiento al ACV el cual incorpora explícitamente procesos dinámicos en el modelado en un contexto de variación temporal y espacial alrededor de los sistemas industriales y ambientales [32].

Esta metodología basada en diferentes escenarios posibles permite adoptar las variaciones posibles debido al perfil de uso en la rehabilitación de edificios. Otras publicaciones se han centrado en mostrar que frente a las modelizaciones energéticas y los perfiles de uso atribuidos por los programas de cálculo se observa un aprovechamiento diferente de las instalaciones por parte de los ocupantes. Una publicación realizada dentro del proyecto EFFICACIA y AMEC, en la universidad de Sevilla, muestra como es necesario particularizar los patrones de uso normalmente estudiados en el sur de España [36].

La metodología dinámica permite realizar un análisis de ciclo de vida basado en diferentes escenarios posibles y poder tomar decisiones de acuerdo a aquellas soluciones que presenten mejores resultados en el global de las posibilidades.

5.2.- Indicadores utilizados

Los indicadores básicos utilizados normalmente en las publicaciones sobre análisis de ciclo de vida y rehabilitación se refieren a consumo energético y emisiones de CO₂-eq.

En concreto, en relación a las emisiones de dióxido de carbono encontramos las categorías de GWP (global warming potential, potencial de calentamiento global) [33]–[35], [37] o Climate Change (cambio climático) [38]. En relación a los recursos energéticos utilizados es utilizado CED (Cumulative Energy Demand)[34], [35] o GWR (Gross Energy Consumption) [33]. En pocos artículos [38], se pueden encontrar referencias a otras categorías de impacto como pueden ser la eutrofización, acidificación, potencial de oxidación fotoquímica o biodiversidad.

Además, estos indicadores no siempre son mostrados de la misma manera, sino que es frecuente la repercusión de dichos impactos por los años de la vida útil del edificio, por ejemplo CO₂-eq/año o MJ/año.

Para favorecer la comparabilidad entre los diferentes estudios es necesario poseer indicadores equivalentes con metodologías de cálculo similares. Si no, debido a las incertidumbres existentes no será posible realizar comparaciones asertivas, y por lo tanto extraer información útil de los estudios.

5.2.1- Indicadores sintéticos

Además de los indicadores básicos anteriores, en los estudios sobre rehabilitación de edificio aparecen una serie de indicadores elaborados por los autores para poder interpretar los datos obtenidos. La mayoría de las aportaciones realizadas en esta dirección son muy interesantes pues permite valorar las actuaciones y tener

herramientas útiles de comparación. No obstante existe una disparidad, mayor aun respecto a los indicadores básicos anteriormente descritos, debido a la escasa información existente y la falta de publicaciones que expliquen esta cuestión.

Encontramos los siguientes indicadores utilizados: *marginal life cycle cost*, *marginal life cycle carbon footprint* y *Repaid invested carbon* [34]; *Payback* y *Energy Return Ratio* [35]; *Environmental Performance Ratio*, *Economic performance* y *Sustainability performace* [37]; y finalmente *Environmental pay-back/ person* [38].

Es común la tendencia a estudiar el retorno de la inversión realizada, ya sea en términos económicos o en términos ambientales. En esta tendencia se observa además la integración de indicadores más complejos que combinan económicos y ambientales. No obstante, son escasos los artículos que relacionan los aspectos ambientales con los sociales.

Ratificando la necesidad de la transversalidad entre disciplinas, el *Integrated Research System for Sustainability Science* (IR3S) publicó el 8 de agosto de 2014 una edición especial titulada "Nuevas direcciones en la ciencia de la sostenibilidad: promocionando la integración y la cooperación (*New directions in sustainability science: promoting integration and cooperation*)". En este texto se pone de manifiesto la necesidad de la transdisciplinariedad para la co-producción de conocimiento, la toma de decisiones de una perspectiva holística y la necesidad de integración de los diferentes niveles de gobierno [39].

5.3 Combinación con otras técnicas de evaluación ambiental

En el estudio del impacto ambiental de la rehabilitación de edificios se ha encontrado otro artículo de 2012 que combina las herramientas de Huella Ecológica (*Ecological Footprint*, EF) con en ACV [40]. En este caso, los resultados muestran tres categorías de impacto: carbón incorporado (*embodied carbon*, EC); energía incorporada (*embodied energy*, EE); y huella ecológica (*ecological Footprint*, EF).

La proliferación de diferentes herramientas ha sido discutida por Finkbeiner a raíz de las publicaciones realizadas por la comisión europea [41]. La institución trabaja en un proyecto de certificación de productos verdes cuya metodología se basa en una nueva propuesta de Huella Ecológica de Producto. El autor argumenta que la metodología propuesta supone una ruptura con las herramientas actuales, lo que supone seguir aportando incertidumbre a un proceso aún en construcción.

6.- Resultados

En el presente artículo se ha realizado un estudio sobre el impacto ambiental asociado a la rehabilitación de edificios y su evaluación a través del análisis de ciclo de vida.

En primer lugar, se observa como existen diferentes objetivos dirigidos a la rehabilitación de edificios por diversas instituciones internacionales, mientras que la Comisión Europea plantea la Renovación Profunda y Holística de los Edificios (*Holistic and Deep Renovation*), desde RIBA se plantea la Rehabilitación de Baja Emisiones de Carbono (*Low Carbon Refurbishment*). La diferencia radica en que el primer objetivo se basa en la reducción de la energía en la fase de uso, mientras que el RIBA resalta la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono asociado a los efectos de la rehabilitación y del futuro comportamiento del edificio. Ambas aproximaciones suponen en última instancia reducir el impacto en el medio ambiente, pero a través de enfoques diferentes.

Al evaluar el impacto asociado a la rehabilitación de edificios se identifican tres categorías: efecto directo, efecto indirecto y efecto agregado. Esta categorización de los impactos recoge las posibles consecuencias del efecto rebote asociado, es decir, impactos que son consecuencia de la rehabilitación de edificios pero que no siempre

se perciben de manera clara, pero que son consecuencia de la misma. Bajo este estudio se detectan impactos debido a la eficiencia de las rehabilitaciones, impactos asociados a los materiales y procesos de la intervención, e impactos agregados debido al transporte necesario al prolongar el uso de los edificios.

En relación a la metodología, se puede ver como existen variaciones respecto a la nueva obra de edificación. Aplicar una metodología dinámica de análisis de ciclo de vida que permite evaluar diferentes escenarios. Además, los indicadores utilizados varían entre los diferentes artículos lo que dificulta la comparación de los resultados. En el caso de la rehabilitación nuevos indicadores derivados de los indicadores básicos están apareciendo (*marginal life cycle carbon footprint, Repaid invested carbon, Energy Return,...*) para evaluar los estudios.

La evaluación del impacto ambiental se refiere normalmente a rehabilitaciones energéticas de edificios, mientras que otro tipo de intervenciones, como por ejemplo sobre elementos estructurales no es considerado.

7.- Conclusiones

El estudio del impacto ambiental de las rehabilitaciones de edificios mediante el análisis de ciclo de vida está comenzando a implementarse. En este artículo se han evaluado las diferencias entre las aproximaciones que las instituciones europeas están definiendo en relación a la rehabilitación de edificios y el impacto ambiental, así como la precisión en algunos términos en este ámbito. Además se propone la clasificación de los efectos directos, indirectos y agregados que influyen en el estudio del impacto ambiental de la rehabilitación. A partir de estas definiciones es necesario continuar avanzando en el conocimiento y realizar una aproximación metodológica al estudio del impacto ambiental de la rehabilitación.

Para realizar un estudio coherente se ha recurrido a la técnica de análisis de ciclo de vida como la mejor opción para estudiar los diferentes escenarios posibles de los edificios, por ello, se propone que se emplee la metodología dinámica de análisis de ciclo de vida (*Dynamic Life Cycle Assessment*) como técnica capaz de tener en cuenta factores como la evolución de la contribución de las energías renovables al mix energético, los posibles efectos del cambio climático o el perfil de uso de los edificios.

En una revisión de la literatura existente se observa como tanto la metodología como los indicadores que se están utilizando en la actualidad varían considerablemente de unos artículos a otros. Los indicadores utilizados en los diversos estudios son aportaciones interesantes debido a que proporcionan criterios para evaluar con mayor profundidad el impacto asociado a las rehabilitaciones, sin embargo, es necesario un consenso global sobre cuáles son los más idóneos para evaluar la rehabilitación, sino se corre el riesgo de tener multitud de estudios no comparables entre sí.

Finalmente, se destaca que faltan estudios comparativos que relacionen los indicadores de nueva construcción frente a los de la rehabilitación. De esta manera, se podrá asegurar con firmeza en qué casos la rehabilitación es la mejor opción para reducir los impactos producidos por el sector de la construcción en los ecosistemas y así gestionar de manera eficiente los recursos disponibles.

REFERENCIAS

- [1] AEN/CTN150, *UNE-EN ISO 14040. Environmental management. Life Cycle Assessment. Principles and framework.* 2006.
- [2] AEN/CTN150, “*UNE-EN ISO 14044. Environmental management. Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines.*” 2006.

- [3] K. Adalberth (1997) "Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: Examples" *Building and Environment*. 32, 321–329.
- [4] S. Blanchard and P. Reppe (1998) "Life Cycle Analysis of a Residential Home in Michigan" Center for Sustainable System. University of Michigan.
- [5] Y. Nishioka (2000) "Saving Energy versus Saving Materials Life-Cycle Inventory Analysis of Housing in a Cold-Climate Region of Japan" *Journal of Industrial Ecology*. 4, no. 1.
- [6] B. L. . Peuportier (2001) "Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context" *Energy and Buildings*. 33, 443–450.
- [7] N. Mithraratne and B. Vale (2004) "Life cycle analysis model for New Zealand houses" *Building and Environment*. 39, 483–492.
- [8] M. Cepeda Gutiérrez and I. Mardaras Larrañaga (2004) "Cuantificación energética de la construcción de edificios y el proceso de urbanización," *conarquitectura* 65–80.
- [9] O. Ortiz, C. Bonnet, J. C. Bruno, and F. Castells (2009) "Sustainability based on LCM of residential dwellings: A case study in Catalonia, Spain" *Building and Environment*. 44, 584–594.
- [10] O. Arup, F. Walk, K. Tong, and H. Kong (2005) "Developing life cycle assessment tool for buildings in hong kong 1" *The 2005 World Sustainable Building Conference*. pages. 27–29, Tokyo, Japan.
- [11] M. Asif, T. Muneer, and R. Kelley (2007) "Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland" *Building and Environment*. 42, 1391–1394.
- [12] S. Citherlet and T. Defaux (2007) "Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span" *Building and Environment*. 42, 591–598.
- [13] C. Koroneos and G. Kottas (2007) "Energy consumption modeling analysis and environmental impact assessment of model house in Thessaloniki—Greece" *Building and Environment*. 42, 122–138.
- [14] H. Radhi (2009) "Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings – A contribution to reduce the CO2 emissions" *Building and Environment*. 44, 2451–2462.
- [15] I. Sartori and A. G. Hestnes (2007) "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article" *Energy and Buildings*. 39, 249–257.
- [16] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez, and A. Castell (2014) "Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29, 394–416.
- [17] I. Zabalza Bribián, A. Aranda Usón, and S. Scarpellini (2009) "Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification" *Building and Environment*. 44, 2510–2520.
- [18] European Commission (2014) "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee of the Regions on Resource Efficiency Opportunities in the Building Sector," pp. 1–10.
- [19] Work Programme 2014-15 (2014) "Draft Horizon 2020 Work Programme 2014-2015 in the area of " Secure , Clean and Efficient Energy " .
- [20] WWF (2012) "Retos y oportuidades de financiación para la rehabilitación energética de viviendas en España".
- [21] C. Costello (2012) "*The RIBA Guide to Sustainability in Practice*," 1ed. RIBA, Londres,
- [22] P. Davies and M. Osmani, (2011) "Low carbon housing refurbishment challenges and incentives: Architects' perspectives" *Building and Enviornment*, 46, 1691–1698.
- [23] É. Laurent and J. Le Cacheux (2010) "Policy options for carbon taxation inthe EU".
- [24] F. Navajas (2012) "Efecto rebote y eficiencia energética.," *Encuentro Nacional de Eficiencia Energética*, 1–21.
- [25] R. J. Cole (1999) "Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems" *Building and Environment*. 34, 335-348.
- [26] D. H. Clark (2013) "*What color is your building?*". RBA. Publishing, London, United Kingdom.
- [27] Y. G. Yohanis and B. Norton, (2002) "Life-cycle operational and embodied energy for a generic single-storey office building in the UK," *Energy*, 27, 77–92.

- [28] J. Ortiz, J. Salom, and E. Cubí (2012) “Potential Impact Evaluation of the MEDBEEES First Draft (Integrated Regional Benchmark Analysis)”.
- [29] B. López-mesa (2012) “Reflexiones sobre rehabilitación sostenible en Canfranc,” *Repensar Canfranc. Taller Rehabilitación urbana y paisaje*, 110–115.
- [30] M. Erlandsson and M. Borg (2003) “Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs” *Building and Environment*. 38, 919–938.
- [31] AEN/CTN198, *UNE EN 15978:2012 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*
- [32] W. O. Collinge, A. E. Landis, A. K. Jones, L. a. Schaefer, and M. M. Bilec (2012) “Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building,” *International Journal of Life Cycle Assessment*. 18, 538–552.
- [33] R. Assiego De Larriva, G. Calleja Rodríguez, J. M. Cejudo López, M. Raugei, and P. Fullana I Palmer (2014) “A decision-making LCA for energy refurbishment of buildings: Conditions of comfort” *Energy and Buildings*.70, 333–342.
- [34] J. Bull, A. Gupta, D. Mumovic, and J. Kimpian (2014) “Life cycle cost and carbon footprint of energy efficient refurbishments to 20th century UK school buildings” *International Journal of Sustainable Built Environment*. 3. 1-17.
- [35] F. Ardente, M. Beccali, M. Cellura, and M. Mistretta (2011) “Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15, 460–470.
- [36] J. J. Sendra, S. Domínguez-Amarillo, P. Bustamante, and a. L. León (2013) “Intervención energética en el sector residencial del sur de España: Retos actuales,” *Informes de la Construcción*. 65, 457–464.
- [37] I. Cetiner and E. Edis (2014) “An environmental and economic sustainability assessment method for the retrofitting of residential buildings,” *Energy and Buildings*.74, 132–140, 2014.
- [38] M. Erlandsson and P. Levin (2004) “Environmental assessment of rebuilding and possible performance improvements effect on a national scale” *Building and Environment*. 39, 1453–1465.
- [39] J. Kauffman and S. Arico (2014) “New directions in sustainability science: promoting integration and cooperation,” *Sustainable Science. Editorial*.
- [40] G. Bin and P. Parker (2012) “Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home - The REEP House” *Applied Energy*. 93, 24–32.
- [41] M. Finkbeiner (2013) “Product environmental footprint—breakthrough or breakdown for policy implementation of life cycle assessment?” *International Journal of Life Cycle Assessment*. 19, 266–271.