

## **41. Análisis de la influencia de variables relacionadas con el contexto urbano y el edificio en el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial**

**Braulio-Gonzalo, Marta<sup>(1,\*), Ruá Aguilar, M<sup>a</sup> José<sup>(1)</sup>, Bovea Edo, M<sup>a</sup> Dolores<sup>(1)</sup></sup>**

(\*) braulio@uji.es, teléfono: +34 964 72 91 64

(1) Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I, Castellón de la Plana

**Resumen** Los aspectos que influyen en el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial son numerosos. Además de las características del edificio, el urbanismo se considera un aspecto clave. Este trabajo presenta el análisis de la influencia de cinco covariables, a escala de edificio (factor de forma (S/V), año de construcción (A)), y a escala urbana (manzana urbana (MU), proporción de calle (H/W) y orientación (O)), sobre dos variables respuesta que evalúan el comportamiento energético pasivo: la demanda energética de refrigeración (DE<sub>r</sub>) y calefacción (DE<sub>c</sub>). Mediante simulación dinámica con EnergyPlus del comportamiento energético de varios edificios de un barrio de Castellón de la Plana (España), se obtiene el valor de las variables respuesta en función de las covariables. Considerando un enfoque bottom-up y mediante un análisis multivariante basado en Integrated Nested Laplace Approximation (INLA), se desarrollan en trabajos previos modelos de predicción de las variables respuesta en función de las covariables para el barrio. Del análisis estadístico se concluye que la covariable más significativa es S/V, seguida de A, H/W, MU y O. A pesar de la mayor influencia de los aspectos relacionados con el edificio, también los urbanos adquieren una relevancia notable. A partir de los resultados se establece un conjunto de estrategias de diseño y se plantea una nueva configuración urbana del barrio estudiado. La evaluación del comportamiento energético de la configuración urbana propuesta frente a la actual, supone un ahorro del 57,12% en la demanda energética.

**Palabras clave** Edificación residencial, Demanda energética, INLA, Estrategias pasivas

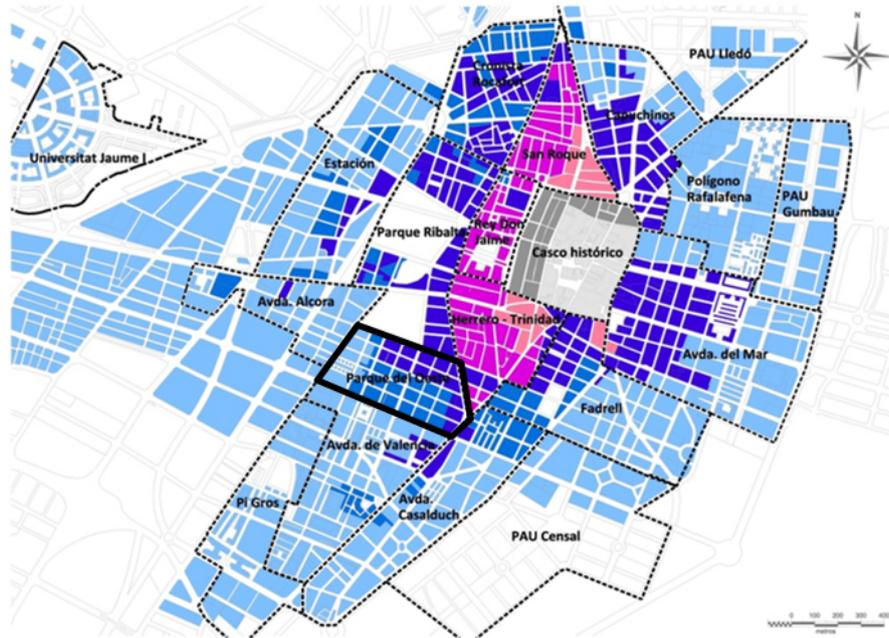
## 1 Introducción

En los últimos años son numerosos los estudios que analizan el impacto de los edificios en la demanda y el consumo energético global. Las áreas urbanas se perfilan como grandes consumidoras de energía y el parque edificatorio residencial tiene un gran impacto. La legislación en materia de eficiencia energética en los edificios es relativamente reciente y gran parte del parque de viviendas se encuentra hoy alejado de los estándares legislativos, siendo responsable de un alto porcentaje del consumo global de energía. Por ello, cobra importancia la intervención en la ciudad consolidada y la promoción de un desarrollo urbano más sostenible donde se haga énfasis en reducir la demanda energética mediante el uso de estrategias pasivas de ahorro energético.

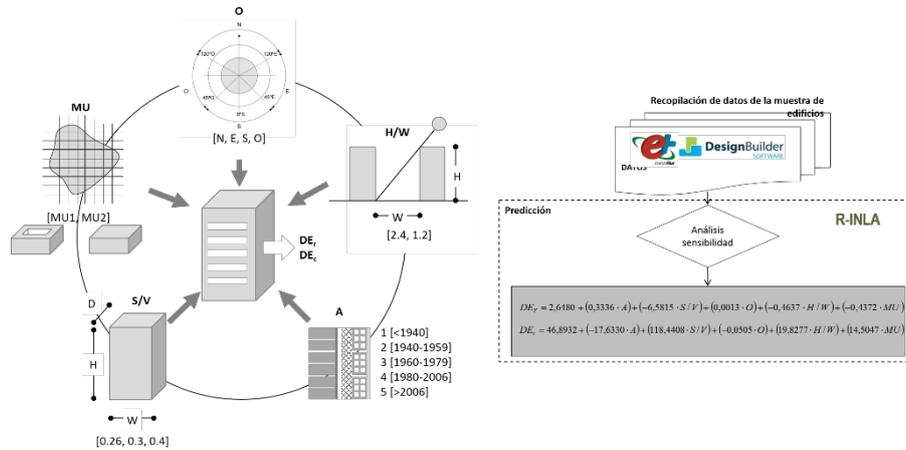
Este estudio parte de un trabajo previo en el que se desarrolla una metodología para la modelización del comportamiento energético del parque residencial existente (Braulio-Gonzalo et al., 2016). El modelo propuesto se basa en un enfoque bottom-up (Swan and Ugursal, 2009), mediante el cual se modeliza una muestra representativa de edificios para extrapolar, posteriormente, las conclusiones a una escala urbana.

En el presente estudio analiza la influencia de un conjunto de parámetros, tanto a escala de edificio como a escala urbana, sobre el comportamiento energético del parque edificatorio residencial existente. Para ello, se selecciona un barrio existente en la ciudad de Castellón de la Plana (España) (Figura 1), como caso de estudio, cuyo parque residencial es evaluado energéticamente mediante simulación dinámica con el software DesignBuilder (2015) y EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2013) como motor de cálculo. La selección de un conjunto de covariables a escala de edificio (factor de forma (S/V) y año de construcción (A)), y a escala urbana (manzana urbana (MU), proporción de calle (H/W) y orientación (O)) permite analizar su influencia sobre dos variables respuesta: la demanda energética de refrigeración ( $DE_r$ ) y calefacción ( $DE_c$ ).

El tratamiento estadístico de los datos mediante la metodología Integrated Nested Laplace Approximation (INLA) (Blangiardo and Camaletti, 2015) permite desarrollar una ecuación matemática de predicción de cada variable respuesta ( $DE_r$  y  $DE_c$ ) para estimar el comportamiento energético de cada uno de los edificios que compone el barrio analizado. La Figura 2 describen gráficamente las covariables y presenta las cuatro ecuaciones matemáticas. Además, INLA permite realizar un análisis de sensibilidad e identificar la significancia de las covariables, para proponer así un conjunto de estrategias pasivas de diseño que, a la hora de proyectar nuevas planificaciones urbanas, conlleven ahorros en la demanda energética.



**Fig. 1** Barrio analizado (Parque del Oeste) en el contexto de la ciudad de Castellón de la Plana



**Fig. 2** Descripción de las covariables (izquierda) y Ecuaciones de predicción de  $DE_r$  y  $DE_c$ , aptado de Braulio-Gonzalo et al. (2016) (derecha)

Teniendo en cuenta las conclusiones extraídas del análisis estadístico, se propone una nueva configuración urbana que es evaluada energéticamente. La comparativa entre el escenario actual y el propuesto permite estimar el ahorro que se podría alcanzar en la demanda energética integrando el uso de estrategias pasivas de diseño en el entramado urbano. Este estudio se plantea como respuesta a la ne-

cesidad actual de proporcionar herramientas de diagnóstico energético que asistan durante la toma de decisiones a las administraciones locales y a otros agentes involucrados en los procesos de actuación y regeneración urbana.

## 2 Metodología

Partiendo del trabajo previo anteriormente mencionado, en este estudio se analiza la influencia de las covariables (S/V, A, MU, H/W y O) sobre las variables respuesta ( $DE_r$  y  $DE_c$ ). Tras realizar el análisis estadístico mediante INLA, todas las covariables se identifican como significativas, de manera que tienen una influencia decisiva sobre la demanda energética del parque residencial. El orden de significancia es el siguiente: S/V, A, H/W, MU y O, estando A y H/W en un mismo nivel. Dicho análisis permite establecer un conjunto de recomendaciones para cada una de las covariables, que tienen como objeto reducir la demanda energética en una determinada área urbana. Estas recomendaciones, en forma de estrategias pasivas de diseño urbano, se emplean para proponer una nueva configuración urbana como alternativa al barrio existente. El diagnóstico energético del nuevo escenario permite realizar una comparativa con la situación actual y estimar el ahorro en la demanda energética que se podría alcanzar. La Figura 3 presenta la metodología seguida en este estudio.

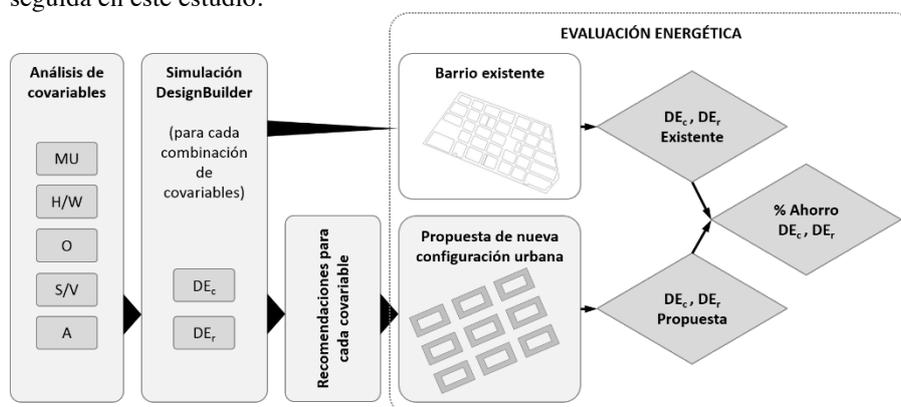


Fig. 3 Metodología

## 3 Análisis de covariables

En esta sección se muestran los resultados del análisis de las covariables. La Figura 4 presenta la variación de la demanda energética de calefacción y refrigeración en función de cada covariable. A partir las conclusiones obtenidas se establece,

para cada una de las covariables, un conjunto de estrategias a aplicar en el diseño de una configuración urbana. El análisis de las covariables se detalla en las siguientes secciones por orden de significancia.

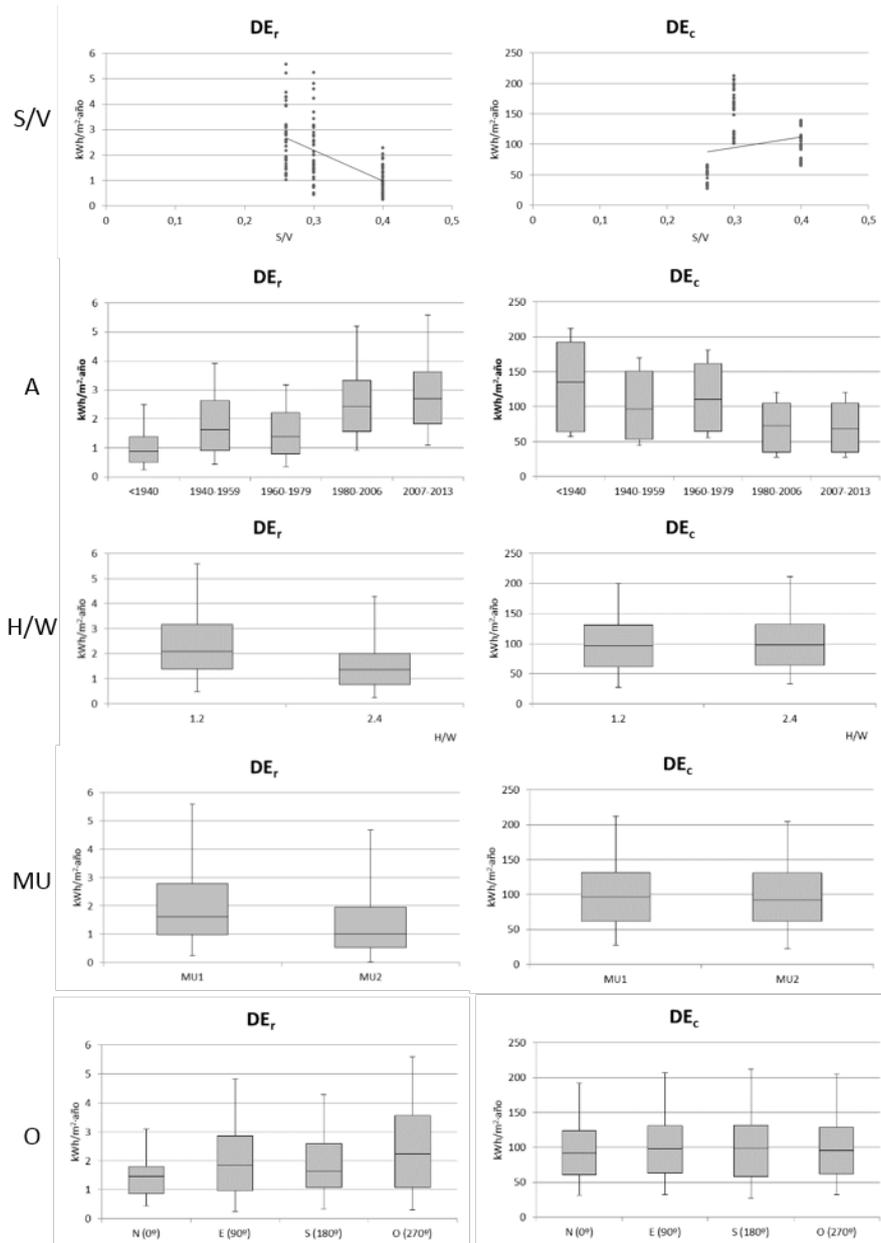


Fig. 4 Resultados de las variables respuesta en función de cada covariable

### ***3.1 Factor de forma S/V***

El factor de forma resulta la covariable más significativa. Los valores adoptados en el caso de aplicación fueron de 0.26, 0.3 y 0.4, obtenidos a partir de las tres tipologías edificatorias presentes en el barrio. Se observa que los edificios compactos, con menor factor S/V, presentan un mejor comportamiento energético en cuanto a calefacción, pero no frente a la refrigeración. Sin embargo, las demandas energéticas en condiciones de invierno superan ampliamente a las que se dan en condiciones de verano, por lo que, un menor valor de S/V es más conveniente desde el punto de vista del comportamiento energético.

### ***3.2 Año de construcción A***

La segunda covariable más significativa es el año de construcción. En este caso, el año de construcción se asocia a la transmitancia térmica de la envolvente térmica de los edificios, ya que sus características constructivas y la disposición de aislamiento térmico influye en su demanda energética. La solución constructiva depende, asimismo, del año de construcción, de forma que se establecen 5 periodos temporales a cada uno de los cuales se asocia un paquete de soluciones constructivas de fachada, medianera, cubierta, suelo, huecos y puentes térmicos. Dichos periodos comprenden a los edificios construidos en: anteriormente a 1940, 1940-1959, 1960-1979, 1980-2006, posteriormente a 2006.

Los resultados para esta variable muestran que existe una tendencia general a disminuir la  $DE_c$  en los edificios de construcción más reciente. Tan solo se observa un ligero cambio de tendencia en los edificios construidos en el periodo 3 (1960-1979), debido a la mengua en la calidad constructiva de los cerramientos de dicha época. Existe una tendencia general en aumentar la  $DE_c$  en los edificios más actuales, que responde a la pérdida de inercia térmica de los cerramientos de la envolvente.

### ***3.3 Ratio altura/anchura de calle H/W***

La ratio H/W, que define la proporción de la calle, es responsable de la accesibilidad solar en las fachadas de los edificios. De acuerdo al Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) del área urbana estudiada, se analizan las alturas máximas permitidas (8 plantas, 24 m) y los anchos de calle (10 m y 20 m). Ello da lugar a dos valores de H/W, 2.4 en las calles más estrechas y 1.2 en las calles más anchas. Los resultados de la simulación energética indican que ratios altas de H/W impli-

can mayor  $DE_c$ , ya que las calles estrechas con edificios altos limitan la accesibilidad solar. Sin embargo, ratios altos de H/W contribuyen a disminuir la  $DE_r$ .

Para determinar la proporción H/W óptima, se considera que un elemento tiene accesibilidad solar si recibe al menos dos horas de radiación solar directa durante el solsticio de invierno (Higueras, 2006). Así, para la latitud de Castellón de la Plana (39.98°) en el solsticio de invierno (elevación solar 26.61°, a las 12:00 h), la relación H/W ha de ser de 0.50 (Braulio-Gonzalo, 2016), lo que implica que el ancho de la calle (W) debe ser el doble de la altura de la edificación (H).

### ***3.4 Tipo de manzana MU***

En el barrio objeto de estudio se identifican dos tipologías de manzana. La tipología MU1, con grandes patios de manzana interiores, resulta más favorable en el comportamiento energético de los edificios, pues contribuye a reducir  $DE_c$ , significativamente más elevada que  $DE_r$ . Por otro lado, la MU2, manzana cerrada sin grandes patios interiores, reducen la posibilidad de ganancias solares durante el invierno y también la posibilidad de ventilación natural durante el verano. Se observa que  $DE_r$  es menor en MU2 y  $DE_c$  es prácticamente la misma en MU2 y MU1. El hecho de existir un patio de manzana amplio en MU1, genera una doble fachada en los edificios, muy beneficiosa para un mejor aprovechamiento del soleamiento.

### ***3.5 Orientación O***

Esta covariable se muestra como la menos significativa de las cinco que integran el modelo. Ello viene motivado por la influencia de la estructura urbana en la demanda energética, que modifica el patrón natural de comportamiento de la orientación. En el caso de estudio, la MU1 proporciona al edificio dos orientaciones opuestas, la fachada principal y la fachada recayente al patio. Así, se observa que existe muy poca variación entre los datos de las parejas de orientaciones S-N y E-O. En el caso de MU2, el edificio únicamente consta de una fachada que recae a la calle y que tiene una determinada orientación, por lo que la variabilidad de  $DE_r$  entre las cuatro orientaciones es notable.

Las calles con eje N-S, generan fachadas orientadas al E y al O, que reciben horas de sol de mañana o de tarde, respectivamente. Esta opción impide que las fachadas tengan horas de sol en las horas centrales del día, cuando se puede lograr un mayor aprovechamiento. En las calles con eje E-O, se generan fachadas orientadas al N y al S. La fachada S es la óptima para el invierno y también es bastante favorable para el verano, ya que no genera una alta demanda de refrigeración y, además, resulta más sencilla de proteger frente al soleamiento que las fachadas E y

O. Así, la orientación N-S de las fachadas resulta la más favorable. Sin embargo, Higuera (2006) y Olgyay (1963) recomiendan orientar ligeramente la fachada hacia el E, considerada como la ideal para la zona templada, por recibir gran parte de la radiación de la mañana y menor porcentaje durante la tarde, cuando en verano el exceso de radiación resulta muy perjudicial.

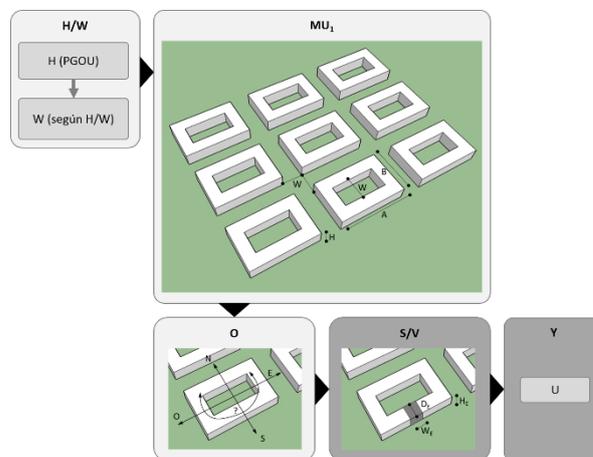
### ***3.6 Estrategias de diseño pasivas para reducir la demanda energética***

El análisis realizado anteriormente sobre cada una de las covariables permite establecer un conjunto de recomendaciones para el diseño del planeamiento urbano, adecuado para latitudes próximas a 40° en el hemisferio Norte, que se resumen a continuación:

- **S/V**: Valores bajos del factor de forma S/V (edificios más compactos)
- **A**: Soluciones constructivas de la envolvente con valores bajos de transmitancia térmica.
- **H/W**: La ratio óptima H/W es de 0,50.
- **MU**: La forma de las manzanas debe ser rectangular (manteniendo la proporción longitud > 1,5 anchura (Olgyay, 1963)) y su eje longitudinal debe desarrollarse en la directriz solar E-O, de manera que la mayor superficie de fachada quede orientada a S. La tipología de manzana MU1 es más apropiada, ya que permite abrir dos fachadas en los edificios orientadas a N-S.
- **O**: Orientar el eje de las calles en dirección E-O, formando el viario una retícula rectangular y orientando las fachadas de la mayoría de los edificios a N y a S. Los edificios deben diseñarse de manera que cada una de las viviendas tenga dos fachadas en orientaciones opuestas, o bien S-N, o bien E-O. La orientación principal de los edificios a SE (acimut 18°) es, a priori, mejor que el S (0° de acimut), aunque debe verificarse experimentalmente. Esto tiene influencia en la covariable H/W, ya que orientar la retícula de manzanas a SE permite reducir el ancho de calle (W), propiciando estructuras urbanas más compactas. Así, en edificaciones orientadas a 18°E, la relación máxima H/W podría aumentarse a 0,53.

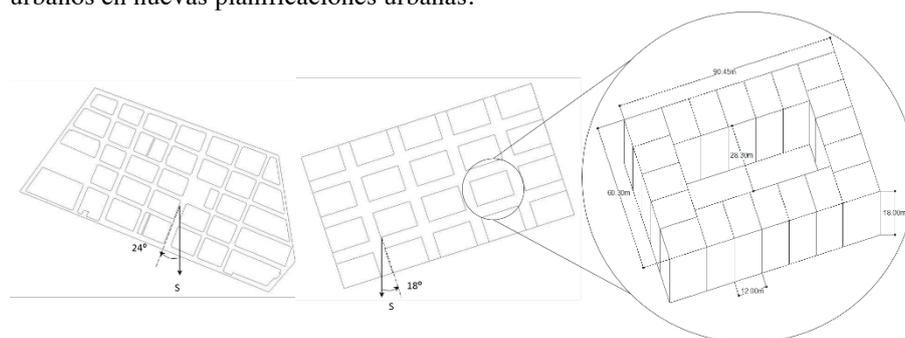
## **4 Propuesta de nueva configuración urbana**

Siguiendo estos criterios, se busca conformar la manzana urbana óptima, analizando el efecto de sus dimensiones y proporciones. Cada una de estas recomendaciones debe ser aplicada siguiendo un orden lógico en el diseño de los elementos del planeamiento urbano, desde la escala urbana a la de edificio. El procedimiento seguido para configurar la nueva estructura urbana se muestra en la Figura 5.



**Fig. 5** Procedimiento para definir la nueva propuesta de configuración urbana

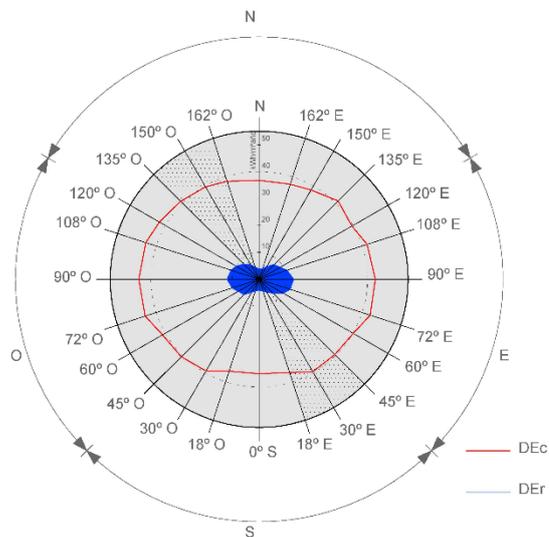
Identificada la MU1 como manzana idónea, el parámetro que condiciona sus dimensiones es la altura de las edificaciones, dada por el número máximo de plantas permitido por el PGOU. Para conformar una manzana con patio interior que asegure el soleamiento en la fachada S de los edificios que recaen a él, la relación H/W también debe respetarse cuando se determina el ancho de manzana óptimo. Respetar las 8 plantas permitidas por el PGOU implicaría generar manzanas demasiado extensas, por lo que se propone reducir el número máximo de plantas a 6. Ello da lugar a un ancho de calle de 28,30 m, más coherente con el trazado actual urbano. Así, la configuración urbana propuesta quedaría según se muestra gráficamente en la Figura 6. Esta podría ser considerada a la hora diseñar entramados urbanos en nuevas planificaciones urbanas.



**Fig. 6** Barrio actual (izquierda) y nueva configuración urbana (derecha)

Llegados a este punto, se realizan las simulaciones energéticas necesarias para evaluar la totalidad de los edificios que compondrían un barrio con dicha morfología urbana. Así, se simula un edificio plurifamiliar con un bajo factor de forma

S/V<sub>0,26</sub> ubicado en la manzana urbana descrita (MU<sub>1</sub> y H/W<sub>0,53</sub>) y con unas soluciones de envolvente térmica del periodo temporal 5 (A), en 24 posibles orientaciones (O). Los resultados de dichas simulaciones, para DE<sub>c</sub> y DE<sub>r</sub>, se muestran en la Figura 7, los cuales permiten identificar la orientación óptima en la que se registran los menores valores de las variables respuesta. Se observa que este óptimo se da en un rango de orientaciones comprendido entre 18°E y 45°E, generando fachadas opuestas entre 135°O y 162°O. Así, se registran valores bajos de DE<sub>c</sub>, al mismo tiempo que los valores de DE<sub>r</sub> son aceptables. Su rango simétrico, entre 18°O y 45°O, podría resultar también favorable. Sin embargo, la radiación solar de la mañana es más adecuada que la de la tarde, como consecuencia de las altas temperaturas de la tarde.



**Fig. 7** Gráfico de relación entre DE y orientación: orientación óptima

La Tabla 1 presenta los resultados comparativos de DE<sub>c</sub> y DE<sub>r</sub>, entre la situación actual en el barrio y la nueva configuración urbana propuesta.

**Tabla 1** Comparativa entre la configuración existente y propuesta (Braulio-Gonzalo, 2016)

	C. existente	C. propuesta	Variación %
<b>Sup.construida (m<sup>2</sup>)</b>	313.301,00	275.849,40	-11,95
<b>DE<sub>r</sub> (MWh/año)</b>	523,53	1.073,88	205,13
<b>DE<sub>c</sub> (MWh/año)</b>	29.354,89	11.739,32	-60,01
<b>DE<sub>G</sub>* (MWh/año)</b>	29.878,42	12.813,20	-57,12

\*DE<sub>G</sub>: Demanda energética global

La evaluación energética de ambos escenarios, la configuración existente en el barrio y la configuración propuesta, permite estimar una reducción de la demanda

energética de calefacción del 60,01%. La demanda de refrigeración, sin embargo, sufre un aumento significativo, del 205,13%. En la situación existente, al ser las calles estrechas, en verano apenas accede el sol a las fachadas de los edificios, de manera que la demanda de refrigeración es muy baja. Sin embargo, ello conlleva una importante penalización en la demanda energética de calefacción. Por este motivo, la consiguiente disminución de la demanda de calefacción en la nueva situación propuesta, compensa con creces el aumento en la demanda de refrigeración, pues entre ambas, se lograría una reducción de la demanda energética global del 57,12%, siendo este un valor muy significativo. Se corrobora así la importancia que tiene la morfología urbana en el comportamiento energético del parque edificado.

## 5 Conclusiones

El presente trabajo analiza la influencia de los parámetros urbanos y del edificio en el comportamiento energético del parque residencial edificado, en base a su demanda energética. Partiendo de un trabajo previo, en el que se evalúa la demanda energética de un barrio de Castellón de la Plana siguiendo a través de un modelo de predicción desarrollado, en este trabajo se identifican un conjunto de estrategias pasivas de diseño del entramado urbano para reducir la demanda energética. El conjunto de estrategias permite proponer una nueva configuración urbana, cuya evaluación energética denota que es posible alcanzar importantes ahorros en la demanda energética (57,12%) teniendo en cuenta únicamente aspectos pasivos de diseño del entorno urbano y del edificio.

Los resultados del análisis ponen de manifiesto que los aspectos relacionados con el edificio, el factor de forma ( $S/V$ ) y las características de su envolvente térmica (denotadas por  $A$ ), son los más influyentes en la reducción de la demanda energética. No obstante, no menos importantes son los aspectos relacionados con el entorno urbano, los cuales también afectan notablemente al comportamiento energético del parque edificado. Especialmente, la proporción de calle ( $H/W$ ), que se sitúa en el mismo nivel de significancia que  $A$ , condiciona enormemente las posibilidades de soleamiento en los edificios, afectando tanto a la demanda energética de calefacción como a la de refrigeración. La forma de la manzana urbana ( $MU$ ), condicionada por la presencia o no de patio de manzana, afecta también al comportamiento energético. Finalmente, la  $O$ , se muestra como la menos significativa de las cinco covariables, debido a que esta se ve notablemente afectada por el resto de condicionantes urbanos ( $H/W$  y  $MU$ ).

Este estudio, como parte de una metodología más amplia para la evaluación energética pasiva del parque edificatorio residencial existente, constituye una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para las administraciones públicas locales, a la hora de tomar parte en actuaciones de regeneración urbana y diseño de nuevos planeamientos urbanos. Teniendo en cuenta que la intervención sobre teji-

dos urbanos ya existentes resulta muy compleja, ya que la configuración de estos no puede ser modificada, resulta crucial disponer de los instrumentos que permitan realizar un diagnóstico energético para estudiar, a posteriori, posibles mejoras y evaluar cuantitativamente su potencial de ahorro. Las administraciones locales cobran especial importancia en este sentido y adoptan un papel estratégico para integrar criterios de eficiencia energética en las ordenanzas municipales y, además, regular y priorizar las actuaciones de rehabilitación, ahora ya amparadas y fomentadas por la legislación a través de la Ley 3R sobre rehabilitación, regeneración y renovación urbanas (Gobierno de España, 2013). La integración de criterios de diseño pasivo en el planeamiento urbano para mejorar la eficiencia energética del parque residencial resulta clave para alcanzar los objetivos de reducción de demanda establecidos internacionalmente para un futuro próximo.

## 8 Citas y Referencias

- Blangiardo, M., Camaletti, M., 2015. Spatial and Spatio-temporal Bayesian Models with R-INLA. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex.
- Braulio-Gonzalo, M., 2016. Propuesta metodológica para la caracterización del comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial existente considerando su contexto urbano. Universitat Jaume I. doi:<http://dx.doi.org/10.6035/14031.2016.142239>
- Braulio-Gonzalo, M., Juan, P., Bovea, M.D., Ruá, M.J., 2016. Modelling energy efficiency performance of residential building stocks based on Bayesian statistical inference. Environ. Model. Softw. 83, 198–211. doi:10.1016/j.envsoft.2016.05.018
- DesignBuilder UK, 2015. DesignBuilder software.
- Gobierno de España, 2013. Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas. España.
- Higuera, E., 2006. Urbanismo bioclimático ISBN: 978-84-252-2071-5. Gustavo Gili, Barcelona.
- Olgay, V., 1963. Design With Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. Princeton University Press, Princeton.
- Swan, L.G., Ugursal, V.I., 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. Renew. Sustain. Energy Rev. 13, 1819–1835. doi:10.1016/j.rser.2008.09.033
- U.S. Department of Energy, 2013. Energy Plus software.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico recibido del Ministerio de Economía y Competitividad, proyecto BIA2013-44001-R: Protocolo de Diseño Integrado para la Rehabilitación de la Vivienda Social y Regeneración Urbana.