

CIUDAD Y TERRITORIO

ESTUDIOS TERRITORIALES

ISSN(P): 1133-4762; ISSN(E): 2659-3254

Vol. LIV, Nº 211, primavera 2022

Págs. 115-136

<https://doi.org/10.37230/CyTET.2022.211.7>

CC BY-NC-ND



Utilización de datos catastrales para la planificación de la rehabilitación energética a escala urbana: aplicación a un barrio ineficiente y vulnerable de Madrid

Fernando MARTÍN-CONSUEGRA ⁽¹⁾Fernando DE FRUTOS ⁽²⁾Agustín HERNÁNDEZ-AJA ⁽³⁾Ignacio OTEIZA ⁽⁴⁾Carmen ALONSO ⁽⁵⁾Borja FRUTOS ⁽⁶⁾

(1)(2) (4) (5) y (6): Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
(3) Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio
Universidad Politécnica de Madrid

Resumen: El trabajo que se presenta describe el desarrollo de un método para la estimación de la demanda energética de calefacción de barrios, recopilando los datos catastrales existentes para cada edificio. La automatización del procesamiento de datos permite obtener modelos energéticos de la edificación residencial a la escala urbana con una gran precisión. La metodología propuesta incluye un procedimiento de evaluación para la incorporación de medidas pasivas para la mejora de la eficiencia energética que posibilita la cuantificación de los beneficios obtenidos por las operaciones de

Recibido: 04/12/2020; Revisado: 17.03.2021.

Correo electrónico martin-consuegra@ietcc.csic.es; N° ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2714-6910>;

Correo electrónico: fernando.defrutos@ietcc.csic.es; N° ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6725-1096>;

Correo electrónico: agustin.hernandez@upm.es; N° ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4485-058X>;

Correo electrónico: ioteiza@ietcc.csic.es; N° ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7815-3109>;

Correo electrónico: c.alonso@ietcc.csic.es; N° ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5606-9950>

Correo electrónico: borjafv@ietcc.csic.es; N° ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6969-1722>

Los autores agradecen los comentarios y sugerencias realizadas por los evaluadores anónimos, que han contribuido a mejorar y enriquecer el manuscrito original.

Agradecimientos: Al Proyecto de investigación BIA2017-83231-C2-1-R. "Nueva herramienta integrada de evaluación para áreas urbanas vulnerables. Hacia la autosuficiencia energética y a favor de un modelo de habitabilidad biosaludable". Proyecto Habita_RES – (2018-2021) MINECO -Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad.

rehabilitación de edificios a escala urbana, así como la estimación de los costes necesarios para su ejecución. El método se valida mediante el estudio de caso de un barrio situado en la periferia de Madrid: el Poblado Dirigido de Canillas. Se diagnostica el estado actual del barrio y se evalúa el potencial de mejora resultado de la incorporación de aislamiento térmico en la envolvente opaca de todos los edificios anteriores al año 1979.

Palabras clave: Rehabilitación energética; Ciencia de datos urbanos; Catastro; Demanda energética; Mejora de envolventes

Use of cadastral data for energy retrofit planning at an urban scale: application to an inefficient and vulnerable neighborhood in Madrid

Abstract: The work presented here describes the development of a method for the estimation of the energy demand for heating districts by collecting the existing cadastral data from each building. The automation of the data processing allows to obtain energy models of the residential building at the urban scale with a high precision. The proposed methodology includes an evaluation procedure for the incorporation of passive measures for the energy efficiency improvement. This procedure allows the quantification of the benefits obtained by building retrofit at an urban scale, as well as the calculation of the cost estimates for its implementation. The method is validated through the case study of a neighborhood located on the outskirts of Madrid: the 'Poblado Dirigido de Canillas'. The paper diagnoses the current state of the neighborhood and evaluates the improvement potential resulting from the incorporation of thermal insulation in the opaque envelope of every building constructed prior to 1979.

Keywords: Energy refurbishment; Urban data science; Cadastre; Energy needs; Envelope retrofit

1. Introducción

La Unión Europea apuesta por la rehabilitación del parque edificado a gran escala. Varios de los Estados miembros han instado a la Comisión a que sea una de las herramientas del Pacto Verde Europeo que funcione como palanca para la recuperación económica tras la pandemia. Se busca hacer de Europa el primer continente climáticamente neutro en 2050 e impulsar la economía, la mejora de la salud y la calidad de vida de los ciudadanos (EUROPEAN COMMISSION, 2020a). El sector de la edificación es uno de los mayores consumidores de energía y responsable de más de un tercio de ~~sus~~ las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión. La rehabilitación de edificios públicos y privados se ha señalado como una iniciativa clave para impulsar la eficiencia energética en el sector y cumplir estos objetivos. El Marco Financiero Plurianual 2021-2027 y el instrumento de recuperación NextGenerationEU ofrecen una oportunidad sin precedentes "para desencadenar una Ola de Renovación" (EUROPEAN COMMISSION, 2020b), aumentando las

posibilidades de inversión para este sector (BERTOLDI & al., 2020).

Para posibilitar la consecución de estos objetivos, se hace necesario desarrollar herramientas dirigidas al diagnóstico de la edificación de nuestros barrios y ciudades, identificar las áreas obsoletas y priorizar las actuaciones. Hasta la fecha, los estudios de la demanda del parque edificado existente en España se han basado principalmente en datos estadísticos agregados procedentes de Censo de Población y Vivienda (DALLE & al., 2010; CUCHÍ & SWEATMAN, 2014; WWF & al., 2017; MINISTERIO DE FOMENTO, 2017). Recientemente la ERESEE 2020 propuso la utilización de los datos catastrales para el cómputo de inmuebles y superficies en edificios terciarios, clasificándolos por uso y periodo de construcción (MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA, 2020). Pero los datos catastrales permiten ir más allá, al incluir junto al año de edificación y estado de ésta, la información sobre su forma y orientación. Gracias a la explotación de la información espacial que contiene el catastro es posible evaluar aspectos clave

como las envolventes, el volumen y la orientación de la edificación.

En trabajos anteriores se han evaluado las pérdidas energéticas de toda la edificación de un barrio utilizando la información existente por edificio mediante el procesamiento de datos catastrales (MARTÍN-CONSUEGRA & al., 2018). Esta información resulta útil para evaluar la calidad de las envolventes en nuestros barrios, y establecer sus necesidades energéticas e identificar su obsolescencia (CASQUERO-MODREGO & GOÑI-MODREGO, 2019; IGNACIO OTEIZA & al., 2015; GIANCOLA & al., 2014)2015; Giancola et al., 2014. Además de las pérdidas, producto de los sistemas constructivos que constituyen la envolvente, existen otros factores que influyen en la determinación de la demanda energética necesaria para lograr el confort de los hogares durante el invierno, como son las ganancias solares e internas y las pérdidas por ventilación (UNE EN ISO 13790 : 2011 | ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS - CALCULATION OF ENERGY USE FOR SPACE HEATING AND COOLING (ISO 13790:2008), 2008). En este trabajo se propone un método preciso para evaluar la demanda energética de los edificios residenciales a gran escala.

2. Objetivos

El objetivo general de la línea de investigación en la que se enmarca este trabajo es la reducción de los consumos energéticos y las emisiones contaminantes de la edificación residencial, mediante la rehabilitación energética de barrios homogéneos. Los objetivos específicos son:

- Desarrollar un procedimiento de evaluación de las necesidades energéticas de la edificación para-incluir las en el diseño de operaciones de rehabilitación urbana.
- Evaluar en la escala urbana los edificios existentes, en particular los residenciales, mediante indicadores de comportamiento energético, cuantificando la cantidad de energía que es necesario suministrar a cada barrio para la satisfacción de las necesidades básicas; y la inversión necesaria para resolver problemas de ineficiencia.
- Realizar una estimación simplificada de la demanda energética de calefacción en la escala de barrio, con información

detallada para cada uno de los edificios residenciales, a partir de la información obtenida de los datos catastrales.

La herramienta propuesta es especialmente útil para su aplicación en barrios ineficientes, identificados previamente mediante la utilización de datos estadísticos del Censo (MARTÍN-CONSUEGRA & al., 2016). En estos barrios existen numerosos edificios con envolventes obsoletas que se pretenden identificar con exactitud.

3. Metodología

El trabajo que presentamos consiste en el desarrollo de una herramienta de evaluación energética de la edificación residencial en barrios homogéneos a partir de la información catastral (FIG. 1). El uso de la información contenida en el catastro permite lograr la exactitud necesaria en los resultados, ya que se obtienen a partir de los datos geométricos disponibles edificio por edificio en las bases de datos catastrales.

La metodología propuesta permite calcular un escenario base en el estado actual y estimar los beneficios obtenidos mediante la aplicación de distintas medidas de mejora. Para abordar el trabajo en la escala urbana de manera que se puedan evaluar barrios enteros, se han admitido una serie de suposiciones y limitaciones:

- El cálculo de las pérdidas energéticas se realiza bajo la simplificación de que todos los edificios están siendo calentados a una temperatura interior constante. Se considera cada edificio como una sola zona térmica (cálculo monozona).
- Se desprecian las zonas no calefactadas de los edificios residenciales, y por tanto la transferencia de calor entre ellas. Se han podido descontar las zonas no habitables registradas en Catastro, como zonas comunes, trasteros y garajes.
- Se evalúan las partes de la edificación sobre rasante.
- No se tiene en cuenta la capacidad de acumulación térmica de los cerramientos.
- Se desprecia el agregado de energía que se consume en la acción de transformación cuando se está materializando un cambio de estado físico. Solo se tiene en cuenta el calor sensible, despreciándose el calor latente liberado en la condensación o absorbido por la evaporación.

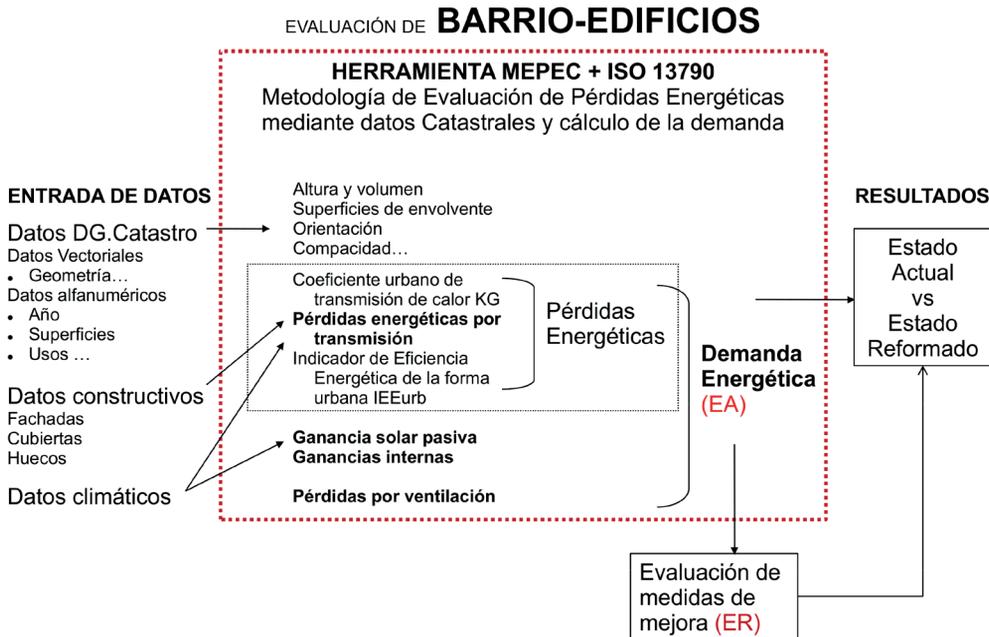


FIG. 1/ Esquema conceptual del desarrollo de la Metodología para el cálculo de la demanda de calefacción

Fuente: Elaboración propia

3.1 Evaluación simplificada de la demanda energética de calefacción

En la edificación residencial española previa al CTE las pérdidas energéticas suponen la variable de mayor impacto en la demanda energética de calefacción, siendo la edad de la construcción un indicador potencial del consumo de energía (AKSOEZEN & al., 2015). Para la estimación de las pérdidas energéticas por transmisión, se ha utilizado un software desarrollado en lenguaje de programación libre Python que se ha denominado "Metodología de Evaluación de pérdidas Energéticas mediante datos Catastrales" (MEPEC) (MARTÍN-CONSUEGRA & al., 2018). Esta herramienta automatiza la recopilación de los datos catastrales vectoriales para computar las superficies de la envolvente de todos los edificios de un barrio (SEDE ELECTRÓNICA DE CATASTRO, 2014, 2014). A partir de la información catastral alfanumérica (SEDE ELECTRÓNICA DE CATASTRO, 2011), es posible clasificar las envolventes por periodo de construcción y estimar las pérdidas energéticas anuales por transmisión mediante su caracterización constructiva.

Una vez conocidos estos valores, este trabajo propone estimar la demanda total mediante la

incorporación de información acerca de las pérdidas por ventilación y las ganancias solares e internas. Se desarrolla un método para estimar necesidades energéticas destinadas a acondicionamiento térmico de la edificación durante el invierno para la escala de barrio. Los datos de radiación solar se han utilizado para estimar la ganancia solar pasiva. El procedimiento también permite computar la radiación solar incidente en los elementos opacos tanto de fachada como de cubierta. Esta información puede resultar útil para el predimensionado de posibles instalaciones de dispositivos de captación de energía solar térmica y fotovoltaica.

El procedimiento simplificado consiste en la estimación de las necesidades de energía a partir de la compensación del balance energético. Se han seguido los pasos de la norma (UNE EN ISO 13790: 2011 | ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS - CALCULATION OF ENERGY USE FOR SPACE HEATING AND COOLING (ISO 13790:2008), 2008) y se ha utilizado un predimensionado simplificado similar al propuesto en otros estudios existentes (RAMÍREZ PEREA, 2013). Se ha considerado que la demanda de energía para acondicionamiento térmico en temporada de invierno viene dada, de manera simplificada, por la Ecuación 1.

Ecuación 1. Demanda energética de calefacción (kWh)

$$D_{\text{CAL}} = Q_G + Q_i - Q_t - Q_v$$

Donde

Q_G = Ganancias solares pasivas

Q_i = Ganancias por cargas internas

Q_t = Pérdidas de calor por transmisión

Q_v = Pérdidas de calor por ventilación

Las pérdidas de calor se definen como la cantidad de calor que escapa de un edificio durante un periodo (que aquí se ha estimado anual). Engloba las pérdidas por transmisión a través de la envolvente y las pérdidas por ventilación (filtración y renovación de aire). Las ganancias de calor representan la cantidad de calor que se genera o penetra en el edificio. Se incluyen las fuentes internas (calor suministrado por los ocupantes, y equipos y fuentes ajenas a los sistemas de calefacción) y la captación de radiación solar mediante ventanas.

3.1.1 Datos climáticos

Para el cálculo de las pérdidas energéticas, tanto por transmisión como de ventilación, se ha utilizado la información de los grados día anuales en base 15/15 (NBE-CT-79, 1979). Para introducir en el modelo información referente a la radiación solar total mensual (I_{mj}) o estacional (I_{sj}) por unidad de superficie y orientación (j) se han recopilado datos existentes considerando la latitud de Madrid 40.25° N y la influencia de la nubosidad a través de la aplicación para el cálculo promedio de la radiación solar directa y difusa ofrecida por el Joint Research Center (JRC - EUROPEAN COMISION, 2017).

Para la estimación de ganancias es necesario conocer la irradiación solar incidente sobre las fachadas. Los valores se deducen a partir de la irradiación solar directa, global y difusa medidas en plano horizontal. La aplicación “*PV Potential estimation*” (JRC - EUROPEAN COMISION, 2017) permite realizar estimaciones de la radiación media diaria por meses que incide en todos los planos de la envolvente de los edificios. La base de datos de radiación del JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) (EUROPEAN COMMISSION, 2017) ofrece datos promedio de 2001 a 2012. Estos datos se han verificado para Madrid con la estimación realizada por CIEMAT para el mapa ADRASE, que incluye datos promedio a partir de información

recopilada durante 33 años (ADRASE - Acceso a Datos de Radiación Solar de España - Mapa Zona Península, n.d.).

3.1.2 Ganancias solares

En este caso se han considerado para la estimación de radiación incidente en la edificación las cubiertas y fachadas de orientación este, sureste, sur, suroeste y oeste. La información se clasifica para los periodos de calefacción (invierno) y refrigeración (verano). Se han tenido en cuenta los meses de octubre a mayo para la temporada de calefacción y los meses de junio a septiembre para la de refrigeración, siguiendo la clasificación definida en (Código Técnico de La Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía, 2019). El modelo incorpora una estimación gruesa para contabilizar la radiación solar incidente para cada edificio del barrio. Se estima para cada uno de los planos de la envolvente de la edificación que reciben radiación solar de manera significativa (cubiertas y fachadas orientadas a sur, este y oeste). La incidencia de la radiación sobre la parte hueca de las fachadas se computa como ganancia solar pasiva. La incidencia sobre la parte opaca se computa para la estimación de un indicador del potencial de captación de energía renovable. Para este cálculo se tienen en cuenta todos los edificios del barrio y se obtienen valores totales mediante la agrupación de resultados para cada edificio.

Para la inclusión del efecto causado por las sombras arrojadas por los edificios se utiliza el *factor de corrección de sombra* (F_{sj}). Este puede variar mucho en función de la morfología urbana. Algunos estudios incluyen aproximaciones a la obstrucción solar a partir de la relación entre el ancho de calle y la altura de la edificación (Urban Canyon Ratio) (LAO, 2014). Este método a priori parece poco apropiado para una parte importante de los tejidos de periferia, al menos en el caso de estudio de la ciudad de Madrid. En el caso de los tejidos de bloque abierto, los bloques se disponen libremente sin alineación al viario con lo cual el ancho de calle es muy variable. Para los desarrollos de parcelación periférica, es la altura de la edificación la que no es constante. Otros factores que influyen son la obstrucción por la presencia de arbolado, si este es de hoja perenne o caduca, o la topografía. Se propone incluir la reducción de la incidencia solar a partir de un factor de corrección por las sombras provocadas por el horizonte (F_h). No se ha considerado el efecto de voladizos ni parasoles. En este caso se han tomado los valores

de referencia del 30% de obstrucción de la radiación solar en fachadas Sur (se incluyen en este grupo las fachadas con orientación sureste y suroeste) y el 50% en las fachadas orientadas a este y oeste. Para la cubierta se ha considerado un factor de corrección de factor de sombra del 20%, como forma de descontar la influencia de otros edificios más altos, o de elementos como casetones, inclinaciones de cubierta, etc. Los resultados se clasifican para las cubiertas y para las fachadas por orientación.

La parte de radiación que penetra a través de los huecos de fachada durante el periodo de invierno se incluye en el balance energético para la estimación de la demanda energética de calefacción (D_{CAL}). Estas ganancias de calor captadas a través de los elementos transparentes de la envolvente se aprovechan en forma de energía solar pasiva. Para contabilizar la cantidad de radiación que penetra la norma recomienda tener en cuenta una serie de factores influyentes (UNE EN ISO 13790 : 2011 | ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS - CALCULATION OF ENERGY USE FOR SPACE HEATING AND COOLING (ISO 13790:2008), 2008). El modelo permite la introducción de la superficie de ventanas a partir de la variable del porcentaje de huecos por orientaciones o de manera prorrateada para todo el edificio. En el estudio de caso se ha considerado un 16% de huecos con respecto a la superficie bruta de fachadas, para todas las orientaciones. Este valor procede de los estudios basados en muestras de la vivienda social del periodo 1940-1979 realizados para el proyecto REFAVIV (I. OTEIZA & al., 2016). El procedimiento de cálculo aparece descrito en detalle en el capítulo 3.1.5 de la tesis doctoral (MARTÍN-CONSUEGRA, 2019). El *Factor de reducción por la carpintería* (FF) contabiliza la parte del hueco compuesta por vidrio, transparente a la radiación solar, descontando la parte ocupada por la carpintería. Este valor depende del tamaño del hueco y del tipo de material que conforma las carpinterías. En el caso de este estudio realizado para la escala urbana, no se llega a definir tanto detalle. Se ha considerado de forma simplificada que un 20% del hueco está ocupado por la carpintería para todos los casos.

El *factor solar del vidrio* (g_v) se utiliza para caracterizar la parte de la radiación solar que atraviesa el vidrio, descontando la parte reflejada y la parte absorbida por el mismo. Para el caso del vidrio estándar, la normativa contempla los valores de 0,85 para el vidrio sencillo

y 0,75 para el doble acristalamiento aislante y dobles ventanas (Código Técnico de La Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía, 2019). Se ha tomado este último valor, por ser el más frecuente en la muestra analizada en Madrid (MARTÍN-CONSUEGRA, 2019).

3.1.3 Ganancias internas

El procedimiento empleado para el cálculo de la demanda contempla la producción de calor dentro de los edificios a través de las cargas internas que tienen en cuenta las aportaciones metabólicas de los ocupantes y el consumo de energía de aparatos eléctricos y de iluminación artificial. Están directamente relacionadas con el número de personas que ocupan la vivienda (tamaño del hogar) y con su grado de equipamiento (Ecuación 2). Para la estimación de la demanda anual de calefacción se computa todo el periodo de invierno.

Ecuación 2. potencia media de las ganancias internas en espacios calefactados

$$Q_i = [\Phi_{1,h} + (1-b) \Phi_{1,u}]t = \Phi_i t \quad [\text{kWh año}]$$

Donde:

$\Phi_{1,u}$ = potencia media de las ganancias internas en espacios no calefactados

$\Phi_{1,h}$ = potencia media de las ganancias internas

b = factor de reducción

t = periodo de cálculo

Para realizar el cálculo a la escala urbana no se han tenido en cuenta las ganancias internas en los espacios no calefactados. Se ha utilizado el valor estimado en el ANEXO K.2 (UNE EN ISO 13790 : 2011 | ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS - CALCULATION OF ENERGY USE FOR SPACE HEATING AND COOLING (ISO 13790:2008), 2008) para las ganancias internas en edificios ocupados de forma continua, 4 W/m². Si consideramos solamente el periodo de invierno, con el objetivo de incluirlos en el cálculo de la demanda de calefacción, esta cifra se corresponde aproximadamente con $\Phi_i = 23\text{kWh}$ por cada m² habitable, para toda la temporada. Para la incorporación de estas cargas internas en el modelo se han considerado los valores registrados por los datos catastrales correspondientes al área habitable dedicada al uso vivienda, descontando los usos no habitables (zonas comunes, garajes, trasteros...).

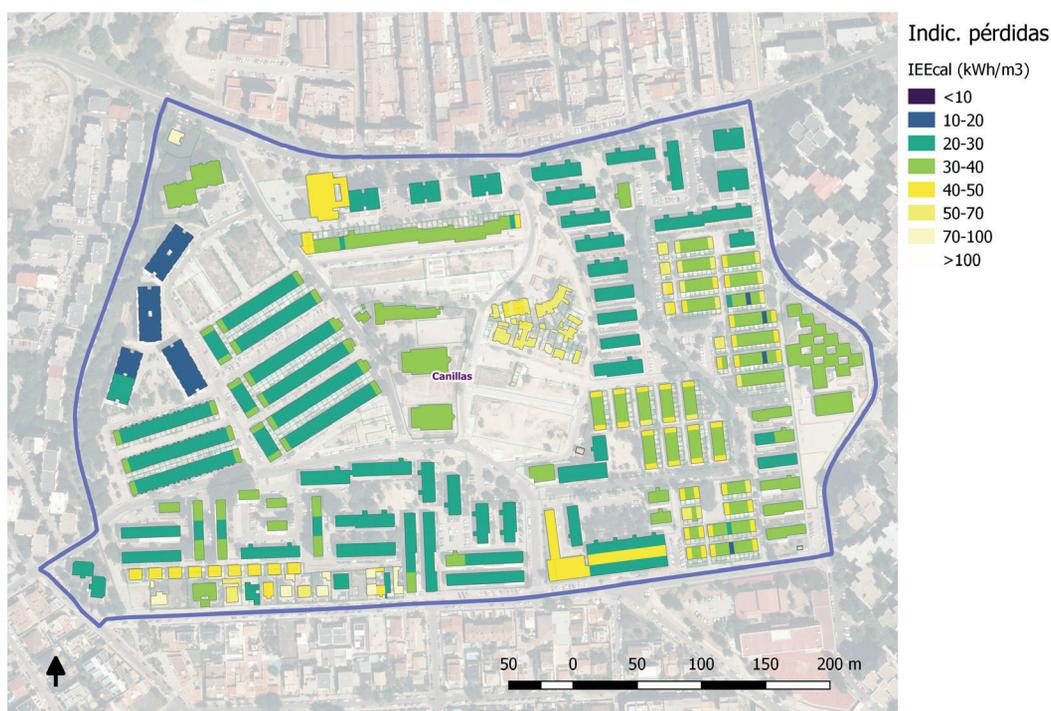


FIG. 2/ Indicador de pérdidas energéticas de la edificación en el estudio de caso

Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Pérdidas por transmisión a través de la envolvente

Las pérdidas por transmisión a través de la envolvente (Q_t) son la principal causa de ineficiencia energética de la edificación anterior a 1979 (CUCHÍ & SWEATMAN, 2014). Inciden directamente en la demanda de calefacción, responsable del 55% del consumo energético de los edificios residenciales en la zona continental de España (IDAE, 2011b). En este estudio se han obtenido de manera pormenorizada para cada elemento de la envolvente y por edificios, utilizando la información vectorial contenida en el catastro para los cálculos geométricos. La base de datos del catastro no contiene información constructiva, pero permite asociar unas características para cada edificio en función de la variable “año de construcción”. En este caso se han empleado valores de transmitancia térmica obtenidos de los estudios basados en muestras publicados en (OTEIZA & al., 2018). El cálculo de las pérdidas energéticas totales y para cada elemento de la envolvente ha sido posible utilizando la metodología MEPEC descrita en (MARTÍN-CONSUEGRA & al., 2018). Para el desarrollo del trabajo que aquí se presenta se han

recopilado los resultados correspondientes a la edificación residencial.

El cómputo de las pérdidas ha permitido generar un indicador normalizado por el volumen edificado que caracteriza la compacidad y la calidad de la envolvente para cada edificio (FIG. 2). Este valor se calcula también para todo el barrio, generando un indicador de eficiencia energética de calefacción a la escala urbana.

3.1.5 Pérdidas por ventilación

La ventilación es una de las variables que más dependen del comportamiento de los usuarios de cada vivienda y por lo tanto son difíciles de generalizar. Asimismo, las infiltraciones de aire no deseadas están relacionadas con la estanqueidad de las envolventes y dependen en gran parte de su estado de conservación. Se pretende realizar una estimación gruesa que permita contemplar la influencia de estos factores en el total de la demanda de calefacción.

Se ha considerado que la mayor parte de las viviendas de Madrid no cuentan con sistemas

de ventilación forzada, y que renuevan el aire a través de la ventilación natural, despreciándose la influencia de los sistemas mecánicos. La norma propone en estos casos unos valores en función del número de fachadas expuestas (una o más de una) y el nivel de exposición al viento del edificio (sin exposición, moderada, elevada) y de la estanqueidad (baja, media, alta). Los valores que corresponden a una exposición moderada oscilan entre 0,5 y 0,9 R/h. La norma ISO 13790 propone un estándar mínimo de 0,3 renovaciones por hora como caudal mínimo de ventilación necesario por motivos de higiene. En el caso de la normativa española, la Herramienta unificada LIDER-CALENER (HULC) (CTE, 2017) propone un valor por defecto para los edificios residenciales de 0,63 renovaciones por hora. Esto se correspondería en la norma ISO con un edificio de estanqueidad media con más de una fachada expuesta, situado en una zona de clase de exposición moderada. El caudal de aire a través del espacio calefactado (\tilde{V}) se ha supuesto a partir de este valor y de los datos de volumen de la edificación obtenidos del catastro (Ecuación 3). En este caso de aplicación para los edificios residenciales, se ha utilizado el volumen calculado a partir de la superficie habitable y se ha considerado una altura libre media de 2,75 m.

Ecuación 3. Caudal de aire a través del espacio calefactado (\tilde{V})

$$\tilde{V} = 0,63 \text{ Vol} / h \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Donde:

$$\text{Vol} = \text{Volumen de aire} [\text{m}^3]$$

A partir de este caudal se obtiene el coeficiente de pérdida de calor por ventilación (H_v):

Ecuación 4. Coeficiente de pérdida de calor por ventilación (H_v) [Wh/K]

$$H_v = \rho_a c_a \tilde{V} \quad [\text{Wh}/\text{K}]$$

Donde:

$\rho_a c_a$ Calor específico del aire en volumen (se ha tomado 0,34 Wh/m³K)

\tilde{V} = Caudal de aire a través del espacio calefactado [m³/h]

Las pérdidas totales por ventilación (Q_v) se obtienen utilizando los datos climáticos referentes a los grados día descritos en el apartado 3.1.1:

Ecuación 5. Pérdidas totales por ventilación (Q_v) [kWh año]

$$Q_v = H_v (T_i - T_e) t \quad [\text{kWh año}]$$

Donde:

H_v = Coeficiente de pérdida de calor por ventilación (H_v) [Wh/K]

$T_i - T_e$ = Diferencia de temperatura exterior e interior [°C]

t = periodo de cálculo [año]

3.2 Evaluación de medidas de mejora de la envolvente

El procedimiento propuesto permite la estimación del coste económico de la inversión inicial necesaria para ponerlas en marcha y la evaluación de su impacto a través de los beneficios obtenidos. Las mejoras se enfocan a aspectos pasivos dirigidos a la reducción de la demanda. Se analizan los catálogos de medidas incluidos en los documentos oficiales de certificación de edificios existentes (CASTAÑO & al., 2012; MIYABI & CENER, 2012), así como de estudios independientes (LUXÁN GARCÍA DE DIEGO & al., 2017; WWF & al., 2017). Una recopilación de las posibles medidas sería:

- El aumento del nivel de aislamiento en muros de fachada (parte opaca)
- Aumento del nivel de aislamiento en cubiertas
- Aumento del nivel de aislamiento en suelos
- La modificación o sustitución de acristalamientos y carpinterías
- Instalación o modificación de protecciones solares

Al tratarse de una intervención a escala de barrio, se ha considerado que se deben elegir soluciones de mejora que se puedan realizar desde el exterior de los edificios, para así tratar de reducir en la medida de lo posible la afectación al uso de las viviendas.

3.2.1 Propuestas de mejora

Las propuestas de mejora deben ser dimensionadas en función de las características de la edificación a rehabilitar, a partir de la clasificación de las envolventes por periodo de construcción. Se propone actuar sobre los edificios del periodo de construcción anterior a 1979. En este caso se evalúa la mejora

de las prestaciones de la envolvente opaca. Las prestaciones que se obtengan después de la rehabilitación deben ser, al menos, las exigidas por la reglamentación vigente para los edificios existentes (Código Técnico de La Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía, 2019). Las ventanas han sido modificadas en una gran parte de las viviendas, de manera desigual dentro de un mismo edificio (OTEIZA & al., 2018). Por esta razón se han considerado como un elemento asociado a la vivienda y se han excluido de una intervención desde la escala urbana.

La intervención en fachadas se considera prioritaria puesto que se trata del elemento de la envolvente con una mayor superficie en los edificios multifamiliares. Su rehabilitación consigue el mayor impacto en la reducción de la demanda de calefacción (ALONSO, 2015). Es una medida orientada a reducir el intercambio energético en las épocas con peores condiciones térmicas exteriores, principalmente en invierno, aunque también se observa una incidencia en verano, al reducirse el calor aportado a través de los muros. Consiste en la adición de una capa de material aislante a su parte opaca para la reducción de la transmitancia térmica en los cerramientos exteriores opacos verticales. Las pérdidas energéticas por transmisión a través de muros se reduce proporcionalmente a la disminución del coeficiente global de la misma (CASTAÑO & al., 2012). Se modifica el aspecto a las fachadas existentes y aumenta el espesor del muro hacia el exterior, lo que en principio podría hacer necesaria una licencia de obras. Además, es necesario tomar la precaución de tratar las jambas y dinteles en los huecos, lo que puede reducir su superficie efectiva. Una ventaja de este sistema es que se consigue reducir considerablemente los puentes térmicos en frentes de forjado, pilares en fachada y huecos. En los conjuntos catalogados por su interés patrimonial se hace necesario valorar cuidadosamente que la incorporación de mejoras no menoscabe sus características arquitectónicas.

La cubierta es el elemento constructivo de la envolvente que soporta mayores solicitaciones térmicas, por lo que su reparación resulta una práctica habitual. Resolver adecuadamente el techo de los edificios tiene una fuerte incidencia en las condiciones de confort y de higiene de las viviendas de la última planta. Los intercambios de calor a través de la cubierta que generalmente son mayores por metro cuadrado que en fachadas (LUXÁN GARCÍA DE DIEGO & al., 2017). Además, es el

elemento con más presencia de humedades por filtraciones y condensación, lo que agrava el deterioro del edificio y puede provocar un efecto directo sobre la salud de los usuarios. Una vez más se analizan mejoras a acometer por el exterior para evitar la intervención dentro de las viviendas. En este elemento, la actuación por el exterior resulta especialmente interesante cuando el estado actual de la cubierta precise de reparaciones destacables, por ejemplo cuando el sistema de impermeabilización esté deteriorado, o sea necesario sustituir el material de cobertura (CASTAÑO & al., 2012). En el caso de la rehabilitación de barrios vulnerables, la falta de mantenimiento de la edificación puede ser habitual y la reparación de las cubiertas se presenta como una oportunidad para la resolución de otros problemas además de la ineficiencia energética. Es necesario atender al sobrepeso que significa la aplicación de soluciones en la cubierta.

Una parte de las pérdidas energéticas que se registran en un edificio se produce a través de los suelos. Estos separan el volumen acondicionado del terreno, espacios no acondicionados en la parte baja del edificio o del exterior en el caso de voladizos o soportales. Además, la temperatura superficial del suelo puede ser muy inferior a la temperatura ambiente, lo que provoca falta de confort por “radiación fría” y riesgo de condensaciones. Esta medida consiste en añadir una nueva capa de aislamiento térmico a los suelos existentes. Al plantear las soluciones para el aislamiento de suelos, se recomienda valorar las posibilidades económicas, físicas y técnicas para realizarlo ya que, en algunas circunstancias, como en las cámaras ventiladas, el acceso puede ser complicado. La reducción del coeficiente global es prioritaria en suelos de locales habitables y puede ser secundaria para suelos que estén en contacto con locales comerciales, garajes, etc. En este caso se han valorado los suelos en contacto con el aire exterior, que se pueden identificar gracias a la codificación de volúmenes en la información del catastro (campo CONSTRU en SEDE ELECTRÓNICA DE CATASTRO, 2014).

3.2.2 Estimación de costes

El proceso de datos catastrales hace posible realizar de forma sencilla una planificación de las mediciones y la inversión necesaria para la mejora de la envolvente térmica de la

edificación de barrios enteros. En este caso se han computado exclusivamente los costes de la inversión inicial. No se han computado los costes de mantenimiento, ni de reposición a largo plazo.

El cálculo de los costes de cada una de las medidas parte de la estimación del presupuesto de ejecución material (PEM) que incluye el precio de los materiales, la mano de obra, maquinaria y medios auxiliares. Los precios unitarios de ejecución material de las mejoras, se han obtenido utilizando el software "Generador de precios de la construcción", de libre copia y distribución, desarrollado y actualizado por CYPE Ingenieros (CASTELL HERRERA & al., 2018). A partir de este presupuesto se obtienen los costes para una rehabilitación promovida por la administración pública (coste macroeconómico) y para una rehabilitación de promoción privada (coste microeconómico). Además, los valores estimados de la mano de obra se extraen para calcular el potencial de generación de empleo que tiene la ejecución de las obras.

A. Presupuesto de ejecución material

Desde el punto de vista económico, una de las ventajas que presenta la rehabilitación de barrios completos con respecto a la suma de la rehabilitación edificio por edificio es la reducción de los costes de ejecución. Para cuantificar esta diferencia se dimensiona el volumen de obra a partir de dos casos: el de un bloque individual tipo del Poblado Dirigido de Canillas (PEM bloque) y el de la intervención para

todos los edificios del Poblado Dirigido anteriores a 1979 (PEM barrio) (FIG. 3): un total de 432 edificios residenciales que comprenden viviendas unifamiliares, bloques multifamiliares y torres en altura.

B. Estimación del coste total de la inversión inicial

Para la estimación del coste de la inversión inicial, se incorporan una serie de gastos generados durante el proceso. El procedimiento para el cálculo del coste óptimo para los requerimientos de eficiencia energética en edificios en España (MINISTERIO DE FOMENTO, 2013) aborda el problema desde dos perspectivas: el cálculo de la rentabilidad óptima en términos macroeconómicos para los estados se trata de cantidades libres de tasas e impuestos, por lo que podría asimilarse a la inversión necesaria para realizar operaciones de rehabilitación de promoción pública, y la perspectiva financiera (microeconómica) para el estudio de la rentabilidad para inversores (EUR-Lex - 52012XC0419(02) - EN - EUR-Lex, 2012). Se han tenido en cuenta los siguientes conceptos, que se estiman en función de porcentajes del PEM:

- Seguridad y Salud en la obra
- Control de Calidad
- Gastos Generales de la Contrata
- Beneficio Industrial de la Contrata
- Honorarios técnicos
- Coste de Visados Colegiales

Solución	Escala	PEM unitario	SyS CC 4%	Contrata 19%	HonTEC 14%	Visado 0,5%	Total MACRO	Total MICRO IVA21%	Total MICRO IVA10%
SATE_EPS10	bloque	80,12	3,20	15,22	11,22	0,40	110,17	135,70	123,59
	barrio	71,34	2,85	13,55	9,99	0,36	98,09	120,83	110,04
CUB_XPS12 grava	bloque	58,63	2,35	11,14	8,21	0,29	80,62	99,30	90,44
	barrio	48,69	1,95	9,25	6,82	0,24	66,95	82,47	75,10
SUELO_MW8	bloque	41,76	1,67	7,93	5,85	0,21	57,42	70,73	64,41
	barrio	36,75	1,47	6,98	5,15	0,18	50,53	62,25	56,69

FIG. 3/ Estimación de costes unitarios (€/m²) en escenario macroeconómico.

Fuente: Elaboración propia

El subtotal que se obtiene de la inclusión de estos conceptos para la contratación y ejecución de las obras aparece en el campo "total MACRO" de la FIG. 3. Los costes se calculan desglosados por precio unitario para cada una de las medidas de mejora.

Para conocer el precio final que tendría la rehabilitación energética en un escenario microeconómico o financiero para un inversor, es necesario tener en cuenta los costes de licencias (en este estudio se ha previsto un 3% del PEM) e impuestos. Se han calculado dos opciones para el Impuesto sobre el Valor Añadido, incluyendo un escenario con el IVA reducido. Este supuesto correspondería a la aplicación de incentivos fiscales a la rehabilitación de edificios, experiencia que ya se ha aplicado en periodos anteriores para fomentar la rehabilitación (AEAT, n.d.).

A modo de ejemplo, en el caso de una comunidad de propietarios que rehabilita la fachada de su edificio incorporando un SATE, el precio unitario a pagar con un IVA del 21% sería de 135,70 €/m² (123,59 €/m² para un IVA reducido). Esta misma medida de mejora supondría un coste de 98,09 €/m² en un escenario macroeconómico en una operación de rehabilitación de promoción pública.

3.2.3 Estimación de beneficios medioambientales, sociales y económicos

El aumento de la calidad térmica de la edificación redundará en la reducción de sus consumos e impactos ambientales. Además se producen beneficios no energéticos (FREED & FELDER, 2017). Desde la perspectiva social se producen mejoras en la salud, la generación

de empleo, mientras que desde la perspectiva económica se generan beneficios por la reducción de los costes en las facturas, la revaloración de los inmuebles y otros (NÆSS-SCHMIDT & al., 2012). La herramienta desarrollada en este trabajo permite la cuantificación de algunos de estos impactos.

A. Beneficios medioambientales

La mejora de las prestaciones térmicas de los elementos constructivos se caracteriza a través de la transmitancia térmica en estado reformado (U_{ER}). A partir de los valores originales (U_{EA}) (OTEIZA & al., 2018) se estiman las características térmicas resultantes de la incorporación de las mejoras (FIG. 4). utilizando el método de cálculo de la transmitancia térmica definido en el CTE para Cerramientos en contacto con el aire exterior (*Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía. Código Técnico de La Edificación. DA DB-HE / 1 Cálculo de Parámetros Característicos de La Envolvente*, 2020). Los valores U_{EA} de los elementos constructivos se modifican conforme a los valores U_{ER} de la FIG. 4, cumpliendo con las exigencias aplicables para la rehabilitación de edificios existentes (Código Técnico de La Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía, 2019). En el estudio de caso, la mayor parte de las cubiertas son planas y se han adoptado los mismos valores para todas.

A partir de estos valores es posible calcular la reducción de las pérdidas energéticas a través de la envolvente que supone la intervención. Estas pérdidas inciden directamente en la demanda de energía del edificio y permiten obtener el consumo teórico para el caso de demandas satisfechas (*UNE EN ISO 13790 : 2011 | ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS*

Elemento	Solución	U_{EA} (W/m ² K)	λ (W/mK)	Espesor (m)	R térmica (m ² K/W)	U_{ER} (W/m ² K)	$U_{lim_CTE^*}$ (W/m ² K)
fachada	SATE_ EPS10	1,55	0,031	0,10	3,23	0,26	0,41
cubierta	CUB_ XPS12_ grava	2,40	0,036	0,12	3,33	0,27	0,35
Suelo ext	SUELO_ MW8	2,50	0,035	0,08	2,29	0,37	0,41

FIG. 4/ Mejora de la transmitancia obtenida mediante la aplicación de las mejoras.

Fuente: Elaboración propia

- *CALCULATION OF ENERGY USE FOR SPACE HEATING AND COOLING (ISO 13790:2008)*, 2008). Para la transformación de la reducción de la demanda en consumo de energía final, se tienen en cuenta los factores de conversión por rendimiento de las instalaciones térmicas del 100% en la calefacción eléctrica y del 75% en la de gas natural (IDAE, 2011a).

La reducción de impactos ambientales que supone la operación incluye la reducción en el agotamiento de recursos por el descenso del consumo de energía primaria no renovable. Además, se evalúa el impacto sobre el cambio climático que se produciría por la reducción de emisiones de CO₂ en el medioambiente. Para ello se aplican factores de conversión a energía final y primaria, y emisiones de CO₂ asociadas. En el estudio de caso se han aplicado valores obtenidos de estudios existentes (MINISTERIO DE FOMENTO, 2013).

B. Beneficios económicos

Se calcula el ahorro en facturas energéticas en el caso de demandas satisfechas. Para ello se propone una estimación simplificada de los precios de la energía (kWh). Se han utilizado los precios para la vivienda media desarrollado en (MARTÍN-CONSUEGRA & al., 2019). Se tiene en cuenta la fuente de energía (electricidad o gas natural) y se incluyen el consumo (kWh; €), los costes por término fijo o de potencia y los impuestos (HC; elec; IVA). El precio por kWh sería de 0,066 € para el gas natural y de 0,16 € (estimación propia para la vivienda media en Madrid) o de 0,23 € según EUROSTAT (para el conjunto de España) (EUROSTAT, 2017). Para el caso de la electricidad, el precio de EUROSTAT para España es un 29% más elevado que el calculado mediante la metodología propuesta en este trabajo para Madrid utilizando datos de (CNM, 2017). Se han tomado las estimaciones propias entendiendo que introducen variables correspondientes al caso concreto de Madrid y además permiten estimar el ahorro económico obtenido quedando del lado de la seguridad. Para los cálculos simplificados, se considera que el coste del mix energético utilizado para calefacción de viviendas en Madrid (60% gas y 40% electricidad según (INE, 2011)) sería de aproximadamente 0,1 €/kWh.

Una estimación exhaustiva del ahorro de costes en la factura energética requiere de un análisis profundo a partir de datos de medidores de consumo, además sería necesario generar un escenario dinámico en el que se tenga en cuenta la fluctuación del precio de la energía a lo largo de los años (MINISTERIO DE FOMENTO, 2013). En este caso se ha simplificado el cálculo como si el escenario fuera estático, quedando una vez más del lado de la seguridad puesto que el escenario

europeo actual es de precios energéticos al alza (DE VITA & al., 2016).

C. Beneficios sociales: indicador de generación de empleo

El método de estimación del potencial de generación de empleo es similar a la elaboración del presupuesto a partir de las mediciones de la envolvente. En este caso, en lugar de coste unitario, se introducen valores de mano de obra necesaria en los distintos oficios que intervienen en la ejecución de cada unidad de obra. En el estudio de caso se han sumado el número total de horas de trabajo de todos los oficios necesarios para la ejecución de cada partida para las soluciones elegidas. A modo de ejemplo, se precisan 1.954 horas de trabajo para la ejecución de cada m² de SATE (0.117 h de Oficial 1º de aislamientos y 0.117 h para su ayudante, 0.86 h para el oficial revocador y otros 0.86 para su ayudante), en un volumen de obra como el calculado.

Los valores unitarios de cada solución se introducen en el modelo como variables de entrada, lo que permite estimar el total de horas de trabajo que se necesitan en función del cómputo de superficies de cada elemento de la envolvente de todos los edificios.

4. Resultados y discusión

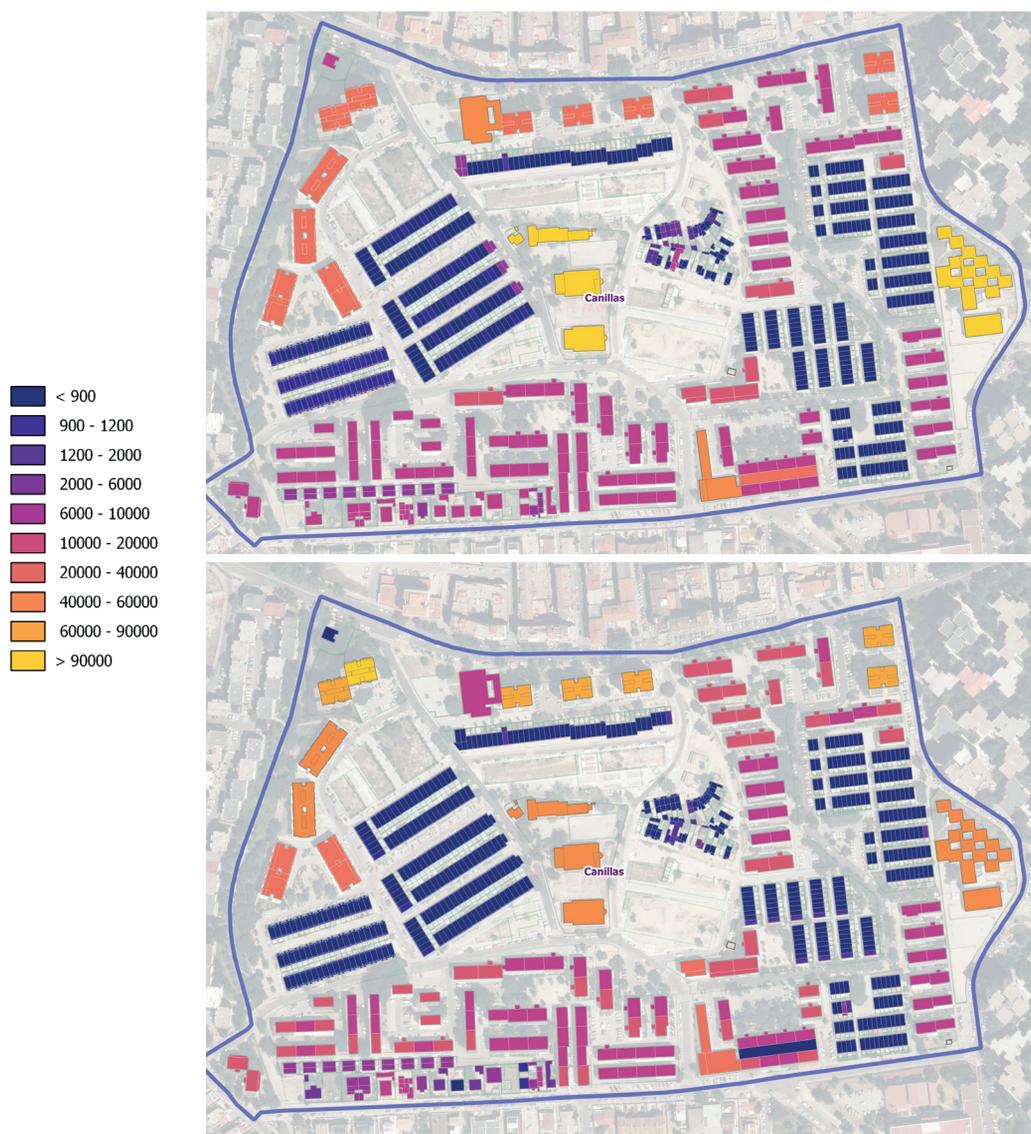
Se ha aplicado la herramienta para un escenario de rehabilitación energética que incluye la mejora de la envolvente opaca de todos los edificios anteriores a 1979 en el Poblado Dirigido de Canillas, proyectado en los años 50 en la periferia de Madrid.

4.1 Demanda energética de calefacción de barrios en el estado actual

En este apartado se vuelcan los resultados obtenidos para el estudio de caso de la radiación solar pasiva y la demanda de calefacción.

4.1.1 Radiación solar incidente

Los resultados para las estimaciones de la radiación total incidente en la edificación (FIG. 5) se obtienen para todos los edificios del barrio (residenciales y de uso terciario). En resumen, se estima que el 10% de la radiación solar incidente sobre la superficie bruta de fachadas



Elemento	Superficie (m2)	Invierno (kWh)	Verano (kWh)	anual (kWh)	% invierno	Ganancia pasiva invierno (kWh)
Cubierta	49.029	35.943.657	33.595.736	69.539.393	52%	0
Fachada E	25.864	6.979.290	5.763.702	12.742.992	55%	348.965
Fachada O	25.814	7.047.270	5.809.480	12.856.749	55%	352.364
Fachada S	40.710	26.642.098	11.606.938	38.249.036	70%	1.864.947
Fachada SE	4.930	2.783.552	1.615.053	4.398.605	63%	194.849
Fachada SO	2.378	641.615	529.865	1.171.480	55%	44.913
Tot.fachadas	99.696	44.093.825	25.325.038	69.418.863	64%	2.806.037
TOTAL	148.725	80.037.482	58.920.774	138.958.256	58%	2.806.037

FIG. 5/ Radiación solar (kWh) incidente sobre (a) cubiertas y (b) fachadas, para todos edificios del PD Canillas, por período estacional.

Fuente: Elaboración propia

podría ser aprovechada para reducir la demanda de calefacción en concepto de energía solar pasiva si cada edificación se encontrase aislada. Si tenemos en cuenta el factor de corrección de sombra, que reduce la radiación incidente por las obstrucciones causadas por obstáculos del entorno, estos valores pasan a ser de aproximadamente del 5% en las fachadas este y oeste y del 7% en las fachadas a sur. A partir de estos resultados se depura la parte de información correspondiente a edificios residenciales para el cálculo de la demanda de calefacción.

Durante el invierno (8 meses) se recibe el 58% de la radiación solar total anual sobre la envolvente. Esto indica que, a pesar de que la intensidad de la radiación solar es mayor en verano (4 meses), la mayor parte se recibe durante el periodo de calefacción, que es más prolongado. Este resultado apunta a que existen recursos solares disponibles en el periodo en el que la demanda de energía de los edificios es mayor. Las cubiertas reciben cantidades de radiación similar en invierno y en verano, mientras las fachadas reciben el 64% de la radiación total durante el invierno. La fachada sur recibe el 70% de la radiación en invierno, siendo la más adecuada para la captación de la energía solar pasiva.

La radiación solar utilizada para el calentamiento solar pasivo representaría aproximadamente el 2% de la radiación solar total incidente en la edificación. La mayor parte de la energía es captada a través de la fachada sur, que es la que tiene una mayor superficie en el estudio de caso (41% de la superficie del total de las fachadas expuestas en el barrio). Esto sucede porque, en este caso, el diseño urbano en origen ha priorizado la orientación sur propiciando la captación solar.

4.1.2 Demanda de calefacción

Los resultados se obtienen a través del cómputo del balance energético de las pérdidas y ganancias de calor durante todo el periodo de invierno. Se obtienen valores particularizados para cada edificio y valores urbanos mediante la agregación de casos.

Los resultados del balance energético permiten comprobar, para el estudio de caso, que las pérdidas energéticas a través de la envolvente suponen el aspecto que tiene una mayor incidencia sobre el total de la demanda de calefacción. Esto demuestra que la intervención

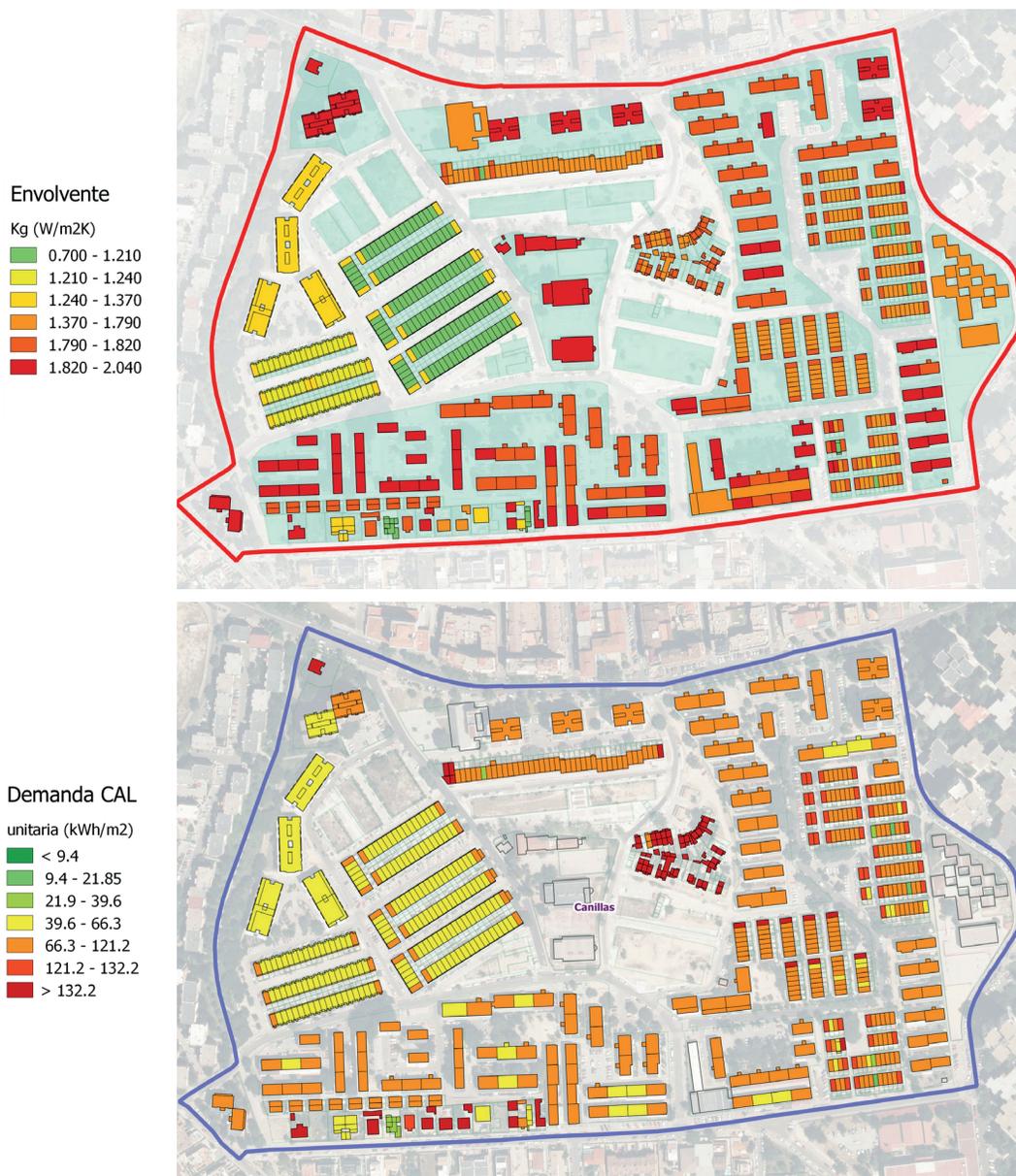
sobre la envolvente opaca resulta prioritaria para mejorar la eficiencia energética de la edificación anterior a 1979.

El método es capaz de evaluar el efecto de la compacidad de la edificación en las pérdidas por transmisión, como ya se vio en (MARTÍN-CONSUEGRA & al., 2018). La forma urbana está influyendo en las necesidades energéticas, como ha sido demostrado mediante otros procedimientos por otros autores para diferentes climas (LIU & SWEENEY, 2012; VARTHOLOMAIOS, 2017; LENG & al., 2020). Además, al incluir la contabilidad de la energía solar pasiva en la demanda, se soporta con mayor contundencia la evidencia de que existen edificios anteriores a 1979 sin aislamiento, pero con una menor demanda energética que otros edificios posteriores con envolventes de mejores prestaciones (menores valores de KG). Esto ocurre porque estos edificios presentan un mejor comportamiento bioclimático, pero con una peor gestión de la compacidad y la orientación, como consecuencia de un diseño ineficiente de partida (Fig. 6).

4.2 La rehabilitación de envolventes a gran escala: costes y beneficios

A continuación, se comparan las necesidades de inversión inicial para la rehabilitación residencial con el potencial de reducción de la demanda de calefacción de la edificación. Para ello se comparan los costes de las obras de mejora con los resultados del cálculo de la demanda de calefacción, generando un modelo que incluye los parámetros característicos de la envolvente antes y después de la rehabilitación. Se estima un periodo de amortización teórico a partir del cociente entre el coste y la reducción de pérdidas obtenida. La intención de esta operación es establecer comparaciones del impacto de las mejoras de distintos tipos de edificación, y no se pretende obtener cifras realistas en cuanto a ahorros económicos en facturas energéticas.

Se estima la reducción de costes que supone el aumento del volumen de obra de la escala del edificio a la del barrio. Mediante la ampliación de la escala se consiguen ahorros de entre el 8 y el 14% en función de la medida de mejora a aplicar. Se comprueba que los ahorros se producen básicamente en el precio unitario de adquisición de los materiales. En cambio, la mano de obra necesaria no se ve reducida con el aumento de la escala, teniendo la intervención a escala de barrio un potencial de generación de empleo muy similar a la



Concepto	Variable	Valor PD Canillas (kWh año)
Pérdidas por transmisión	Q_t	13.069.405
Pérdidas ventilación	Q_v	2.683.825
Ganancias solares	Q_s	2.565.811
Ganancias internas	Q_i	3.148.482
Demanda de calefacción	D_{cal}	10.038.936

FIG. 6/ (a) Coeficiente global de pérdidas (Wh/m2K) y (b) Demanda energética de calefacción (kWh/m2) para cada edificio residencial del barrio de Canillas.

Fuente: Elaboración propia

rehabilitación edificio por edificio. Para el estudio de caso del Barrio de Canillas, el ahorro estimado que se obtiene con un volumen de obra correspondiente a la rehabilitación de todos los edificios del barrio anteriores a 1979 sería de un 12,4% con respecto del coste que supondría la rehabilitación de cada uno de los edificios individualmente. Estos valores son coherentes con los publicados en otros estudios previos (SANTIAGO, 2014).

La escala de la intervención en el ámbito del Poblado Dirigido de Canillas resulta abaricable para un plan de regeneración del barrio, afectando a 432 edificios construidos con anterioridad a 1979, de los 647 totales del poblado. La intervención en las envolventes de todos los edificios construidos con anterioridad al año 1979 tendría un coste aproximado de 12,521,263 € (Fig. 7). A través de la intervención, se conseguiría una reducción de pérdidas energéticas de 7,126,808 kWh anuales, que inciden directamente en la demanda de calefacción. Esto significaría, siempre en el caso de demandas satisfechas y de acuerdo con el mix energético estimado, una reducción de

8.552.169,6 kWh al año de energía final y 3.898 toneladas de CO₂ al año. Esto supone la reducción del 59% del total de las pérdidas (7,126,808 kWh) en los edificios intervenidos, lo que se traduce en la reducción del 50% de las pérdidas de energía totales de la edificación residencial del barrio. La superficie total de envolvente intervenida asciende a unos 139.454 m² (suelos en contacto con el exterior 481 m², cubiertas 36.447 m² y fachadas 102.526 m²).

En la Fig. 7 se representa la cuantificación de la reducción de las pérdidas energéticas y el coste mediante la comparación del Estado Actual con el Estado Reformado para todo el barrio y para sus edificios tipo.

La repercusión de la inversión en la reducción de la demanda de calefacción presenta una relación lineal con un factor de 0,55 kWh anuales de reducción de pérdidas por cada euro invertido o lo que es lo mismo, la reducción anual de cada kWh supone una inversión de 1,76€ (Fig. 8). El edificio en el que la rehabilitación resulta más rentable es el bloque, seguido del unifamiliar y en último lugar la torre.

Escala	Pérdidas EA (kWh año)	Pérdidas ER (kWh año)	Reducción pérdidas (kWh)	Reducción pérdidas (%)	Coste (€)	Coste del kWh
PD Canillas	14.220.845	7.094.038	7.126.808	50	12.521.263	1,76
Anteriores a 1979 PD	12.012.440	4.885.632		60		
Edificio en torre 4994547VK4749F	339.075	142.924	196.151	58	409.438	2,09
Edificio en bloque 4992543VK4749D	43.105	17.477	25.628	59	43.051	1,68
Vivienda unifamiliar 5292448VK4759C	10.388	4.228	6.160	59	10.589	1,72

Fig. 7/ Resultados para el Poblado Dirigido de Canillas, y para cada tipo de edificio.

Fuente: Elaboración propia

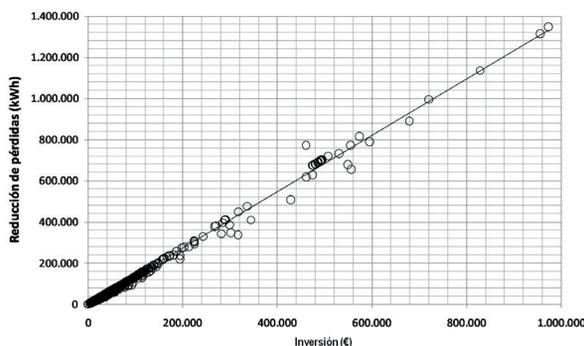


Fig. 8/ Reducción de pérdidas asociadas al coste de la inversión inicial por edificio.

Fuente: Elaboración propia

La Fig. 9 representa dos mapas de la demanda energética de calefacción de los edificios residenciales del barrio en el estado actual y en el reformado (mejora de la envolvente opaca de aquellos anteriores a 1979). La gráfica representa los resultados de demanda de calefacción (kWh/m^2 año), clasificados conforme al indicador de la calidad térmica de sus envolventes (Coeficiente Global de Transmisión Térmica K_G). Los edificios existentes aparecen representados por un punto y los reformados con un círculo. En este estudio no se ha contemplado la mejora de los edificios posteriores a 1979 y por tanto estos aparecen representados con los dos símbolos (EA=ER).

El análisis de la gráfica permite deducir que la calidad térmica de la envolvente (K_G) clasifica claramente los edificios en cuatro grupos. Los edificios anteriores a 1979 ($K_G > 1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$) son los de peor calidad térmica. Sus demandas energéticas de calefacción (D_{cal}) varían entre 50 y 250 kWh/m^2 anuales. Los edificios construidos entre 1979 y 2006 (NBE-CT-79, 1979) tienen sus K_G aproximadamente entre 1.2 y 1.4 $\text{W/m}^2\text{K}$ y su D_{cal} varía entre 25 y 100 kWh/m^2 . Los edificios construidos durante el periodo de vigencia del CTE ($0.7 < K_G < 1$) son los más eficientes de los edificios en estado actual ($10 < D_{\text{cal}} < 60 \text{ kWh/m}^2$). Tras la intervención, la mayor parte de los edificios anteriores a

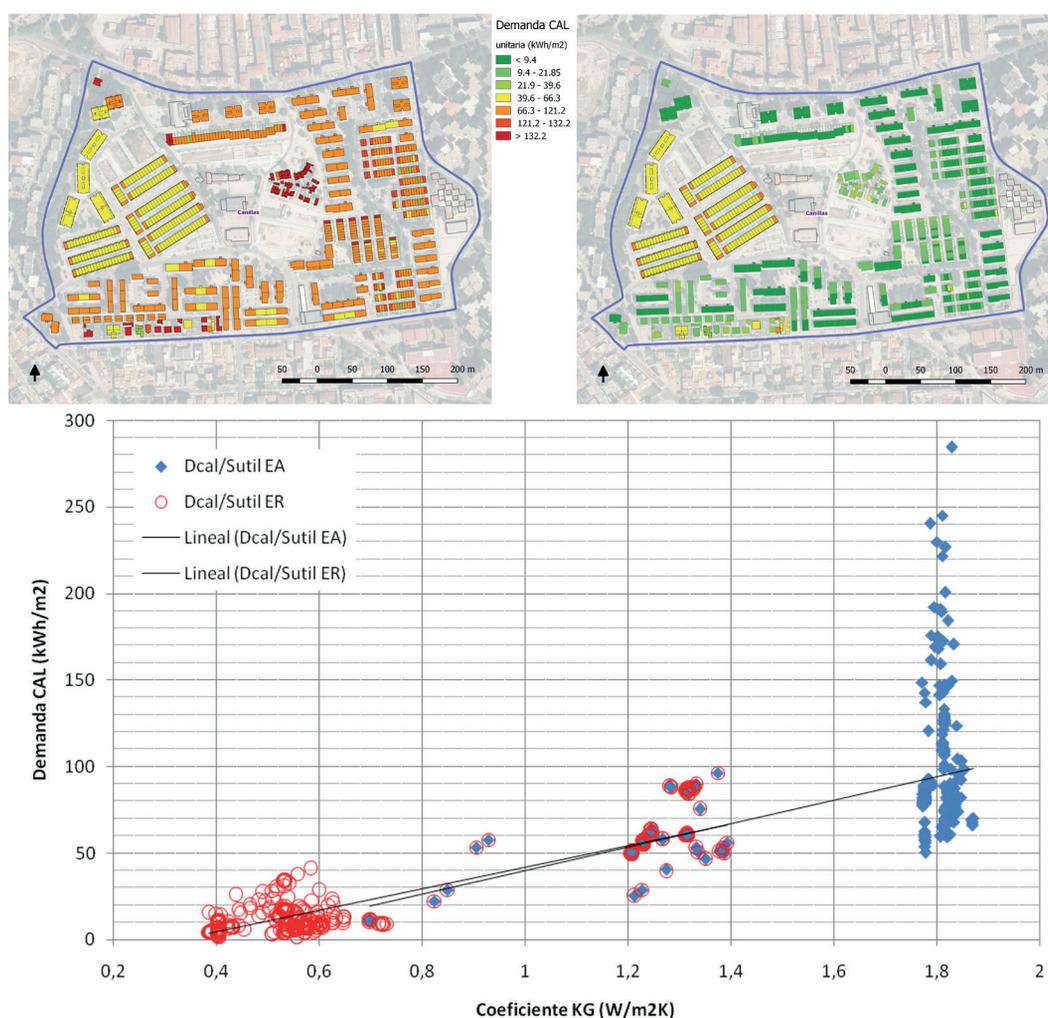


Fig. 9/ Demanda energética de calefacción unitaria (kWh/m^2 año) asociadas a la edificación del PD Canillas, (a) antes y (b) después de la rehabilitación. (c) Representación de la demanda de calefacción de los edificios del Barrio de Canillas, respecto de su coeficiente K_G antes (azul) y después de la rehabilitación (rojo).

Fuente: Elaboración propia

1979 pasan a ser los de mejor desempeño térmico ($K_G < 0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$), variando su D_{cal} entre 2 y 40 kWh/m² al año. Las pérdidas energéticas se reducen drásticamente en los edificios intervenidos. A medida que se refuerza la envolvente, se reduce proporcionalmente la variabilidad de la demanda de calefacción. Se puede comprobar, desde el punto de vista del comportamiento bioclimático de la edificación, que la transmitancia térmica de la envolvente no es el único factor influyente en la demanda, aunque su mejora consigue reducir la influencia de las demás variables.

En el caso de que las demandas de calefacción de todas las viviendas de la edificación del barrio fueran satisfechas, el ahorro en las facturas energéticas ascendería a unos 733.000 € anuales, lo que permitiría una amortización de la inversión en 17 años. Este valor corresponde a un escenario estático en el que no hubiera variaciones en el precio de la energía. Los periodos de amortización estimados son coherentes con los de estudios anteriores.

“El coste de la inversión inicial de las reformas profundas se puede recuperar completamente

tras 20 años de ahorro de energía (con el 5% de coste de financiación)” (TRAGOPOULOS & SWEATMAN, 2012).

Los edificios que más rápido amortizan su inversión son los unifamiliares, que presentan unas peores condiciones de partida. También los edificios terciarios del barrio presentan un periodo de amortización teórico relativamente corto con respecto al resto de la muestra. La amortización es en este caso menor en los edificios en los que la cubierta tiene un gran peso respecto del total de la superficie de envolvente (vivienda unifamiliar y terciarios). Esto es así porque se trata de un barrio con cubiertas planas y se ha optado por valorar la solución más económica (del orden de 60 €/m²). En el caso de que hubiera que intervenir sobre cubiertas inclinadas o en caso de instalación de cubiertas verdes, el coste de intervención en cubiertas aumentaría y el periodo de amortización subiría. La solución adoptada para la fachada, del orden de 100€/m², es la que tiene un mayor coste de las adoptadas y por tanto los edificios en torre tienen un mayor periodo de retorno (FIG. 10).

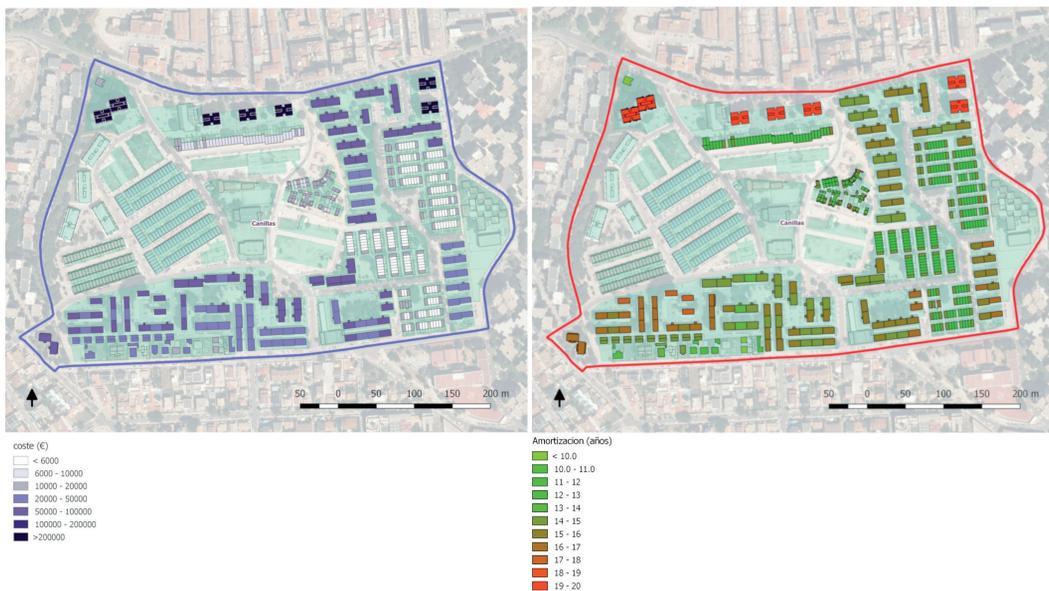


FIG. 10/ Coste de inversión (€) y periodo de amortización teórico (años) para los edificios intervenidos.

Fuente: Elaboración propia

5. Conclusiones

El procesamiento de los datos catastrales permite una aproximación al comportamiento energético de conjuntos de edificios, atendiendo a las características de la trama urbana. Desde el punto de vista urbanístico, la herramienta propuesta es capaz de calcular indicadores complejos, útiles para determinar la influencia de la forma urbana en las necesidades energéticas de la ciudad. Se ha logrado realizar un modelo energético del parque residencial existente utilizando datos catastrales y la estimación sobre su calidad constructiva a partir de bases de datos existentes, estudios basados en muestras y la normativa aplicable en la fecha de construcción. Se ha identificado la calidad térmica de cada edificio a partir de la estimación de las pérdidas energéticas a través de la envolvente y se ha podido cuantificar su demanda de calefacción introduciendo datos de la radiación solar.

La aplicación de las técnicas de programación para el análisis de Sistemas Complejos (Big Data) aplicado a la Ciencia de Datos Urbanos (Urban Data Science) abre la vía para la automatización del proceso de datos y realizar estudios que incluyan amplias áreas de análisis. Esto permite recoger información muy exacta de la eficiencia energética de la edificación en tejidos urbanos complejos, superando las simplificaciones de los análisis basados en muestras de edificios representativos realizadas hasta la fecha. El tratamiento de las bases de datos catastrales permite nuevos niveles de detalle en los estudios urbanos que eran imposibles hasta el momento de la publicación de estos datos en abierto. En ese sentido se valora muy positivamente el trabajo de la Comisión Permanente del Catastro de la Unión Europea a favor de la transparencia de los datos existentes en registros públicos.

Se ha podido aumentar notablemente la resolución de los estudios energéticos a escala urbana, que hasta la fecha se han realizado a partir de la utilización de datos estadísticos agregados proveniente de los Censos de Población y Vivienda para definir clústeres de ineficiencia. La información catastral permite utilizar el edificio como unidad de análisis, contando con una ficha de datos energéticos para cada edificio (individuo) asociado a su referencia catastral. Además, si el tratamiento de la información catastral se agrupa a la escala de la sección censal, se posibilita la comparación de ambos cuerpos de datos. A modo de ejemplo: agregando al modelo datos estadísticos de población por sección censal

es posible obtener información relevante para un análisis socio-económico de las necesidades de energía por persona, grupos de edad, nivel de estudios, etc.

Se ha desarrollado un procedimiento detallado para el diseño de estrategias de rehabilitación energética que permite una cuantificación teórica de la demanda de calefacción de la edificación residencial. Se ha podido definir un indicador de eficiencia energética pasiva para tejidos urbanos que engloba aspectos del urbanismo y la arquitectura (las dimensiones, orientación y forma de los edificios y su disposición urbana...), aspectos constructivos (la calidad de los elementos de la envolvente, el porcentaje de huecos...) y el computo aproximado de la radiación solar incidente en la edificación. Este indicador es útil para detectar áreas prioritarias de edificación ineficiente y dentro de ellas define cuales son los edificios que precisan de una mayor cantidad de energía para satisfacer las necesidades básicas de confort. De los resultados se desprende que la morfología urbana tiene gran influencia en las demandas energéticas de los edificios, que se suman a los aspectos constructivos en los cuales se focaliza normalmente la atención. La transmitancia térmica de los cerramientos es un aspecto a tener en cuenta, pero no el único, ya que la morfología urbana está influyendo tanto o más en la demanda de los edificios.

El volumen de los datos demuestra ser eficaz para el diagnóstico de las necesidades a la escala de barrio. La potencia en el manejo de datos de las aplicaciones para Big Data abre la posibilidad de su aplicación a escala municipal y, a partir de la adición de municipios, hacer estimaciones muy precisas de las necesidades a escala estatal.

A partir de los resultados de este método se han estimado indicadores para la caracterización de la eficiencia energética a la escala urbana. Algunos de estos parámetros pueden incorporarse en los Estándares de Calidad Urbana de las ciudades españolas (HERNÁNDEZ AJA, 1995) para que estos índices puedan incluir información acerca de la eficiencia energética de los tejidos urbanos. En concreto la metodología propuesta hace posible determinar, a partir de resultados pormenorizados para cada edificio, los datos agrupados por barrios de al menos los siguientes factores influyentes:

- Superficie acondicionada por usos (m²)
- Superficie y orientación de cada elemento de la envolvente (m²)

- Altura (m) y volumen (m³) de la edificación
- Compacidad (m³/m²) / Factor de Forma (m²/m³)
- Densidad:
 - Bruta
 - RSD (Residencial Surface Density): Densidad residencial
- FAR (Floor/Area ratio). Ocupación
- BCR (Building Coverage Ratio). Edificabilidad
- K_{Gurb} Coeficiente de Transmisión Térmica Global Urbano (W/m²K)
- Q_t Pérdidas energéticas totales por edificio, barrio, usos, ... (kWh)
- IEE_{urb} Indicador de Eficiencia Energética urbana (kWh/m³)
- Dcal Demanda de calefacción total y unitaria por edificio residencial y para barrios residenciales
- Radiación solar incidente en la envolvente (fachadas este-sur-oeste y cubiertas) y radiación solar pasiva aprovechada

La envolvente opaca presenta un enorme potencial de mejora. Se verifica, para el barrio del estudio de caso, que las fachadas son el elemento que provoca las mayores pérdidas energéticas de toda la envolvente. La cubierta significa el elemento más débil, pero computa una menor cantidad de pérdidas en valor absoluto porque su superficie es menor que la de las fachadas. No obstante, resulta de importancia crucial para la habitabilidad de las viviendas de la última planta. En la edificación residencial, solamente el tipo unifamiliar registra las mayores pérdidas a través de la cubierta. Los suelos son los elementos con menores pérdidas, en el estudio de caso representan la mitad de las pérdidas de la cubierta. A pesar de que su superficie bruta es prácticamente la misma, la transmisión térmica a través de los mismos es menor. Los suelos en contacto con el aire exterior son los más débiles, pero apenas representan el 2% del total de suelos. Además, se encuentran en la edificación más moderna, con lo que el desempeño térmico de estos elementos se presume de mejor calidad que los de periodos anteriores a la normativa NBE CT 79.

Para un mejor ajuste del modelo es necesario avanzar en la caracterización de los huecos en fachada, puesto que las ventanas son elementos de vida útil relativamente corta para la escala de la edificación y no pueden caracterizarse por su periodo de construcción. Para una caracterización pormenorizada del estado actual de los huecos de fachada es necesario un trabajo de campo con más profundidad en los barrios a analizar.

6. Bibliografía

- ADRASE - Acceso a datos de radiación solar de España—Mapa zona Península. (n.d.). Retrieved 17 December 2018, from <http://adrase.com/acceso-a-los-mapas/mapa-zona-peninsula.html>
- AEAT. (n.d.). *Tipos reducidos en obras en viviendas*. Agencia Tributaria. Retrieved 1 October 2020, from https://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio/Segmentos/Ciudadanos/Vivienda/Obras_en_viviendas/IVA/Tipos_reducidos_en_obras_en_viviendas.shtml
- AKSOEZEN, M. & al. (2015): Building age as an indicator for energy consumption. *Energy and Buildings*, 87, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.074>
- ALONSO, C. (2015): *Rehabilitación energética de fachadas: Propuesta metodológica para la evaluación de soluciones innovadoras, basándose en el diagnóstico de viviendas sociales construidas entre 1940 y 1980*. Universidad Politécnica de Madrid.
- BERTOLDI, P. & al. (2020): How to finance energy renovation of residential buildings: Review of current and emerging financing instruments in the EU. *WIREs Energy and Environment*. <https://doi.org/10.1002/wene.384>
- CASQUERO-MODREGO, N. & GOÑI-MODREGO, M. (2019): Energy retrofit of an existing affordable building envelope in Spain, case study. *Sustainable Cities and Society*, 44, 395–405. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.034>
- CASTAÑO, E. & al. (2012): *Guía de recomendaciones de eficiencia energética; certificación de edificios existentes CE3*. IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- CASTELL HERRERA, V. & MIÑANA GINER, V., & SIGNES OROVAY, J. (2018): *Generador de precios de la construcción en Madrid*.
- CNM. (2017): *Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. Comparador de Ofertas de Energía: Gas y Electricidad*. <https://comparadorofertasenergia.cnm.es/comparador/index.cfm?js=1&e=N>
- Directrices que acompañan al Reglamento Delegado (UE) n° 244/2012 de la Comisión, de 16 de enero de 2012, que complementa la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios, estableciendo un marco metodológico comparativo para calcular los niveles óptimos de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios y de sus elementos*, (2012) (testimony of Comisión Europea): [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:52012XC0419\(02\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:52012XC0419(02))
- CTE. (2017, March): *Herramienta unificada LIDER-CALENER (HULC)*: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener.html>
- Documento de Apoyo al Documento Básico DB-HE Ahorro de energía. Código Técnico de la Edificación. DA DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente*, (2020) (testimony of CTE DA DB-HE / 1):

- CUCHÍ, A. & SWEATMAN, P. (2014): *Informe GTR 2014. Estrategia para la rehabilitación*. Grupo de Trabajo sobre Rehabilitación (GTR): <https://gbce.es/recursos/informe-gtr-2014/>
- DALLE, M. & al. (2010): La generación de empleo en la rehabilitación y modernización energética de edificios y viviendas. *Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS)*, 198.
- DE VITA, A. & al. (2016): *EU reference scenario 2016: Energy, transport and GHG emissions : trends to 2050*. Publications Office. <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:MJ0115793:EN:HTML>
- EUROPEAN COMMISSION (2017): *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis.html>
- (2020a): *A European Green Deal* [Text]. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- (2020b, June 4): *Renovation wave* [Text]. https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en
- EUROSTAT. (2017, November 29): Energy prices in 2017 Household energy prices in the EU down compared with 2016. *EUROSTAT News Release*.
- FREED, M. & FELDER, F. A. (2017): Non-energy benefits: Workhorse or unicorn of energy efficiency programs? *The Electricity Journal*, 30(1), 43–46. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2016.12.004>
- GIANCOLA, E. & (2014): Evaluating rehabilitation of the social housing envelope: Experimental assessment of thermal indoor improvements during actual operating conditions in dry hot climate, a case study. *Energy and Buildings*, 75, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.010>
- HERNÁNDEZ AJA, A. (1995): Análisis de los estándares de calidad urbana en el planeamiento de las ciudades españolas. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 0(11): <http://polired.upm.es/index.php/ciur/article/view/225>
- IDAE. (2011a): *Escala de calificación energética para edificios existentes*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ministerio de Fomento. http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/OtrosDocumentos/Calificaci%C3%B3n%20energ%C3%A9tica.%20Viviendas/Escala_Calif%20Edif%20Existentes_accesible.pdf
- (2011b): *Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe Final*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. www.idae.es/uploads/documentos/documentos_informe_spahousec_acc_f68291a3.pdf
- INE. (2011): *Censo de Población y Viviendas de 2011*. Instituto Nacional de Estadística. http://www.ine.es/censos2011_datos/cen11_datos_inicio.htm
- UNE EN ISO 13790: 2011 | ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS - CALCULATION OF ENERGY USE FOR SPACE HEATING AND COOLING (ISO 13790:2008), (2008) (testimony of ISO 13790): https://infostore.saiglobal.com/en-gb/standards/une-en-iso-13790-2011-33778_SAIG_AENOR_AENOR_73811/
- JRC - EUROPEAN COMISION. (2017): *PV potential estimation utility*. Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
- LAO, Jose (2014): *Anàlisi dels teixits urbans des de l'òptica energètica—Àrea metropolitana de Barcelona*. Barcelona Regional. <http://www.amb.cat/web/medi-ambient/actualitat/publicacions/>
- LENG, H. & al. (2020): Urban morphology and building heating energy consumption: Evidence from Harbin, a severe cold region city. *Energy and Buildings*, 224, 110143. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110143>
- LIU, X. & SWEENEY, J. (2012): Modelling the impact of urban form on household energy demand and related CO2 emissions in the Greater Dublin Region. *Energy Policy*, 46, 359–369. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.070>
- LUXÁN GARCÍA DE DIEGO, M. & al. (2017): *Re-habilitación exprés para hogares vulnerables. Soluciones de bajo coste*. Fundación Gas Natural Fenosa. <http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/publicacion/re-habilitacion-expres-hogares-vulnerables-soluciones-coste/>
- MARTÍN-CONSUEGRA ÁVILA, F. (2019): *Análisis de datos espaciales para la erradicación de la pobreza energética en la rehabilitación urbana: El caso de Madrid* (east=-3.7548539; north=40.3879228; name=Aluche, Madrid, Comunidad de Madrid, España) [Phd, E.T.S. Arquitectura (UPM)]. <http://oa.upm.es/62611/>
- & DE FRUTOS, F. & OTEIZA, I. & HERNÁNDEZ AJA, A. (2018): Use of cadastral data to assess urban scale building energy loss. Application to a deprived quarter in Madrid. *Energy and Buildings*, 171, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.007>
- & HERNÁNDEZ AJA, A. & OTEIZA I., & ALONSO, C. (2016): Energy needs and vulnerability estimation at an urban scale for residential neighbourhoods heating in Madrid (Spain): *Proceedings of PLEA 2016 Los Angeles - 32th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 3, 1413–1419.
- & HERNÁNDEZ-AJA, A. & OTEIZA, I., & ALONSO, C. (2019): Distribución de la pobreza energética en la ciudad de Madrid (España): *Revista EURE - Revista de Estudios Urbano Regionales*, 45(135): <http://www.eure.ci/index.php/eure/article/view/2723>
- MINISTERIO DE FOMENTO (2013): *Report on cost optimal calculations and comparison with the current and future energy performance requirements of buildings in Spain* (Version 1.0): Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo.
- (2017): *ERESEE 2017. Actualización de la estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España*. Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda. <https://www.fomento.gob.es/el-ministerio/planes-estrategicos/estrategia-a-largo-plazo-para-la-rehabilitacion-energetica-en-el-sector-de-la-edificacion-en-espana>
- (2019): Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE Ahorro de energía, Real Decreto 732/2019, 20 diciembre: <https://www.>

- codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia.html
- MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA (2020): *ERESEE 2020. Actualización 2020 de la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España*. <https://www.mitma.es/el-ministerio/planes-estrategicos/estrategia-a-largo-plazo-para-la-rehabilitacion-energetica-en-el-sector-de-la-edificacion-en-espana>
- MIYABI & CENER. (2012): *Guía de recomendaciones de eficiencia energética; certificación de edificios existentes CE3X*. IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- NÆSS-SCHMIDT H. S. & Bo WESTH Hansen, M. & VON UTFALL DANIELSSON, C. (2012): *Multiple benefits of investing in energy efficient renovation of buildings*. Copenhagen Economics. <http://www.copenhageneconomics.com/publications/publication/multiple-benefits-of-investing-in-energy-efficient-renovation-of-buildings>
- NBE-CT-79. (1979): *NBE-CT-79. Condiciones Térmicas de los Edificios* (Presidencia del Gobierno): Madrid.
- OTEIZA, I. & al. (2016): *Proyecto REFAVIV. Rehabilitación energética de la fachada de viviendas sociales, con productos innovadores con Documento de Idoneidad Técnica (DIT, DITE): Impacto económico, social y ambiental*.
- & al. (2018): *La envolvente energética de la vivienda social. El caso de Madrid en el periodo 1939-1979*. Editorial CSIC. <http://editorial.csic.es/publicaciones/libros/13121/978-84-00-10454-2/la-envolvente-energetica-de-la-vivienda-social-el.html>
- & al. (2015): *Energy Retrofitting for Social Housing by Improving the Building Envelope: Madrid, 1939-1979*. <http://ebooks.benthamscience.com/book/9781681080642/chapter/131498/>
- RAMÍREZ PEREA, P. (2013): *Los números gordos de la demanda de climatización en viviendas*. https://issuu.com/rpp_arquitectos/docs/20131231_numeros_gordos_demanda_cl
- SANTIAGO, E. de. (2014): *La estrategia para la rehabilitación energética en el sector de la edificación residencial en España: Metodología y principales resultados*. *Ciudad y Territorio: Estudios Territoriales*, 182, 773–788.
- SEDE ELECTRÓNICA DE CATASTRO (2011): *Servicios web libres del catastro*. Dirección General de Catastro. http://www.catastro.minhap.gob.es/ws/Webservices_Libres.pdf
- (2014): *Modelo de Datos de Cartografía Vectorial. Formato shapefile 2014—Manual descriptivo*. Dirección General de Catastro. http://www.catastro.minhap.es/ayuda/manual_descriptivo_shapefile.pdf
- TRAGOPOULOS, G. & SWEATMAN, P. (2012): *Retos y oportunidades de financiación para la rehabilitación energética de viviendas en España*. WWF/ Adena.
- VARTHOLOMAIOS, A. (2017): *A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city*. *Sustainable Cities and Society*, 28, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.006>
- WWF, VELÁZQUEZ, I & VERDAGUER, C & SANZ, A. & GÓMEZ, G. (2017): *Rehabilitación energética de viviendas Como mejorar la calidad de vida y combatir el cambio climático*. http://awsassets.wwf.es/downloads/RehabilitacionEnergeticaViviendas_%28completo%29.pdf