



HUELLA DE CARBONO COMO INSTRUMENTO DE DECISIÓN EN LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA. PELÍCULAS DE CONTROL SOLAR FRENTE A LA SUSTITUCIÓN DE VENTANAS

CARBON FOOTPRINT AS A DECISION INSTRUMENT IN ENERGY REHABILITATION. SOLAR CONTROL FILMS VERSUS REPLACEMENT WINDOWS

CRISTINA RIVERO CAMACHO
Estudiante de Doctorado en Arquitectura
Universidad de Sevilla, Sevilla, España
<http://orcid.org/0000-0001-9411-7311>
cririvcam@gmail.com

JÚLIA PEREIRA
Estudiante de Doctorado en Ingeniería Civil
CERis, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos.
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal
<https://orcid.org/0000-0003-4539-8844>
julia.pereira@tecnico.ulisboa.pt

M. GLÓRIA GOMES
Doutorada em Engenharia Civil
CERis, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos.
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal
<https://orcid.org/0000-0003-1499-1370>
maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt

MADLYN MARRERO
Doctora Ingeniera Industrial
Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Escuela Técnica
Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad de Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0002-9509-4374>
madelyn@us.es

RESUMEN

El objetivo de este artículo es la evaluación ambiental de dos posibles soluciones constructivas que mejoran la eficiencia energética de edificios existentes: sustitución de la ventana completa por una nueva más eficiente y uso de láminas de control solar adheridas a los vidrios actuales. Se propone una evaluación cuantitativa que ayude en la toma de decisiones para minimizar el consumo de recursos naturales, energía incorporada en los materiales, así como su impacto medioambiental, emisiones de CO₂ equivalentes. Como modelo de evaluación, se ha adaptado la metodología del grupo de investigación ARDITEC de la Universidad de Sevilla, en colaboración con el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa, aplicándose a proyectos reales en Portugal. El modelo tiene una estructura presupuestaria donde a cada recurso se le asignan coeficientes para el cálculo de su energía incorporada y huella de carbono, en su fabricación y puesta en obra. Se presenta el estudio de dos edificios de oficinas, con un alto porcentaje de superficie vidriada en fachadas. Los resultados obtenidos muestran emisiones inferiores en un 70% si se mejoran las ventanas con películas adheridas que si se opta por sustituirlas completamente.

Palabras clave

láminas de control solar, renovación arquitectónica, fachadas, ventanas, impacto ambiental.

ABSTRACT

The objective of this paper is the environmental evaluation of two possible constructive solutions that improve the energy efficiency of existing buildings: replacement of the complete window with a new more efficient one or the use of solar control sheets attached to the current glass. A quantitative evaluation is proposed to help in the decision making to minimize the consumption of natural resources, energy incorporated in the materials, as well as its environmental impact, equivalent CO₂ emissions. As an evaluation model, the methodology of the ARDITEC research group of the University of Seville has been adapted, in collaboration with the Higher Technical Institute of the University of Lisbon, applying to real projects in Portugal. The model has a budget structure where each resource is assigned coefficients for the calculation of its incorporated energy and carbon footprint, in its manufacture and commissioning. The study of two office buildings is presented, with a high percentage of glazed surface in facades. The results obtained show 70% lower emissions if the windows with attached films are improved compared to the complete replacement of the window.

Keywords

solar control films, architectural renovation, facades, windows, environmental impact.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de reducir las emisiones de CO₂ está contribuyendo a cambiar el modelo energético, lo cual implica un cambio en los hábitos del consumidor, así como cierto giro en la forma de proyectar y construir. La edificación es un sector de enorme influencia en la evolución del consumo de energía y de las emisiones de CO₂. Efectivamente, en el conjunto de la Unión Europea, los edificios son responsables del 40% del consumo total de energía (WWF, 2010) y del 36% de las emisiones de dióxido de carbono.

Optimizar el uso de la energía en los edificios existentes es un paso clave en la tarea de cumplir con los objetivos comunitarios para 2030 de al menos el 27% de mejora de la eficiencia energética y del 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Reglamento UE 2018/841). En ese contexto, aparecen distintos planteamientos de rehabilitación energética de edificios a nivel nacional e internacional.

Cabe agregar que el cambio de tendencias arquitectónicas en fachadas, a partir del cual se las construye más vidriadas -buscando el beneficio de la luz solar para el ahorro en iluminación artificial- produce, sin embargo, un mayor consumo energético, si se quiere mantener el confort térmico en el interior del edificio. En ese sentido, Kuchen, Plesser y Fisch (2012), llegan a la conclusión de que, aun en edificios tecnológicos desarrollados en los últimos 15 años, siguen existiendo potenciales de Eficiencia Energética (EE) y de mejoramiento del confort en general. Ante esa problemática, en las últimas décadas han surgido múltiples patentes de películas de control solar para adherir a los vidrios de estos edificios.

Las películas de control solar están diseñadas para absorber o reflejar la radiación solar incidente, a fin de disminuir las ganancias de calor solar a través del vidrio. En este marco, Rubin (1982) presentó una metodología para analizar la transferencia de calor en múltiples acristalamientos con o sin película de control solar, considerando variables ambientales tales como la temperatura y la velocidad del viento. Álvarez, Jiménez y Estrada (1998) y Álvarez, Flores y Cortina (1999), partiendo de resultados experimentales, plantean un modelo matemático para el análisis de la transferencia de calor en un vidrio con o sin película de control óptico en estado transitorio y estable. Los autores concluyeron que el uso de un vidrio con película de control solar redujo las ganancias de calor hasta en un 48%. Múltiples estudios más recientes avalan la mejora en el comportamiento térmico cuando las películas se sitúan por la cara exterior de la ventana (Rongxin, Peng y Pengyuan, 2011), lo que también se verifica en los últimos trabajos realizados en el Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa (Lourenço, Gomes y Moret, 2017; Lourenço, 2016; Pereira, 2015). De estos últimos, nace la pregunta acerca de si la opción de mejora de los vidrios con la adhesión de láminas de control solar es en sí misma una solución sostenible, en términos de análisis de ciclo de vida (ACV).

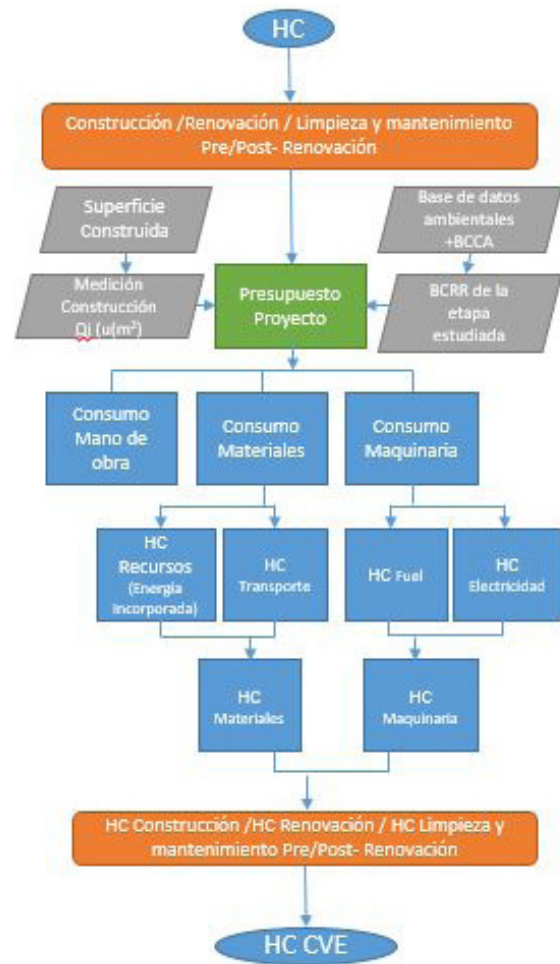


Figura 1. Esquema de la metodología ARDITEC para HC en CVE.
 Fuente: Elaboración de las autoras.

Asimismo, se debe tener presente en el momento de evaluar distintas opciones que, en casos reales, donde se han adoptado materiales alternativos, existen otras prioridades que afectan a la elección de materiales. Un estudio internacional de equipos de diseño realizado en 2012 por Ove Arup & Partners-ARUP para el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (CEMDS), demostró que a pesar de que un gran número de factores determinan la selección del material, el coste económico era el criterio de prioridad, y la sostenibilidad del material tenía menos influencia aunque existieran conocimiento y experiencias anteriores por parte del personal técnico (ARUP y CEMDS, 2012). Incluso otras soluciones basadas en arrojar sombra a las fachadas vidriadas no siempre resultan las mejores opciones para el ahorro energético, pues implican un mayor consumo en las estaciones de invierno para alcanzar el confort térmico (Jara, 2013).

El tradicional arraigo de la economía en la toma de decisiones, en este sector, fortalece la propuesta de la inclusión de la evaluación del impacto ambiental a través de los presupuestos de los proyectos de construcción, ya que el control de costes forma parte de la cultura del sector de la edificación y puede

BANCO CUANTIFICACIÓN RECURSOS (BCRR)									
NOMBRE DEL CAPÍTULO/SUBCAPÍTULO									
Nombre del apartado									
CÓDIGOS			Unidad	Descripciones	Cuantificación				Precios
PUS	PA	PB			Q _M	F _R	Q PUS	IMPORTE PUS Σ PB/PA	
Código Precio Unitario Simple (PUS)			u	Descripción PUS	Cantidad ΣQ _u (PB/PA)				
Código Precio Auxiliar(PA)			u	Descripción PA	Cantidad PA = Σ MAT, MO y MAQ				PA= Σ PB MAT. MO y MAQ
Código (PB)			u	MATERIALES	Cantidades materiales (MAT)				PB materiales (MAT)
Código (PB)			u	MANO DE OBRA	Cantidades mano de obra (MO)				PB mano de obra (MO)
Código (PB)			u	MAQUINARIA	Cantidades maquinaria (MAQ)				PB maquinaria (MAQ)

Tabla 1. Esquema de la estructura de precios del BCCA. Fuente: Rivero, Muñoz y Marrero, 2018.

servir para introducir aspectos medioambientales en los criterios de selección.

Anteriormente, se han empleado indicadores que seguían la metodología del ACV (Zabalza-Bribián, Valero y Aranda, 2011; Malmqvist y Glaumann, 2009). En la actualidad, existe una tendencia a emplear metodologías más simples que sean fácilmente entendidas por la sociedad y cuya aplicación sea más rápida y directa, como la de la Huella de Carbono (HC). Los resultados que esta produce son comprensibles por el ámbito no académico, además de que presenta una fácil aplicación en políticas medioambientales y toma de decisiones (Solís-Guzmán, Martínez-Rocamora y Marrero, 2014). En concreto, se emplea el indicador HC desde la perspectiva de un presupuesto ambiental a través de los bancos de costes de la construcción, donde se tienen en cuenta los recursos necesarios durante el ciclo de vida del edificio (CVE) (extracción de materias primas, transformación en materiales, utilización en obra, demolición y reconstrucción).

En este artículo se analizan dos casos de estudio, con diferente porcentaje de fachada acristalada, a los cuales se les realiza una comparativa a lo largo del CVE completo, siguiendo la metodología ARDITEC (*ibidem*). Para ello, se seleccionan los vidrios que aportan al edificio las mismas mejoras a nivel de eficiencia energética que la implantación de las películas de control solar estudiadas. Esto hace que ambas soluciones ahorren lo mismo, posibilitando la comparativa aislada a nivel económico y ambiental de la energía, como también de emisiones incorporadas en los materiales. El estudio quiere dar respuesta a la rentabilidad en términos de ACV, comparando dos soluciones constructivas: la colocación de láminas de control solar frente a la sustitución de ventanas; teniendo en cuenta que la renovación con películas de control solar tiene en contraposición la corta vida útil de las mismas, siendo necesario sustituirlas cada 10 años, mientras las ventanas pueden durar hasta 30 años. Finalmente, se comparten las conclusiones del análisis de CVE que, en ambos casos de estudio, arrojan resultados favorables al uso de las películas de control solar, frente a la sustitución de ventanas como medida de mejora de la eficiencia energética de edificios.

METODOLOGÍA

En el presente trabajo se utiliza la metodología del grupo ARDITEC (Arquitectura Diseño y Técnica) de la Universidad de Sevilla, para la evaluación ambiental de las soluciones constructivas estudiadas. Este grupo emplea los presupuestos de los proyectos de edificación como vehículo para la incorporación del impacto ambiental, añadiendo este aspecto a los costes del proyecto (Freire, Muñoz y Marrero, 2016). El presupuesto descompone los elementos del proyecto según las mediciones; conociendo así, a través de las partidas, los rendimientos y cantidades de recursos empleados (materiales, maquinaria y mano de obra) (Figura 1). La metodología se aproxima a un "presupuesto ambiental", facilitando su entendimiento por los técnicos del sector, lo cual incentiva su aplicación.

METODOLOGÍA ARDITEC Y USO DE LA CLASIFICACIÓN SISTEMÁTICA

Para la evaluación y cuantificación de la HC en el CVE de las soluciones, se parte de una adaptación del modelo desarrollado en Solís-Guzmán, Marrero y Ramírez (2013) y Marrero *et al.* (2014). La base de la metodología HC en edificación ha sido la cuantificación de los recursos consumidos en los proyectos (Figura 1), a través de la clasificación sistemática del Banco de Costes de la Construcción de Andalucía (BCCA) (Consejería de obra pública y vivienda de la Junta de Andalucía, 2018). El BCCA tiene una estructura piramidal (Tabla 1) mediante la cual diferencia tres tipos de precios: los Precios Básicos (PB), considerándose estos como el coste por unidad de un elemento básico en condiciones de ser aplicado en obra; los Precios Auxiliares (PA), formados por una combinación de PB en proporciones constantes que interviene como componente en el cálculo del precio de una unidad de obra; y, por último, se encuentran los Precios Unitarios Simples (PUS), conformados por una combinación de PB o PA (Ramírez-de-Arellano y Marrero 2010). Los PUS se corresponden con una unidad terminada de un elemento constructivo.

Subcapítulo 11R REPOSICIONES							
Apartado 11RV Ventanas							
Grupo 11RV5 Sustituciones				Coste económico		Coste ambiental	
11RV50230	m2	SUSTITUCION DE VENTANA DE ACERO INOX C/RPT, T. IV, M. MANUALES, CON VIDRIO BAJO EMISIVO Y CONTROL SOLAR		€/ud ref	€ total	t CO2/ud ref	t CO2 total
Ventana de hojas abatibles, con rotura de puente térmico, ejecutada con perfiles de acero inoxidable con espesor de 1,5 mm y RPT, tipo IV (>3 m2), incluso prececeo de perfil tubular conformado en frío de acero galvanizado con patillas de fijación, junquillos, junta de estanqueidad de neopreno, vierteaguas, herrajes de coigiar y cierre y p.p. de sellado de juntas con masilla elástica. La carpintería debe cumplir los parámetros de permeabilidad, estanqueidad y resistencia al viento en las zonas C o D, se incluye vidrio termoacústico doble (8+14+8+8-Argón), bajo emisivo y con control solar, construido según CTE.							
01KLV90001	1,012	m2	DEMOLICIÓN SELECTIVA M. MAN. DE VENTANA CON PERFILES DE ALUM.	5,48	5,56	0,00	0,00
11LVA00153	1	m2	VENTANA ABATIBLE ALUM. LACADO TIPO IV (> 3 m2)	101,62	101,62	0,02	0,02
06VWR80060	1,012	m2	RECIBO DE CERCOS EN CERRAM. EXTERIORES (FAB. REVESTIR)	15,35	15,53	0,01	0,01
12L TI80020	1	m2	ACRIST. TERMOACÚSTICO DOS LUNAS PULIDAS INCOLORAS CON BAJA EMISIVIDAD 6 mm	48,58	48,58	0,01	0,01
TOTAL EURC:				171,28		TOTAL HC:	0,04

Tabla 2. Muestra del BCCA, ejemplo de precio con recursos desglosados. Fuente: Elaboración de las autoras a partir de Solís, Rivero y Alba (2018).

Siguiendo la metodología contenida en la Tabla1, se presenta, en la Tabla 2, un ejemplo de estimación del PUS, de sustitución de ventana medido en superficie (m²). A través de los rendimientos de los precios (Q_M), incluyéndose el porcentaje de pérdidas (F_R), se obtiene el QPUS, el total de recursos consumidos del PUS, que es equivalente a ΣQu, que constituye, a su vez, el sumatorio total de los distintos recursos: materiales consumidos (MAT), horas totales de mano de obra (MO) y maquinaria empleada (MAQ).

Para el modelo de evaluación ambiental, se sigue esta misma estructura presupuestaria, donde a cada recurso se le asignan una serie de coeficientes para el cálculo de su HC, en lugar de los euros de su coste.

Previamente, ha sido necesario analizar las soluciones constructivas de las edificaciones portuguesas, así como sus rendimientos en la puesta en obra, verificando la viabilidad de adaptación del modelo de presupuestación español, tal y como Rivero, Muñoz y Marrero (2018) hicieron para las construcciones chilenas.

PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA LA APLICACIÓN DEL INDICADOR HC

El modelo de cálculo de HC en el CVE, se muestra en la Figura 1. Se pueden apreciar los diferentes conceptos clasificados en varios niveles (fuentes de impacto y huellas). En definitiva, el modelo de cálculo de HC determinará la huella total que, a su vez, se compone de diferentes huellas parciales: HC de la fase de construcción, HC de renovación y HC de limpieza y mantenimiento. Éstas provienen de los impactos generados por los recursos, la energía y la generación de emisiones de CO₂. Estos conceptos son catalogados en el esquema como elementos intermedios y su misión es transformar esos consumos en elementos que permitirán definir las distintas huellas parciales que componen la huella global.

Se estudiará el CVE de forma parcial: sólo la energía incorporada y sus correspondientes emisiones de los

elementos en el presupuesto de las obras en cada etapa de la vida del edificio, desde la construcción hasta la rehabilitación energética del edificio, pasando por su mantenimiento. Respecto a la fase de construcción, se obtiene la HC de los casos de estudio haciendo uso de la herramienta informática OERCO2 (Herramienta interactiva para el cálculo de emisiones de CO2 en los procesos constructivos), desarrollada por el grupo ARDITEC (Solís, Rivero y Alba, 2018). En la siguiente etapa del CVE (uso y mantenimiento), que es la de mayor extensión en el tiempo, se debe diferenciar dos periodos: uno de uso previo a las obras de renovación, hasta los 20 años de vida del edificio, y la etapa posterior a la renovación, hasta el final de su vida útil. Se tendrán en cuenta, por un lado, los consumos directos de recursos materiales y energía, requeridos en las obras de renovación (Alba-Rodríguez et al., 2017) y, por otro, aquellas actuaciones de conservación y limpieza del inmueble durante su uso (Martínez-Rocamora, Solís y Marrero, 2016b).

ELABORAR EL INVENTARIO DE RECURSOS.

El primer paso del cálculo es la elaboración de un inventario, que incluye todas las entradas del edificio y que se puede llevar a cabo mediante la generación del presupuesto del proyecto. En este documento, todos los recursos se ordenan en base a la Clasificación Sistemática (Ramírez-de-Arellano-Agudo, A., 2010), pudiéndose simplificar en tres categorías: materiales, maquinaria y mano de obra. El resumen de todas las ecuaciones empleadas para los cálculos, se recoge en la Tabla 3.

Materiales de construcción.

Para obtener la HC de cada elemento constructivo, en primer lugar, se obtiene el peso de los materiales utilizados, a estos se les aplica las bases de datos de ACV, las cuales definen las emisiones de CO₂ equivalentes (t CO₂ eq) que contiene cada kg de material. La base de datos ambiental empleada es Ecoinvent, implementada en SimaPro y desarrollada por el Swiss Center for Life Cycle Inventories, debido a su transparencia en el desarrollo de procesos, consistencia, referencias y el destacado hecho

	n° ecuación
Materiales	
HC _{MAT} : HC de materiales de construcción (tCO ₂ eq)	
HC _{MAT} = (∑ _i Cm _i x E _{MAT} _i) + (HC _{TRAN} x Cm _T)	1
Cm _i : consumo del material i (kg)	
E _{MAT} : emisiones por material (tCO ₂ eq/kg material)	
HC _{TRAN} : huella de carbono del transporte de materiales de construcción (tCO ₂ eq/kg)	
Maquinaria	
V: consumo de combustible (litros)	
V = (Pot x TU x Rend)	2
Pot: potencia de motor de la maquinaria eléctrica (kW)	
TU: tiempo utilización según mediciones (horas)	
Rend: combustible consumido por el motor según sea gasoil o gasolina (l/kWh)	
HC _{COMB} : HC consumo combustible (fósil) de maquinaria (tCO ₂ eq)	
HC _{COMB} = V x E _{COMB}	3
E _{COMB} : factor de emisión del combustible (tCO ₂ eq/litros). Dato: 2.616 kg CO ₂ /l (IDAE, 2011);	
HC _{ELEC} : HC consumo electricidad de maquinaria (tCO ₂ eq)	
HC _{ELEC} = (Pot x TU) x E _{ELEC}	4
E _{ELEC} : factor de emisión del mix energético (kg CO ₂ /kWh). Dato: 0.248 kg CO ₂ /kWh (REE 2014).	

Tabla 3. Resumen de ecuaciones para el cálculo de HC. Fuente: Elaboración de las autoras a partir de Alba-Rodríguez et al., 2017.

de que fusiona información de varias bases de datos internacionales de la industria de la construcción (Martínez-Rocamora Solís y Marrero, 2016a). Con el fin de obtener las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en t CO₂ eq, se analiza el Inventario de Ciclo de Vida de los materiales, empleando la metodología IPCC 100a incluida en la herramienta Simapro, la cual estima la cantidad de GEI para 100 años de ciclo de vida (Figura 1); y para estimar la HC se aplica la ecuación 1 expuesta en la Tabla 3. Esta metodología para el cálculo del impacto del material toma en cuenta la energía y las emisiones durante el ciclo de vida, desde la cuna hasta el sitio de construcción respectivo, lo que, por tanto, incluye su transporte. Este último se define para las distancias promedio recorridas por cada familia de materiales.

Maquinaria.

Se analiza, en ese punto, la HC provocada por la utilización de maquinaria, concretamente por su consumo de energía (tanto de combustible como eléctrica), vinculándola con la potencia de su motor. Por un lado, se calcula el consumo con la ecuación 2 y, por otro, la HC del consumo de combustible fósil a partir de la ecuación 3 (Tabla 3).

Para determinar el consumo de la maquinaria eléctrica utilizada en obra se sigue un camino similar, analizando la

potencia de motor y las horas de utilización, lo que permite definir los kWh totales consumidos. A este dato se le aplica el coeficiente que indica las emisiones de CO₂eq generadas para la producción de un kWh de energía por el sistema eléctrico del país (ecuación 4) (Marrero, y Freire, 2015).

Residuos de construcción y demolición (RCD).

Los RCD son los restos, desperdicios o productos de demolición de los materiales de la obra. En consecuencia, no tendrán HC por sí mismos ya que esta fue contabilizada en la entrada de materiales. En su lugar, sí será necesario un gasto imputable a los RCD, de horas de maquinaria y mano de obra, necesarias para el acopio y retirada al vertedero.

ESTUDIO DE CASOS

DESCRIPCIÓN DE LOS EDIFICIOS ESTUDIADOS

Se presenta el estudio de dos casos prácticos para edificios de uso público con altos porcentajes de huecos en sus fachadas. Ambos casos se sitúan en la ciudad de Lisboa, Portugal. El primero de ellos (Figura 2) corresponde a un edificio de oficinas administrativas y el segundo (Figura 3) es un edificio destinado a aulas de estudios y gabinetes; ambos de uso público. Las características de los inmuebles analizados, se recogen en la Tabla 4.



Figura 2. Edificio público de Lisboa, caso de estudio 1. Fuente: Elaboración de las autoras.



Figura 3. Edificio de gabinetes y aulas de Lisboa, caso de estudio 2. Fuente: Elaboración de las autoras y fotos aéreas de Google Maps.

	Caso de estudio 1	Caso de estudio 2
Superficie construida	17.400 m ²	4.677,8 m ²
Plantas	4	2
Sótanos	1	2
Superficie de vidrios	1.731,95 m ²	444,6 m ²
Marcos de ventanas	Acero inox. Con RPT	Aluminio lacado sin RPT
Vidrios iniciales	8+14+5+5AR bajo emisivo y control solar; U=1,1 W/m ² °K.	6+12+4 Climalit; U=2,82 W/m ² °K.
Vidrios mejorados equivalentes	8+14+8+8AR bajo emisivo y control solar; U=1,0 W/m ² °K.	6+14+6 Climalit U=2,7 W/m ² °K.
Películas de control solar del estudio	Lámina exterior A	Lámina interior B

Tabla 4. Características de los casos de estudio. Fuente: Elaboración de las autoras.

Con respecto al examen de la energía operativa, se realizó un análisis del rendimiento energético de ambos edificios, con y sin película de control solar, a través de modelos numéricos calibrados en el programa de simulación energética EnergyPlus. Los resultados obtenidos revelaron que las películas de control solar aplicadas por el exterior y por el interior del acristalamiento reducen las necesidades útiles con refrigeración durante el período de verano y aumentan las necesidades útiles con calefacción y las necesidades de energía primaria con iluminación durante el invierno. La película de aplicación por el exterior (caso de estudio 1) y por el interior (caso de estudio 2), redujo las necesidades de energía útil sobre un 54-59% y un 25-46%, respectivamente.

El uso de películas de control solar disminuye el pico de temperatura de espacios interiores con acristalamiento orientado al sur, localización de mayor incomodidad térmica, en ambos casos entre 12,4°C y 11,2°C, respectivamente, en el día de temperatura media diaria más elevada en la estación de verano.

FASES ESTUDIADAS Y DURACIÓN DE LAS MISMAS

Se establece la hipótesis de que la duración de las obras de construcción para ambos edificios será de un año. La fase de uso se inicia en el año siguiente. Para la estimación de la HC en la fase del uso del edificio, se tendrá en cuenta los consumos de recursos producidos por las tareas de limpieza y mantenimiento (Martínez-Rocamora, Solís y Marrero, 2016b). En la fase de uso, se diferencian dos períodos: el pre-renovación y el post-renovación. En este estudio, ya que el objetivo es llevar a cabo una comparativa entre la mejora de los vidrios con la implantación de películas de control solar frente a la sustitución de ventanas, las obras de renovación que se plantean en el CVE son exclusivamente las referentes a los huecos, con el fin de eliminar otras variables que pudieran distorsionar los resultados. Además de ello, y teniendo en cuenta que la vida útil de las ventanas

rondan los 30-50 años, el periodo a analizar será de 50 años, puesto que se entiende que después del transcurso de los mismos, la funcionalidad de las ventanas entrarían en obsolescencia, motivando la sustitución de las mismas. Llegados a esta etapa de la vida del edificio, y una vez que se plantea la sustitución de las ventanas, el uso continuado de las películas no estaría justificado, porque obviamente en la renovación de los huecos se instalarían unas ventanas que proporcionarían la eficiencia energética necesaria para el edificio. En cuanto a la vida útil de las películas de control solar, los fabricantes la establecen en 10 años, por lo que las reposiciones serán realizadas 3 veces durante el periodo estudiado. En la Figura 4, se muestra de forma esquemática dicho periodo.

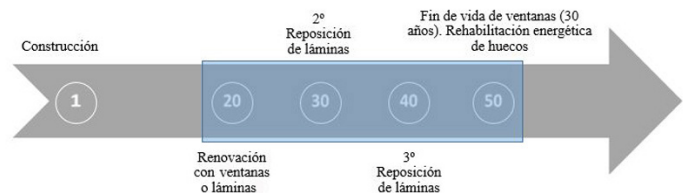


Figura 4: Línea de tiempo: fases e intervenciones en el periodo estudiado. Fuente: Elaboración de las autoras.

RECURSOS ANALIZADOS

En los análisis efectuados, para eliminar la variante de mejora en la eficiencia energética del edificio por el cambio de ventanas y, por ende, del ahorro de emisiones que se podría generar al medioambiente, se opta por calcular la ventana equivalente (según las propiedades térmicas y lumínicas) a las que se obtienen al implantar las películas de control solar a las ventanas existentes. Es decir, que las condiciones lumínicas y térmicas en el interior del edificio serán las mismas si se colocan las películas de control solar que si se ejecutan las obras de sustitución de las ventanas. Los recursos tenidos en cuenta para cada propuesta de

colocación de láminas		sustitución de ventanas	
0,356 h	Personal colocador	1,02 m2	Demolición de ventana existente
3 m2	Alquiler de andamio en fachada	0,3 h	Personal colocador
1 m2	Limpieza de ventana	1 m2	Ventana abatible RPT
1 m2	Lámina de control solar	1,02 m2	Recibido de cercos
2 u	Material complementario	1 m2	Acristalamiento B.E y C. Solar

Tabla 5. Recursos por m2 para las propuestas de renovación. Fuente: Elaboración de las autoras a partir de BCCA y datos de fabricantes.

		CASO DE ESTUDIO 1	CASO DE ESTUDIO 2
Construcción (Solís, Rivero y Alba, 2018)	HC (t CO ₂ eq) Año 1	10431,30	2578,60
	Maquinaria (h/m ²)	9,48E-05	9,59E-05
	HC (t CO ₂ eq/m ²)	0,6	0,55
	Presupuesto (€/m ²)	903,5	775,04
Limpieza y mantenimiento (Alba-Rodríguez et al., 2017), y (Martínez-Rocamora Solís y Marrero, 2016b),	HC (t CO ₂ eq) Años 2-50	6367,17	1711,74
	HC (t CO ₂ eq/año)	127,34	34,23
	HC (t CO ₂ eq/m ² /año)	0,007	0,007
	Presupuesto (€/m ² /año)	146,31	146,31
Renovación A (sustitución de ventanas)	HC (t CO ₂ eq) Año 20	75,00	17,44
	HC (t CO ₂ eq/renovación)	75,00	17,44
	HC (t CO ₂ eq/m ² /renovación)	0,0043	0,0037
	Presupuesto (€/m ² /renovación)	210,31	171,28
Renovación B (mejora con películas de c. solar)	HC (t CO ₂ eq) Años 20, 30 y 40	22,01	5,09
	HC (t CO ₂ eq/renovación)	7,336	1,70
	HC (t CO ₂ eq/m ² /renovación)	0,00042	0,00036
	Presupuesto (€/m ² /renovación)	62,75	57,50

Tabla 6. Comparativa de HC resultante del estudio. Fuente: Elaboración de las autoras.

renovación en el cálculo del impacto ambiental con HC, según el modelo descrito anteriormente, se exponen en la Tabla 5.

RESULTADOS

La Tabla 6 muestra los resultados de HC y el presupuesto económico para tres de las fases del CVE, focalizándose en las partidas de obras y actividades que mayor impacto ocasionan. Todos los valores son extrapolados a la superficie edificada con el fin de poder comparar los resultados, lo cual facilitará su gestión y control. Los datos obtenidos del impacto de la fase de construcción han sido obtenidos a través de la herramienta OERCO2 (Solís, Rivero y Alba, 2018); y, para la fase de limpieza y mantenimiento, se han

extrapolado los valores obtenidos en Alba-Rodríguez et al. (2017) y Martínez-Rocamora, Solís y Marrero (2016b) -trabajos previos del grupo ARDITEC-, debido a que, según los objetivos fijados en esta investigación, no existen diferencias entre los recursos necesarios para la limpieza y el mantenimiento de ventanas con o sin láminas adheridas. Los impactos resultantes de los análisis de ambas renovaciones se muestran en la Tabla 6.

Centrándose en el objetivo principal de la investigación, es posible evidenciar que la propuesta de colocación de películas de control solar con respecto a la de ventanas, en ambos casos de estudio, representa una disminución de emisiones de alrededor de un 70% respecto a la sustitución de las ventanas (ver Figura 5). Aunque la propuesta de la mejora con películas de control solar precise de mayor

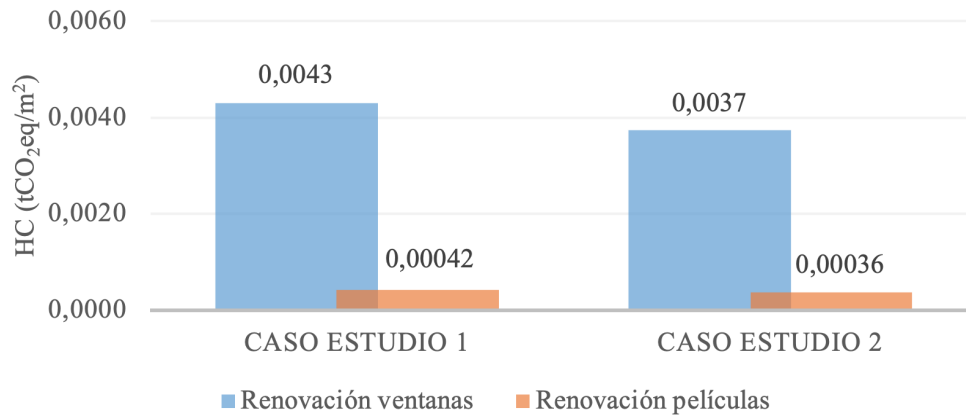


Figura 5. Comparativa del impacto ambiental de las propuestas de renovación energética estudiada. Fuente: Elaboración de las autoras.

frecuencia en las reposiciones de su mantenimiento por tener una vida útil menor a las ventanas, esto se ve compensado por el bajo impacto de las mismas por superficie instalada. Por lo tanto, se puede afirmar que, para el caso planteado, la propuesta de la renovación con películas de control solar, logra aportar mejoras en la eficiencia energética y en el confort interior del edificio, optimizando así el impacto ambiental y económico.

Dado que el análisis se realiza para la mitad del CVE (50 años), el impacto de la construcción es el de mayor en HC, representando este sobre el 60% de tal impacto, y el 40% restante estaría motivado por las labores necesarias en la fase de uso (Figura 6).

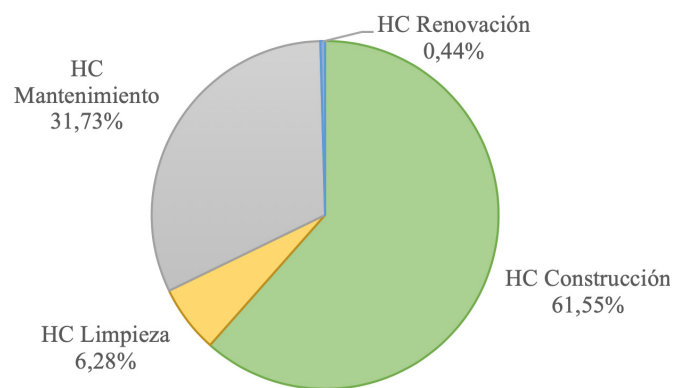


Figura 6. Distribución del impacto ambiental en el periodo de CVE analizado. Fuente: Elaboración de las autoras.

CONCLUSIONES

A partir de la investigación aquí expuesta, se ha podido comprobar la viabilidad del modelo desarrollado para su uso en análisis comparativos para la selección de propuestas en las obras de rehabilitación energética de edificios, desde la perspectiva de la energía y emisiones incorporadas en las soluciones constructivas, así como su adaptación internacional.

La diferencia de superficie vidriada de fachada, en los estudios de casos, no es significativa en los resultados. Los análisis de CVE efectuados arrojan resultados favorables en cuanto a la mejora de las ventanas con las películas de control solar, frente a la sustitución de ventanas, desde el punto de vista de impacto ambiental de los materiales y la maquinaria empleados en las actuaciones de renovación.

Asimismo, los resultados en el análisis de CVE, en ambos casos de estudio, arrojan resultados favorables en el uso de las películas de control solar frente a la sustitución de ventanas, como medida de mejora de la eficiencia

energética de edificios: efectivamente, las emisiones son inferiores en un 70% con respecto a las que generan la sustitución de las ventanas.

El modelo y la metodología planteados dan respuesta sobre cuál es la mejor opción, tanto a nivel económico como ambiental, cuando se trata de optimizar las características térmicas y lumínicas las ventanas. La implantación con películas de control solar, aun precisando más reposiciones durante la vida del edificio, representa un ahorro en emisiones incorporadas en comparación con la sustitución de la ventana completa. En el presente análisis de ACV, la colocación de las películas por el interior o exterior no influye significativamente. Esto es debido a que la cantidad de recursos materiales y de maquinaria empleados para la colocación no varía, hallándose la diferencia en el tiempo de mano de obra necesaria (mayor para la instalación por el exterior). De igual modo, el ítem de mano de obra no es cuantificado en la metodología, ya que así se indica en la normativa UNE-EN ISO 15798 de ACV en los edificios

(Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012). Por el contrario, las simulaciones energéticas realizadas en los casos de estudio, devuelven mejores resultados cuando las láminas son colocadas por el exterior. Será necesario continuar con los trabajos de simulaciones energéticas en ambos casos de estudio y seguir experimentando en investigaciones futuras, para determinar las mejoras en la eficiencia energética en distintas orientaciones y colocación de diversas láminas, así como monitorizar los espacios con el propósito de obtener las diferencias reales de consumos.

La metodología establecida en el presente estudio proporciona directrices para los diseñadores y constructores de proyectos que busquen el equilibrio entre la influencia del presupuesto económico y el ambiental en el CVE; y, consecuentemente, la incorporación en la toma de decisiones del impacto ambiental que las diversas soluciones generan.

AGRADECIMIENTOS

La autora Cristina Rivero agradece la ayuda recibida para la realización de la estancia que ha posibilitado los análisis presentados, siendo financiada por una beca del V Plan propio de la Universidad de Sevilla. La autora Júlia Pereira desea agradecer el apoyo de FCT (Fundación para la Ciencia y la Tecnología) PhD Grant FCT PD / BD / 127848/2016.

Se agradece también al Instituto Superior Técnico de la Universidade de Lisboa, por la acogida para el desarrollo del trabajo, y a las empresas colaboradoras de vidrios y películas de control solar que han cedido los datos de sus productos para este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA RODRÍGUEZ, M^a Desirée; GONZÁLEZ VALLEJO, Patricia; MARTÍNEZ ROCAMORA, Alejandro; FERREIRA SÁNCHEZ, Antonio y MARRERO, Madelyn. Building Rehabilitation Versus Demolition and New Construction: Economic and Environmental Assessment, *Environmental Impact Assessment Review*, 2017, vol. 66, pp. 115-126.

ÁLVAREZ, G., JIMÉNEZ, D. y C. ESTRADA, C. Thermal performance of solar control coatings: a mathematical model and its experimental verification, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1998, vol. 31, pp. 2249-2257.

ÁLVAREZ, G., FLORES, J. y CORTINA, C. Heat transfer through a duovent glass with chemically deposited solar control coating. En: *ISES Solar World Congress*, II, 1999, pp. 199-204.

ARUP y CONSEJO EMPRESARIAL MUNDIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE (CEMDS): *Material choice for green buildings*, 2012.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. *Sostenibilidad de las obras de construcción. Evaluación del desempeño ambiental de los edificios. Método de cálculo*. UNE-EN 15978, 2012.

CONSEJERÍA DE OBRA PÚBLICA Y VIVIENDA DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA. *Base de Costes de la Construcción en Andalucía. BCC* [en línea]. [Consultado 17 julio 2018]. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/portal-web/web/areas/vivienda/texto/7a0899c8-0038-11e4-8cc4-27ee69a25823>

FREIRE GUERRERO, Antonio; MUÑOZ MARTÍN, Javier y MARRERO MELÉNDEZ, Madelyn. Incorporación de huella de carbono y huella ecológica en las bases de costes de construcción. Estudio de caso de un proyecto de urbanización en Écija, España, *Hábitat Sustentable*, 2016, vol. 6, n.º 1, pp. 6-17.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA - IDAE. *Factores de conversión a Energía Primaria y factores de emisión de CO2*, 2011. Madrid: IDAE, 2011.

JARA, Jazmín. Protecciones solares y su implicancia en la demanda energética: caso edificio público en Concepción, Chile, *Hábitat Sustentable*, 2013, vol. 3, n.º 1, pp. 47-61.

KUCHEN, Ernesto; PLESSER, Stefan y FISCH, Manfred Norbert. Eficiencia Energética y Confort en Edificios de Oficina: el Caso Alemán, *Hábitat Sustentable*, 2012, vol. 2, n.º 2, pp. 34-44.

LOURENÇO, David. Estudo experimental do desempenho de envidraçados com películas de controlo solar. dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil intitulada – DECivil, IST, 2016.

LOURENÇO, David; GOMES, M. Gloria; MORET RODRIGUES, A. Monitorização do desempenho de envidraçados com películas de controlo solar num período de inverno/meia estação, *Revista TechITT*, 2017, vol. 15, n.º 40, pp.4-14.

MALMQVIST, Tove y GLAUMANN, Mauritz. Environmental efficiency in residential buildings - A simplified communication approach, *Building and Environment*, 2009, vol. 44, n.º 5, pp. 937-947.

MARRERO, Madelyn; FONSECA, Antonio; FALCON GANFORNINA, Raúl Manuel y RAMÍREZ DE ARELLANO AGUDO, Antonio. Schedule and Cost Control in Dwelling Construction Using Control Charts, *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2014, vol. 8, pp. 63-79.

MARRERO, Madelyn y FREIRE GUERRERO, Antonio. Evaluación a través del presupuesto de la energía incorporada al proyecto de edificación, *Hábitat Sustentable*, 2015, vol. 5, n.º 1, pp. 54-63.

MARTÍNEZ ROCAMORA, Alejandro; SOLÍS GUZMÁN, Jaime y MARRERO, Madelyn. Toward the Ecological Footprint of the use and maintenance phase of buildings: Utility consumption and cleaning tasks, *Ecological Indicators* [en línea], 2016a, vol. 69, pp. 66-77. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.04.007

MARTÍNEZ ROCAMORA, Alejandro; SOLÍS GUZMÁN, Jaime y MARRERO, Madelyn. LCA databases focused on construction materials: A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016b, vol. 58, pp. 565-573.

PEREIRA J. *Simulação energética de películas em envidraçados*. dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil intitulada – DECivil, IST, 2015.

RAMÍREZ-DE-ARELLANO AGUDO, Antonio. *Presupuestación de obras*. Sevilla: Secretariado de la Universidad de Sevilla, 2010.

RAMÍREZ-DE-ARELLANO AGUDO, Antonio y MARRERO, Madelyn. The building cost system in Andalusia: application to construction and demolition waste management, *Construction Management and Economics*, 2010, vol. 8, n° 5, pp.495-507.

RED ELÉCTRICA ESPAÑOLA - REE. *El sistema eléctrico español*. Madrid: REE, 2014.

REGLAMENTO UE 2018/841 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO DE 30 de mayo de 2018, sobre la inclusión de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero resultantes del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura en el marco de actuación en materia de clima y energía hasta 2030, y por el que se modifican el Reglamento (UE) n.º 525/2013 y la Decisión n.º 529/2013/UE.

RIVERO CAMACHO, Cristina; MUÑOZ SANGUINETTI, Claudia y MARRERO, Madelyn. Cálculo de la Huella Ecológica en el ciclo de vida para la fase de urbanización de un conjunto habitacional en Chile, bajo el modelo ARDITEC. *Intersecciones 2017. II Congreso Interdisciplinario de Investigación en Arquitectura, Diseño, Ciudad y Territorio*. Santiago de Chile: ARQ Ediciones, Universidad Católica, 2018, pp. 82-99.

RONGXIN Yin; PENG Xu y PENGYUAN Shen. Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai. *Energy and Buildings*, 2011, vol. 45, pp. 132-140.

RUBIN, Michael. Calculating heat transfer through Windows, *Energy Research*, 1982, vol. 6, pp. 341-349.

SOLÍS-GUZMÁN, Jaime; MARRERO, Madelyn y RAMÍREZ-DE-ARELLANO, Antonio. Methodology for Determining the Ecological Footprint of the Construction of Residential Buildings in Andalusia (Spain), *Ecological Indicators*, 2013, vol. 25, pp. 239-249.

SOLÍS-GUZMÁN, Jaime; MARTÍNEZ-ROCAMORA, Alejandro y MARRERO, Madelyn. Methodology for determining the carbon footprint of the construction of residential buildings. *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors*, Springer, 2014, vol. 1, pp. 49-83.

SOLÍS-GUZMÁN, Jaime; RIVERO CAMACHO, Cristina; ALBA RODRÍGUEZ, Mª Desirée y MARTÍNEZ ROCAMORA, Alejandro. Carbon Footprint Estimation Tool for Residential Buildings for Non-Specialized Users: OERCO2 Project, *Sustainability* [en línea], 2018, vol. 10, n° 1359. DOI: 10.3390/su10051359

WORLD WIDE FUND NATURE - WWF, 2010. *Comparecencia de la Ministra de Vivienda en la Comisión Mixta de Cambio Climático el 22 de septiembre de 2009. Potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO2 del parque residencial existente en España en 2020*. Informe WWF, diciembre, 2010.

ZABALZA-BRIBIÁN, Ignacio; VALERO-CAPILLA, Antonio y ARANDA-USÓN, Alfonso. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential, *Building and Environment*, 2011, vol. 46, n° 5, pp. 1133-1140.