

## ¿CÚALES SON LOS LÍMITES Y CÓMO LLEGAR A EDIFICIOS DE OFICINAS DE EMISIONES CASI NULAS DESDE LA REALIDAD ACTUAL?

### Sus prestaciones energéticas en el horizonte 2020/2050

***Abstract:** Desde una visión estratégica, y más allá de los efectos de la crisis iniciada en 2008, la evolución del consumo energético en España se ha caracterizado en los últimos lustros por un crecimiento sostenido del consumo de energía primaria y de los costes asociados, económicos y medioambientales. Ello es debido, principalmente, a una fuerte dependencia de los combustibles fósiles, mayoritariamente provenientes del exterior, y a un preocupante incremento de la intensidad energética en demanda. Siendo esta una realidad a nivel de continente, ha generado un nuevo paradigma que, en el caso de la edificación, desembocó en la Directiva sobre el comportamiento energético de edificios (EPBD) y sus transposiciones a nivel de estados miembros. Sin embargo, existe aún un fuerte desconocimiento de la aplicación de estas directrices al Mercado real de la edificación, en espeial en edificios grandes consumidores del sector terciario, como los edificios de oficinas con intensidades energéticas en España 7 veces mayor que los de uso residencial.*

*En este contexto, es necesario paliar esta carencia, analizando en detalle el consumo energético en el sector de las oficinas, sentando las bases y directrices que permitan construir edificios eficientes a un coste acotado y determinando los límites económicamente razonables en edificios de mínimo consumo de energía primaria. Solo esto permitirá encarar un futuro próximo en las condiciones óptimas que permitan enfrentar las normativas y, sobre todo, destacar en un mercado competitivo que es representativo del nuevo paradigma energético.*

***Keywords, edificios de oficinas, coste óptimo, NZEB, simulación dinámica, parametrización, infiltración***

**Prologue (a desarrollar por Gas Natural – máximo 500 palabras).**

Lorem ipsum.

### **Introduction**

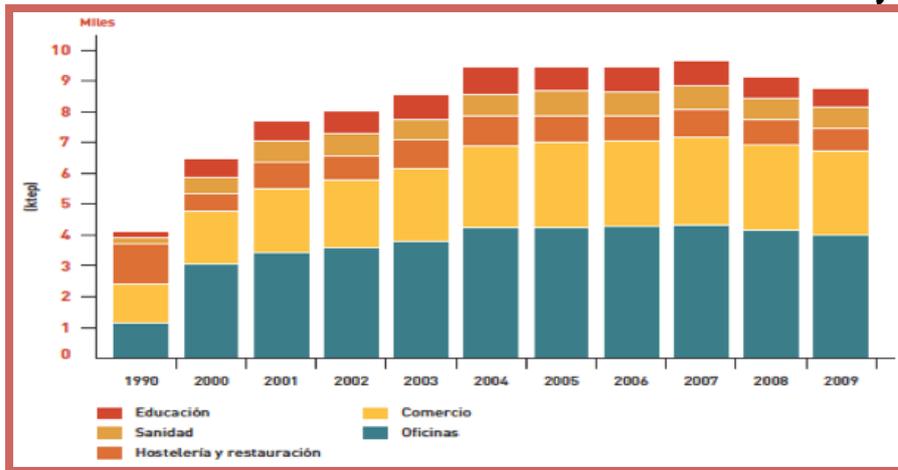
Desde una visión estratégica, y más allá de los efectos de la crisis iniciada en 2008, la evolución del consumo energético en España se ha caracterizado en los últimos lustros por un crecimiento sostenido del consumo de energía primaria y de los costes asociados, económicos y medioambientales. Ello es debido, principalmente, a una fuerte dependencia de los combustibles fósiles, mayoritariamente provenientes del exterior, y a un preocupante incremento de la intensidad energética en demanda [1].



De entre todos los sectores que configuran el panorama energético actual, tanto a nivel nacional como europeo, los que presentan los síntomas más preocupantes de crecimiento de consumo energético y, por otra parte, resultan más difíciles de controlar por su carácter difuso, son la edificación y el transporte. Efectivamente, aunque en los últimos lustros se han desarrollado medidas para limitar el impacto ambiental del consumo energético, éstas han resultado más concretas en las fuentes denominadas estacionarias (centrales eléctricas, refinerías, hornos industriales, etc.) que en los sectores denominados difusos, de la edificación y el transporte, debido en parte a su atomización. En España, estos sectores consumían en 2010 el 26.9 % (edificación) y el 39.3 % (transporte) de la demanda global de energía final, siendo los únicos sectores de crecimiento relativo continuado en los 20 años [2].

Estos mismos problemas, que se detectan igualmente en los países del entorno económico, ha generando un consenso sobre la falta de sostenibilidad energética, económica y política del modelo actual. Ello ha fomentando un nuevo paradigma [3] que, en el caso de la edificación, desembocó en la Directiva sobre el comportamiento energético de edificios (EPBD en sus siglas en inglés) en 2002 (actualizada en 2010 [4]), y su transposición en España mediante el Código Técnico de la Edificación (CTE en sus siglas) aparecido en 2007, y actualizado en 2013 [5]. Mención aparte merecen el Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-2020, así como el Plan de energías renovables 2011-2020 [6] que, aun siendo aprobados por el Consejo de Ministros en 2011, han sido rebatidos por la Comisión europea tanto en su contenido, como en su aplicación.

En este contexto, el sector de la edificación queda energéticamente caracterizado según los distintos usos de los edificios, que son los que realmente marcan sus intensidades energéticas. En datos de 2010 [7], en España el 87 % de los edificios construidos corresponde a un uso residencial, mientras que del 13 % restante, correspondiente a usos de terciario, el sector de oficinas es el que tiene una mayor superficie construida, con más de 83 millones de metros cuadrados existentes. Sin embargo, la distribución de consumos energéticos no es proporcional a la superficie por usos. También en datos de 2010 [8], el 67 % del consumo energético asociado al sector de la edificación (aproximadamente 16.400 kTep) correspondía al uso residencial, siendo el uso oficinas, para el terciario, el que copa un mayor consumo energético con casi 4.000 kTep. De estos datos, se deriva que la intensidad energética en edificios de oficinas es, en España, aproximadamente 7 veces mayor que la de edificios de uso residencial.



*papernumber1097\_graphicnumber01 (Evolución del consumo del sector Servicios en España. Fuente: IDAE 2011)*

Además, el subsector de oficinas es el principal exponente de dos factores que deberían condicionar la evaluación del vector energético. Por una parte, resulta habitual que los edificios de oficinas se construyan bajo un marco en el que el promotor es, o bien el usuario final, o bien el propietario final que arrienda, bajo distintas fórmulas, a terceros. Ello implica que la factura energética del edificio de oficinas repercute, en muchos casos, al responsable último de la construcción del mismo. Por otra parte, y en mayor o menor medida derivado de lo primero, el subsector de edificios de oficinas ha empezado a vincularse fuertemente el negocio a la eficiencia energética de los edificios, pasando a ser este uno de los principales condicionantes del Real State [9] y valorado fuertemente por los fondos de capital [10]. Como muestra de ello, los edificios de oficinas con certificación medioambiental privada han aumentado exponencialmente en los últimos años pasando, por ejemplo, en el periodo 2001 a 2010 a multiplicar por más de 20 la superficie total de edificios con acreditación LEED Gold en todo el mundo [11].

A pesar de todo lo anterior, y en el ámbito de los edificios de oficinas, aún existe escasa información de detalle, para nuestra latitud y desde una visión holística, sobre la problemática en el consumo energético de este uso concreto. Aunque se han empezado a sentar las bases para revertir esta situación (con la obligatoriedad específica, por ejemplo, de analizar los edificios de oficinas en el contexto de la EPBD 2010 [12]), la problemática resulta amplia y compleja y los objetivos, tanto bajo la perspectiva de la normativa como de la de mercado, muy cercanos en el tiempo.

En este contexto, es necesario paliar esta carencia, analizando en detalle el consumo energético en el sector de las oficinas, sentando las bases y directrices que permitan construir edificios eficientes a un coste acotado y determinando los límites económicamente razonables en edificios de mínimo consumo de energía primaria. Solo esto permitirá encarar un futuro próximo en las condiciones óptimas que permitan enfrentar las normativas y, sobre todo, destacar en un mercado competitivo que es representativo del nuevo paradigma energético.



El proyecto TOBEEM, sobre Viabilidad del diseño actual de edificios de oficinas en Madrid de coste y consumo energético mínimos en el horizonte de 2020, pretende arrojar luz a esta problemática. El proyecto ha sido dirigido por AIGUASOL (Jordi Pascual, María Casanova, Damien Tavan, Ángel Carrera y Óscar Cámara), bajo la dirección facultativa de DUCH (Luis Irastorza y Jesús Arellano), el asesoramiento de Servando Álvarez, y la coordinación arquitectónica por parte de ALIA (Carlos Expósito, Jesús Tejedor y Luis Marqués).

### **Objetives and scope**

El objetivo principal del proyecto TOBEEM es la determinación de los límites razonables, económica y energéticamente, a los que puede llegarse en edificios eficientes de oficinas en Madrid, así como con el establecimiento de criterios fehacientes de diseño para alcanzar los mencionados límites de consumo. De esta forma, los principales objetivos a alcanzar pasan por:

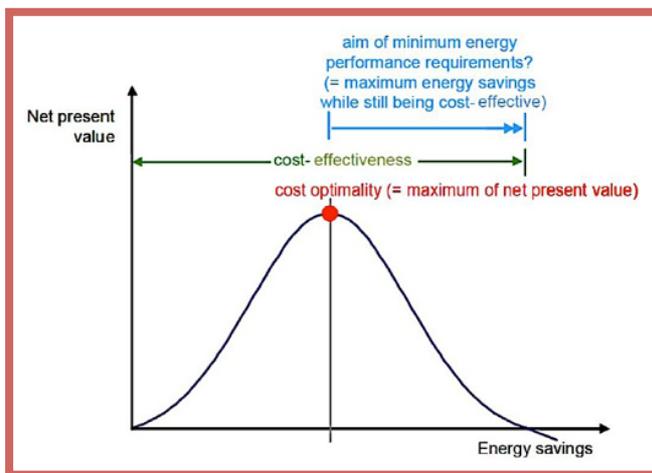
- ✓ *Evaluar y modelar los pesos de los distintos factores que afectan al ciclo de vida energético de los edificios de oficinas, prestando especial atención a las condiciones reales de construcción y operación de las edificaciones.*
- ✓ *Desarrollar las herramientas y conocimientos que, fruto de una visión y análisis sistemáticos de los distintos elementos a considerar en este tipo de edificios, sienten las bases apriorísticas de la sostenibilidad de los edificios de oficinas.*
- ✓ *Definir directrices y una metodología que permitan sintetizar, en un lenguaje comprensible a los actores implicados y centrándose en las fases iniciales de diseño, los conocimientos energéticos a considerar, y que sean un guión a seguir en el diseño y uso de este tipo de construcciones.*
- ✓ *Dimensionar y demostrar la importancia de la correcta gestión y uso de edificios de oficinas, y fomentar la participación de los distintos actores en las fases iniciales de diseño de este tipo de construcciones.*
- ✓ *Dimensionar y parametrizar la relación entre los costes energéticos y económicos en función del diseño, gestión y uso de los edificios de oficinas.*

La consecución de los mismos ha permitido generar un monto de información que, se entiende, contribuye a otros objetivos medioambientales, de mercado, tecnológicos y académicos relacionados con la problemática expuesta. Dichos objetivos se establecen en un marco geográfico concreto, Madrid, bajo las condiciones normativas actuales, y en el marco de diseño de edificios de coste óptimo y de energía casi cero, establecido por la Directiva europea EPBD 2010.

### **Methodology background and hipotesys**

Resulta relevante exponer la metodología desarrollada, no solo desde la perspectiva del potencial de la misma para este y otros posibles estudios, sino porque de la comprensión de la misma se derivan los análisis de los resultados y las principales conclusiones expuestas.

El proyecto TOBEEM se plantea bajo la perspectiva del método de optimización de costes expuesto por la CE en la EPBD 2010. Dicho método se basa en la caracterización de los edificios según la determinación de los costes globales y consumos de energía primaria, durante la vida útil de los mismos.



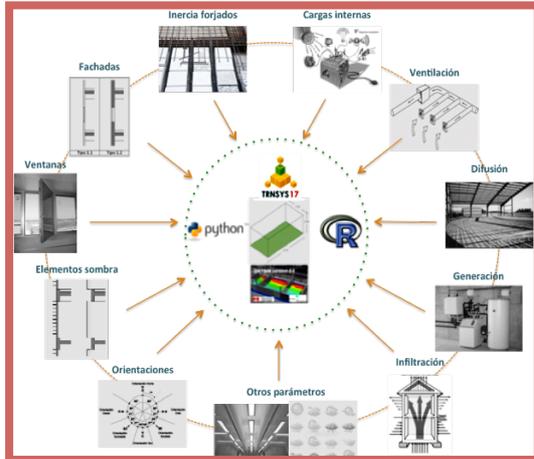
*papernumber1097\_graphicnumber02 (Conceptos de la optimización de costes de EPBD 2010. Fuente: K. B. Wittchen, K. E. Thomsen [13].)*

En donde los costes globales representan el sumatorio de los costes de inversión, los costes anuales de los componentes asociados a la energía (costes de energía, costes operacionales, costes periódicos y de reposición, y costes de mantenimiento) para el periodo analizado, normalizados a través de la tasa de descuento, y los costes residuales, entendidos como las valoraciones de los componentes al final del período de cálculo. Dichos costes pueden analizarse en formato financiero, según el sumatorio descrito, o macroeconómico, añadiendo al mismo los costes de las emisiones derivadas del consumo de energía primaria en el período de análisis.

Por su parte el consumo global de energía primaria debe considerar el sumatorio de los consumos anuales, para todo el período de análisis, derivados de proveer al edificio de las condiciones de confort y salubridad requeridas. Esto es, los consumos de calefacción, refrigeración, iluminación, agua caliente sanitaria y ventilación. El período de análisis establecido en edificios de oficinas es de 20 años, con una vida útil de componentes de hasta 50 años.

Considerando los objetivos, en primera instancia ha sido necesario caracterizar los edificios de oficinas mediante la definición de un conjunto de casos que establecen una muestra representativa del sector. A tal fin, se ha definido un conjunto de más de 20.000 escenarios

(edificios de oficinas), en base al diseño de parámetros y variaciones características, y la combinación de estas. El esquema que representa este proceso es,

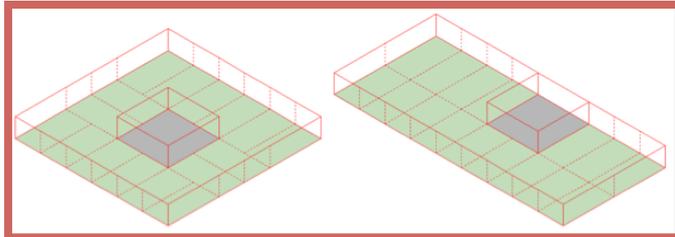


*papernumber1097\_graphicnumber03 (Esquema de las variables de definición de escenarios de análisis que caracterizan los edificios de oficinas de Madrid. Fuente: elaboración propia)*

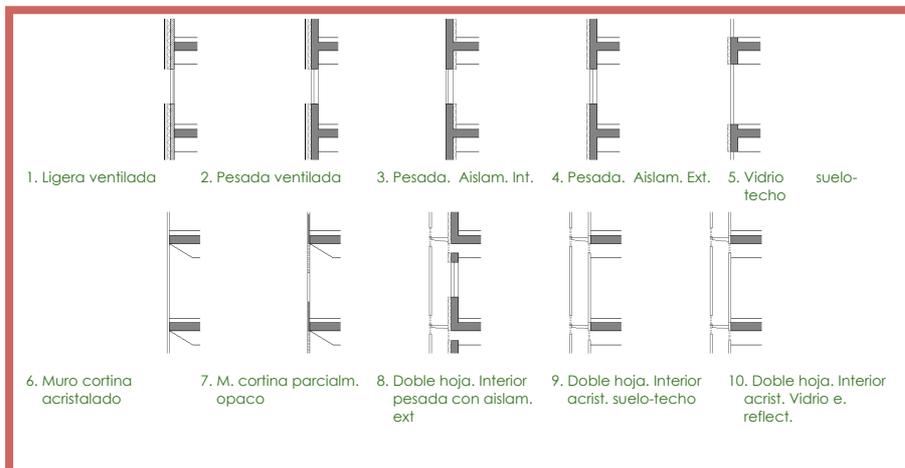
La selección y diseño de los parámetros clave y de sus variantes, se ha llevado a cabo en consideración de un análisis de sensibilidad en edificios reales, así como en un ejercicio de síntesis que ha permitido establecer aquellas casuísticas que mostraran un mayor espectro representativo de la tipología de uso. Así se definen

- dos tipologías de planta (planta tipo cuadrada y bloque lineal, en gráfico 04),
- diez tipologías distintas de fachadas, representativas de más de 50 escenarios reales (ver gráfico 05),
- variaciones de porcentajes de huecos por fachada del 30 al 84%, según tipología de piel,
- diez tipologías de vidrio considerando tratamientos específicos (baja-emisividad y control solar) y componente de cámara (aire y argón),
- diez casuísticas distintas, considerando elementos fijos y móviles, así como el entorno urbano de los edificios,
- ocho orientaciones posibles, según definición normativa CTE,
- distinción entre forjados ligeros y pesados, coherente con las tipologías de fachadas descritas,
- dos casuísticas de cargas internas en equipamientos, ocupación e iluminación de espacios,
- dos definiciones de infiltración de los edificios, como muestra de casos teóricos y casos reales afectados con patologías de la construcción o mala ejecución en obra,
- cuatro sistemas de generación energética: caldera más enfriadora, bomba de calor eléctrica, VRF con motor alternativo térmico, y sistema de distrito (DHC) en base a máquina de cogeneración y chiller,

- dos sistemas de emisión de clima de tipo convectivo (fan-coils) y radiativo (suelo y techo radiantes),
- dos sistemas de ventilación, según caudal fijo o variable, y
- dos escenarios representativos de clima en altura, y microclima urbano.



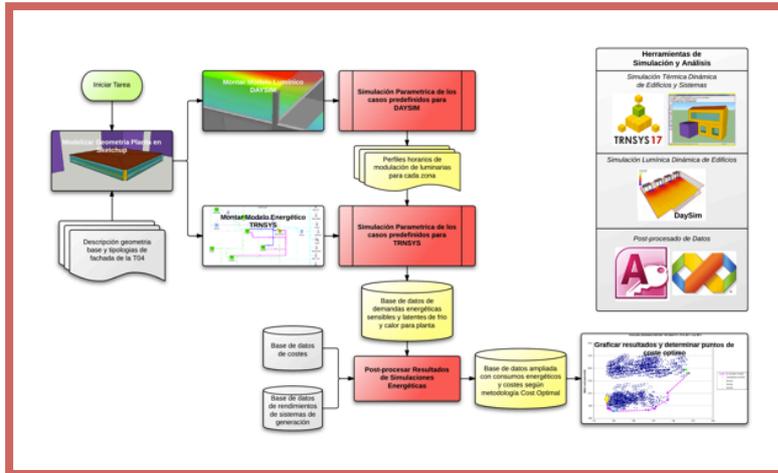
*papernumber1097\_graphicnumber04 (Esquema de tipologías de planta. Fuente: elaboración propia)*



*papernumber1097\_graphicnumber05 (Esquemas de tipologías de fachada. Fuente: elaboración propia)*

De la combinación coherente de los parámetros anteriores, según las variaciones descritas, se ha generado una muestra representativa de edificios de oficinas distribuidos en 4 grandes grupos, según número de plantas de los mismos (urbanos, o en altura), y tipo de planta (cuadrada y pastilla).

Cada uno de los escenarios definidos, se ha analizado mediante la determinación de sus costes globales y consumos de energía primaria durante un mismo ciclo de vida de los edificios. Para ello se ha adaptado el cálculo de optimización de costes de la EPBD 2010, tanto para considerar de forma fehaciente todos los parámetros previstos, como para llevar a cabo el análisis de forma semi-automatizada, con el fin de poder abarcar todos los casos de la manera más sencilla y acotada en el tiempo posible. A tal fin se han utilizado herramientas de simulación dinámica (TRNSYS [14] y DaySim [15]), herramientas de análisis de sensibilidad (R [16]), y herramientas de parametrización y de gestión de datos (Python [17]). La metodología de cálculo desarrollada se esquematiza según el gráfico 06.



*papernumber1097\_graphicnumber06 (Esquema de proceso de la metodología desarrollada en TOBEEM. Fuente: elaboración propia)*

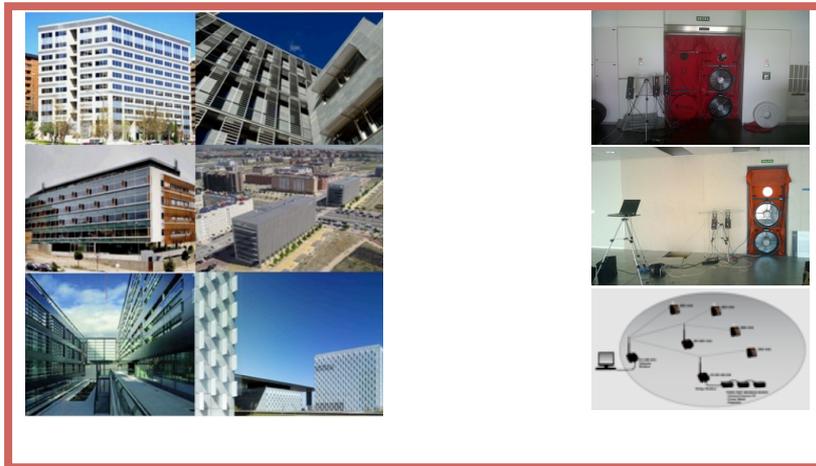
Mediante el uso de servidores Amazon de cloud computing, se llevan a cabo baterías de miles de simulaciones de escenarios de forma rápida y efectiva para, en base a un post proceso, obtener finalmente los resultados de análisis y las conclusiones. Este procedimiento se ha realizado de forma ordenada en 4 grandes Fases de análisis de escenarios:

- ✓ Fase normativa de referencia. Análisis de coste óptimo para todas aquellas variables en demanda, a condiciones de operación y gestión normativas.
- ✓ Fase real y optimizada. Análisis de coste óptimo para todas aquellas variables en demanda, a condiciones de operación y gestión reales y optimizadas.
- ✓ Fase de sistemas. Análisis de coste óptimo para tipología de sistemas HVAC sobre casos de fase normativa y fase real y optimizada.
- ✓ Análisis de sensibilidad. Análisis de sensibilidad sobre escenarios de evolución de costes de la energía y tasa de descuento.

### Development considerations

En la metodología desarrollada, destacan las siguientes consideraciones y procedimientos que definen el marco del análisis (y de sus resultados).

*Determinación fehaciente de problemáticas reales y calibración herramientas.* Durante un período equivalente al ciclo anual (entre 7 y 9 meses según edificio), se han monitorizado distintos espacios de un conjunto de 6 edificios de oficinas, seleccionados entre más de 40 opciones iniciales. Estos 6 edificios, todos menos uno posteriores a 2007, se han seleccionado en base a su representatividad en tipologías constructivas de sus pieles. En algunos de ellos, además, se han llevado a cabo test de infiltración.



*papernumber1097\_imagenumber01 (Edificios analizados, disposición en test de infiltración y esquema de sistema de monitorización de variables características del comportamiento energético. Fuente: elaboración propia)*

Los datos registrados permiten determinar problemas y modos de operación reales de edificios de oficinas, calibrar de forma detallada las herramientas de simulación y, finalmente, facilitar la definición de los parámetros relevantes en base a un análisis de sensibilidad que determina los pesos de los mismos. Destacar que, durante el procedimiento se han obtenido valoraciones de la infiltración en edificios, con un impacto crucial en el comportamiento energético de los mismos [18], por variaciones muy relevantes en consumos energéticos e, incluso, en potencias de máquina instalada, en base a un análisis por el método de Sherman-Grismrud [19]. Igualmente cabe destacar la calibración de los modelos, en base a herramientas de análisis de sensibilidad, y con indicadores orientados que han permitido asegurar una fiabilidad de los modelos con un margen de error inferior al 5% de los parámetros horarios de medición.

*Generación de una base de datos de costes de mercado.* Parte fundamental en la determinación de problemáticas y posibilidades inherentes a los edificios de oficinas, es la valoración detallada de los costes globales en la vida útil de los mismos. Aunque existen ciertas directrices marcadas por la CE en elementos secundarios (costes de mantenimiento o de reposición), estos descansan en la determinación ajustada de los costes de inversión y explotación de los edificios. La base de datos de costes, se ha generado en base a la parametrización de los distintos elementos que componen los escenarios, y las referencias del generador de precios de la construcción de Cype [20], la base de precios de PREOC [21], la base de precios de BEDEC [22], así como referencias internas de ALIA Arquitectura Energía y Medio Ambiente, S.L.



*papernumber1097\_graphicnumber07 (Proceso de determinación de costes de la construcción. Fuente: elaboración propia)*

En base a ello se obtiene una base de datos de costes que permite obtener la inversión asociada a cualquiera de los 20.000 escenarios de la muestra. Igualmente, en los costes se incluye de forma específica, las inversiones asociadas a los sistemas de climatización y ventilación (generación / conversión, distribución y elementos de difusión). El procedimiento, en este caso, pasa por la obtención de ratios de costes de mercados, en base a la recolección de edificios reales que contienen los sistemas propuestos. Estos se han conseguido en base a datos facilitados por GN, LKS, Ortiz, Typsa, JG, AICIA, FCC, UPONOR y AIGUASOL.

Finalmente, y en relación a los costes de la energía y su evolución así como los costes de las emisiones, se trabaja con valores actuales y proyecciones a 30 años vista facilitadas por el Ministerio de Fomento, en base a la propuesta de Cost Optimal de España a la CE. En todos los casos se trabaja considerando las definiciones de costes financieros y macroeconómicos, pero también en un análisis en inversión que, respecto a los anteriores, no considera ni los costes de operación y mantenimiento, ni los costes de reposición.

*Consideraciones del vector energético.* En todos los casos se han considerado las definiciones energéticas (en factores de paso y referencias) establecidas por el Ministerio de Fomento. Igualmente, y en relación a la operación de los sistemas energéticos, se han considerado las referencias de Eurovent [23], así como del proyecto europeo Proheatpump [24], y referencias internas de AIGUASOL (en relación a las pérdidas de cargas de circuitos y otros). El análisis no considera consumos asociados al ACS (por valorarse poco relevantes en edificios de este uso), ni de equipamientos (según se especifica en la metodología de la EPBD).

*Fases de referencias (normativa, real y optimizada).* Inicialmente los escenarios planteados se han analizado bajo condiciones de diseño y operación acordes con el Código Técnico de la Edificación, en su revisión de 2013; destaca la reciente obligatoriedad de que los edificios de uso terciario alcancen, como mínimo, una calificación B, hecho que se ha considerado en base a la definición de dos referencias o límites normativos en función de la proporción de huecos. Igualmente se consideran las definiciones y recomendaciones de la CE al respecto del

procedimiento de optimización de costes. En base a ello, se han generado los resultados de referencia de la Fase CTE.

Modificando las condiciones de operación y gestión, así como el diseño de intervenciones de mejora, se han definido las Fases de escenarios reales y optimizados. En las primeras se considera, en contraposición a la referencia CTE, el cambio de las condiciones de consigna en la operación (según datos reales de la monitorización, y escenarios de temperaturas operativas en emisión radiante), el uso de perfiles estocásticos de ocupación de oficinas, el aumento de cargas internas (de ocupación y equipamientos) en base a datos de monitorización, y escenarios reales de infiltración (según los modelos desarrollados en base a los test realizados previamente). En la fase optimizada, y como elementos distintivos respecto a referencia CTE, se supone el uso de domótica en la regulación de elementos de sombra y en ventilación de caudal variable por ocupación, así como el uso de elementos de iluminación eficientes.

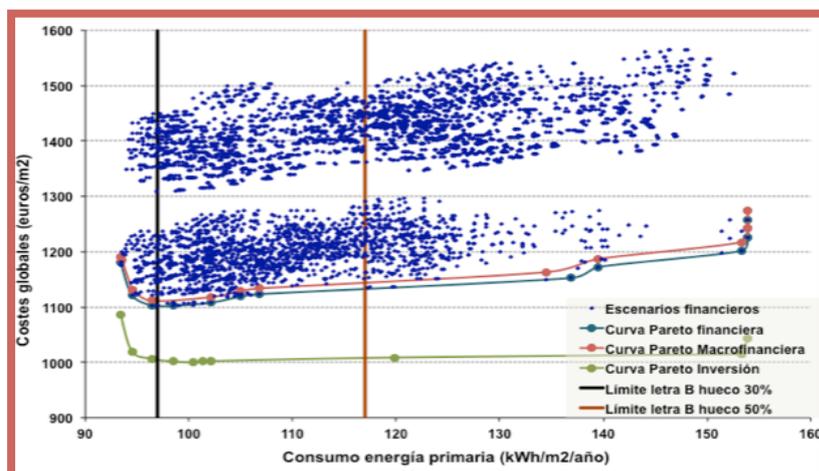
*Fases de sistemas y análisis de sensibilidad.* Finalmente se han analizado los escenarios de referencia según los distintos sistemas energéticos propuestos, y se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad según distintas opciones de evolución de los precios de la energía y de la tasa de descuento.

## Results

Aunque se han llevado a cabo múltiples análisis según valores absolutos y tratamientos estadísticos, y para la globalidad de escenarios o según parámetros de definición de los mismos, en este resumen ejecutivo se presenta una muestra de los más relevantes, que permitan contextualizar e interpretar las principales conclusiones obtenidas.

### *Results on regulation conditions*

Bajo las condiciones normativas de referencia, el global de escenarios analizados se puede caracterizar según gráfica 08 de análisis de costes globales y consumos de energía primaria.



*papernumber1097\_graphicnumber08 (Análisis financiero, en condiciones normativas, de los escenarios de referencia y curvas de Pareto financieras, macroeconómicas y en inversión. Fuente: elaboración propia)*

En donde se incluyen las dos referencias normativas que deben interpretarse considerando que todos los escenarios (puntos) que queden a la derecha de la línea roja, representan edificios que no cumplirán en CTE. Los escenarios entre los dos límites, pueden cumplir con los requisitos normativos, mientras que los que quedan a la izquierda del límite inferior (línea negra) serán, edificios con calificación B o A. Igualmente, y junto a la valoración financiera de los escenarios, se representan las curvas que engloban a todos los puntos (curvas de Pareto) tanto de los casos financieros, como macroeconómicos y en inversión (sin representar todos los escenarios en estos dos últimos casos, para facilitar la lectura de resultados). Dichas curvas resultan relevantes puesto que son las que marcan los costes mínimos para los distintos consumos de energía primaria. Estas curvas se caracterizan por los valores mostrados en la tabla 01.

Primary energy consumptions (kWh/m <sup>2</sup> year)	Gobal costs (€/m <sup>2</sup> )		
	Financial	Macroeconomics	Investment
93,4	1.181	1.190	1.086
94,5	1.121	1.184	1.020
96,4	1.102	1.130	1.007
96,4	1.102	1.130	1.002
98,5	1.102	1.111	1.000
102,2	1.108	1.118	1.002
105,0	1.119	1.129	1.003
106,8	1.123	1.134	1.003
136,9	1.152	1.163	1.009
139,5	1.172	1.187	1.015
153,3	1.201	1.217	1.015
153,9	1.226	1.242	1.015
153,9	1.226	1.242	1.015
153,9	1.258	1.274	1.042

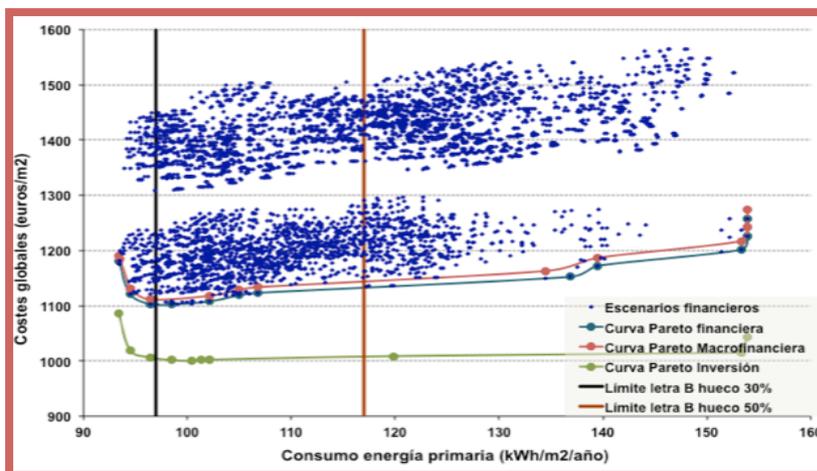
*papernumber1097\_tablenumber01 (Escenarios que conforman las curvas de Pareto en análisis financiero, macroeconómico y en inversión en condiciones normativas. Fuente: elaboración propia)*

Del análisis destaca, en primera instancia, la distribución de puntos a lo largo del eje de abscisas (de consumos de energía primaria) que comporta que muchos de los escenarios, queden fuera de las referencias normativas. Ello es un indicativo de la complejidad de alcanzar los nuevos límites impuestos en CTE 2013, y una referencia de las restricciones previstas a 2020.

Igualmente es posible constatar cómo bajar de la región de consumos máximos (sobre los 154 kWh/m<sup>2</sup> año), a la de los costes mínimos (con consumos asociados del orden de 97 kWh/m<sup>2</sup> año), representa un ahorro de más de 150 €/m<sup>2</sup> en financiero, e incluso de más de 42 €/m<sup>2</sup> en inversión. En este sentido, resulta relevante destacar que la inversión supone entre el 75 y 80 % de los costes globales.

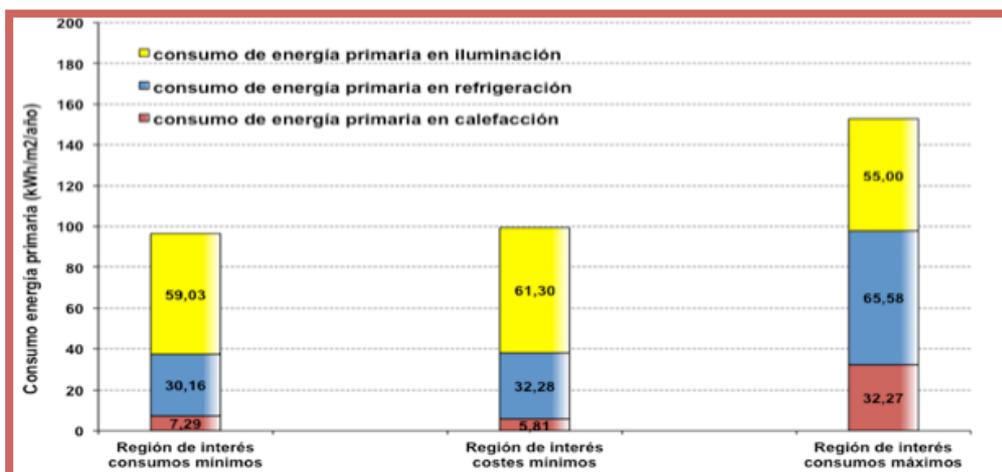
Finalmente, y considerando los escenarios que conforman las curvas de Pareto, destaca que el sobre coste para alcanzar los edificios de mínimo consumo de energía primaria, respecto a los de coste óptimo, es de aproximadamente entre el 7 y el 8 %.

Igualmente, resulta interesante determinar las características de los escenarios (edificios) que representan determinadas regiones de interés de la gráfica, En base a ello se ha seleccionado matemáticamente un conjunto representativo de escenarios en torno a los puntos de la curva de Pareto de máximo consumo de energía primaria, mínimo coste, y mínimo consumo de energía primaria, como puede verse en la gráfica 09.



*papernumber1097\_graphicnumber09 (Representación de regiones de interés: máximo consumo de energía primaria (rojo), mínimo coste (azul) y mínimo consumo de energía primaria (verde). Fuente: elaboración propia)*

Del análisis de esta muestra acotada resulta, en primera instancia, la distribución de consumos por usos que permite profundizar en el sentido físico de los resultados, como se muestra en la figura 10.

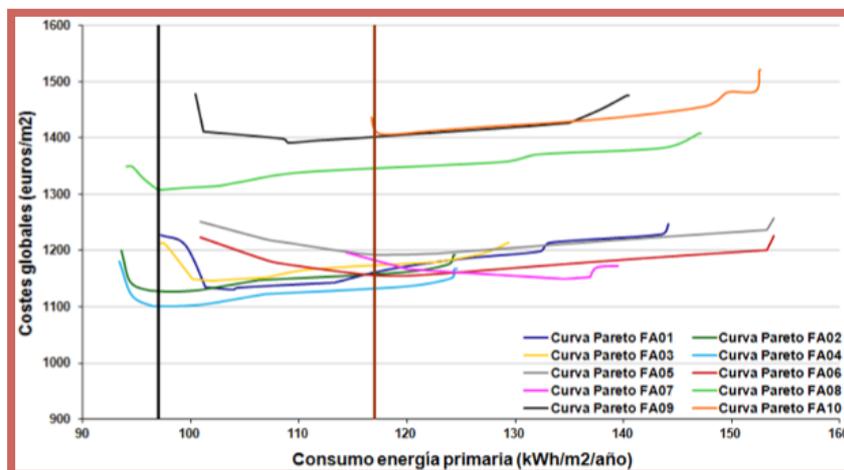


*papernumber1097\_graphicnumber10 (Distribución de consumos por usos en las regiones de interés en condiciones normativas. Fuente: elaboración propia)*

En donde es posible constatar, más allá de los valores absolutos totales o por usos, las predominancias de los consumos de iluminación en todas las regiones, así como la poca relevancia de los consumos térmicos de calefacción, sobre todo en las regiones de mínimos costes y mínimos consumos.

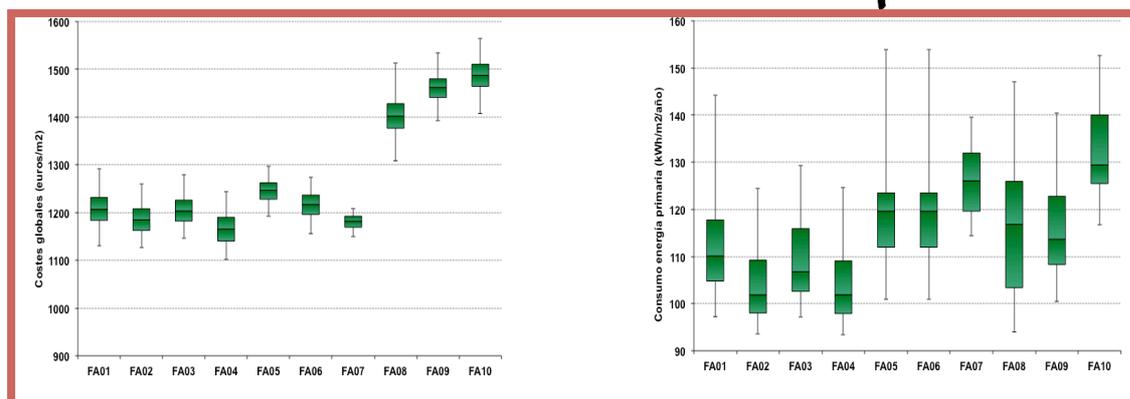
Igualmente, se ha analizado el global de todos los escenarios según parámetros de interés. Esto es, se ha determinado cómo se distribuyen los escenarios según las variaciones en: tipología de fachada, altura del edificio, tipo de planta, transmitancia de fachada, inercia del edificio, porcentaje de huecos, tipología de vidrios y factor solar modificado o elementos de sombra. Para cada uno de ellos se analiza la distribución tanto en valores absolutos, como en base a resultados de análisis estadísticos, representando los valores mínimos, máximos, y de percentiles del 25, 50 y 75 %.

Aunque se dan resultados relevantes para todos los parámetros de análisis, algunos de los cuales se han estudiado igualmente en función de cada una de las orientaciones previstas, destaca por su relevancia el análisis en base a tipologías de fachadas. Efectivamente, se observa una clara distinción entre las fachadas de diseño más convencional, las fachadas tipo muro cortina, y las fachadas de doble hoja. De esta forma se muestran en la figura 11 la representación de las respectivas curvas de Pareto.



*papernumber1097\_graphicnumber11 (Curvas de Pareto de los escenarios agrupadas según tipología de fachada en condiciones normativas. Fuente: elaboración propia)*

En donde, en primera instancia, es posible distinguir como las fachadas de doble hoja (FA08, FA09, y FA10) quedan asociadas fehacientemente a unos costes significativamente más elevados, cuando no a unos consumos de energía mayores a la media. Del análisis estadístico, se obtiene la representación mostarda en la gráfica 12.



*papernumber1097\_graphicnumber12 (Distribución de escenarios según tipología de fachadas por valores estadísticos en costes (izquierda) y consumos de energía primaria (derecha) en condiciones normativas. Fuente: elaboración propia)*

En donde es posible constatar la agrupación en tres grandes categorías: las de costes más reducidos y, sobre todo, consumos menores (fachadas de diseño convencional FA01, FA02, FA03 y FA04), las que ocupan una posición intermedia (fachadas acristaladas, FA05, y muros cortina, FA06 y FA07), y las que se distinguen por tener asociados costes y/o consumos elevados (las de doble hoja FA08, FA09 y FA10). También se observa que, en el grupo de las fachadas con mejor comportamiento, las de diseño inercial (FA02 y FA04) son las que copan los valores mínimos en costes y consumos. Todos estos resultados engloban todos los escenarios con distintas proporciones de huecos analizadas.

Finalmente, y del cruce del análisis por parámetros y orientaciones, con las regiones de interés, se determina que:

- ✓ *Máximo consumo.* Los edificios tipo de la región de máximos consumos en energía primaria, se caracterizan por ser construcciones en altura, de fachada totalmente transparente (FA05) o tipo muro cortina(FA06) y estructura ligera, de planta tipo cuadrada o pastilla invariablemente, con proporciones de huecos elevadas (más del 70 %), vidrios convencionales, y factores solares modificados medios o elevados.
- ✓ *Coste mínimo.* Los edificios tipo en la región de costes mínimos, se caracterizan por ser construcciones en entorno urbano, de fachadas convencionales e inerciales (FA02 y FA04), de planta tipo cuadrada o pastilla invariablemente, con reducidas proporciones de hueco (del 30 al 40 %), con vidrios predominantemente con tratamiento bajo-emisivo, y factores solares modificados medios.
- ✓ *Mínimo consumo.* Finalmente, y para los edificios tipo en la región de mínimos consumos en energía primaria, las construcciones cumplen mayoritariamente con las mismas condiciones que para los de la región de costes mínimos, con pequeñas variaciones el tipo de planta (en este caso predomina la planta tipo pastilla), y en porcentaje de hueco (en donde también tienen cabida porcentajes algo más elevados).

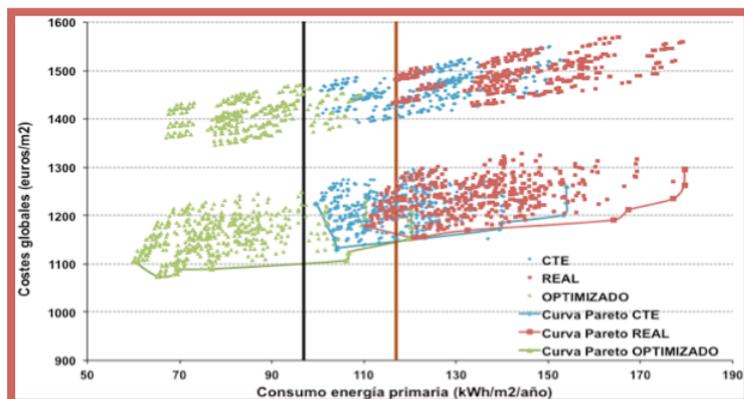
Los resultados del análisis también incluyen directrices y conclusiones por orientaciones, considerándose las mismas en los informes de detalle del proyecto.

***Results on real and optimized conditions.***

En base a las definiciones de los aproximadamente 14.000 escenarios de referencia (condiciones normativas), se ha analizado una muestra representativa de los mismos (aproximadamente 3.500 escenarios) bajo otras condiciones operacionales y con elementos de optimización no constructiva ni arquitectónica. Son las denominadas condiciones reales y optimizadas.

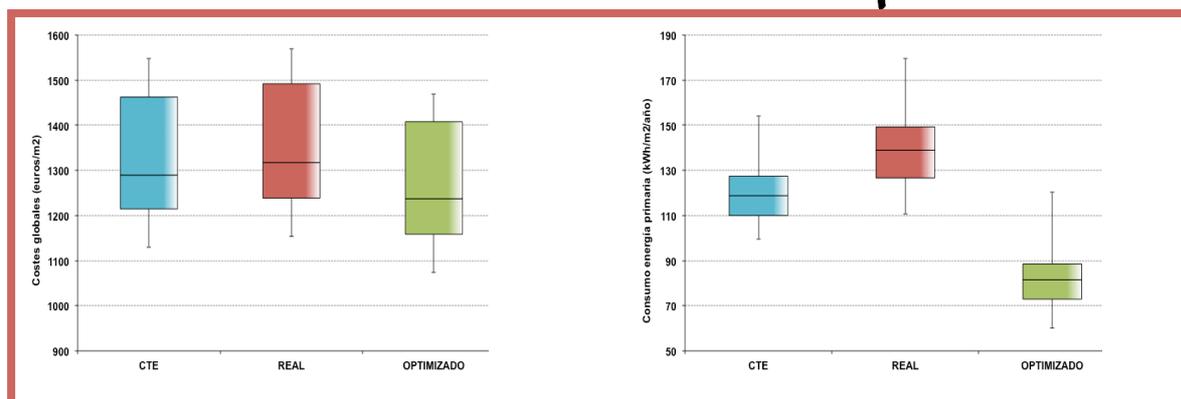
Las primeras tienen en cuenta condiciones reales, medidas en la monitorización y test de infiltración de los edificios reales, en relación a la ocupación (tanto en perfil, como en cantidad de ocupación), la infiltración (cómo patología de una mala ejecución en obra o deficiente calidad de carpinterías), y las condiciones de consigna (temperaturas reales de operación). En este sentido remarcar que se trata de valores promedio de los edificios medidos, y no de casos extremos. Igualmente, y para el caso de condiciones optimizadas, se plantea el diseño de elementos que, de forma generalizada, permitan una mejora en el consumo asociado a los edificios. No se trata, entonces, de soluciones singulares de diseño, sino de valorar las opciones básicas de optimización que, más allá del uso de luminarias más eficientes, pasan por una regulación domotizada de los elementos de sombra y de la ventilación según ocupación.

Del análisis comparado de ambos casos con la referencia normativa, se tiene que para la muestra de escenarios compartidos (comparables), la valoración de consumos y costes queda representada según la gráfica 13.



*papernumber1097\_graphicnumber13 (Comparativa de escenarios según condiciones normativas, reales y optimizadas en análisis financiero. Fuente: elaboración propia)*

En donde se aprecia claramente el desplazamiento de resultados a las regiones de máximo consumo (caso de condiciones reales) y mínimo consumo (para condiciones optimizadas). Del análisis estadístico de estos datos, se tiene la representación mostrada en la gráfica 14.



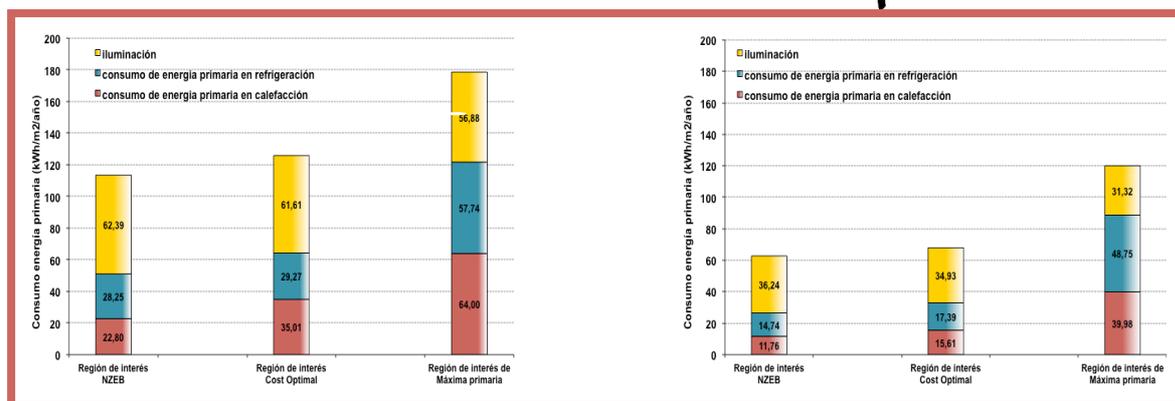
*papernumber1097\_graphicnumber14 (Comparativa de las distribuciones de escenarios en valores estadísticos de costes (izda.) y de consumos de energía primaria (dcha.) en condiciones normativas, reales y optimizadas, según análisis financiero. Fuente: elaboración propia)*

En donde se evidencia más claramente, no solo las diferencias en las valoraciones de los costes globales, sino en consumos de energía primaria. Así, las variaciones en costes suponen, de promedio, un aumento del 2 % (caso real) y una reducción del 4 % (caso optimizado), en relación al caso normativo. Sin embargo, la mayor diferencia se produce en los consumos de energía primaria que, de promedio, aumentan un 16 % (en el caso real), y disminuyen un 32 % (caso optimizado) en relación a las condiciones normativas. Además, y sobre todo para el caso real, la amplitud (variación entre el valor mínimo y máximo) en consumos de energía para el caso real, crece considerablemente (sobre un 25%), respecto a los escenarios en condiciones normativas CTE.

Primary energy consumption (kWh/m <sup>2</sup> year)			Global costs (€/m <sup>2</sup> )		
Regulation	Real	Optimized	Regulation	Real	Optimized
99,4	110,6	60,1	1.224	1.178	1.105
99,8	110,6	60,1	1.224	1.178	1.105
101,9	110,6	60,1	1.179	1.178	1.105
103,6	110,6	60,1	1.149	1.178	1.105
104,0	120,8	65,3	1.130	1.154	1.074
104,3	123,1	69,5	1.133	1.157	1.079
113,3	123,1	69,9	1.142	1.157	1.088
113,3	132,6	77,1	1.142	1.169	1.089
139,5	164,2	106,2	1.172	1.191	1.107
140,1	167,4	106,6	1.185	1.211	1.124
153,3	177,2	119,8	1.201	1.236	1.152
153,9	179,6	120,3	1.226	1.263	1.177
153,9	179,6	120,3	1.226	1.263	1.177
153,9	179,6	120,3	1.258	1.295	1.209

*papernumber1097\_tablenumber02 (Comparativa de escenarios que conforman las curvas de Pareto en análisis financiero en condiciones normativas, reales y optimizadas. Fuente: elaboración propia)*

Igualmente, resulta relevante ver las distribuciones de consumos de energía por usos en las regiones de interés, para estas condiciones reales y optimizadas, mostradas en la figura 15.



*papernumber1097\_graphicnumber15 (Distribución de consumos por usos en las regiones de interés en condiciones reales (izda.) y optimizadas (dcha.). Fuente: elaboración propia)*

En donde, más allá de constatar las diferencias en valores absolutos de consumos para los edificios representativos de las regiones de interés en ambos casos, es importante remarcar que la distribución de consumos por usos cambia respecto al caso de condiciones normativas. Efectivamente, en el caso de condiciones reales, y mientras los consumos de iluminación permanecen casi invariables en relación al caso normativo, los de refrigeración disminuyen levemente (entre un 7 y un 12 %), mientras que los de calefacción aumentan en más del 100 % en la región de máxima primaria, en más del 500 % en la región de mínimos costes, y en más del 300% en la zona de mínimos consumos. De esta forma, se invierte la tendencia y la calefacción pasa a ser el primer consumo térmico en edificios bajo condiciones operacionales reales. Por su parte, y en el caso de los escenarios bajo condiciones optimizadas, se reducen significativamente, respecto a los escenarios normativos, los consumos de iluminación, y los de refrigeración, aumentado sensiblemente los de calefacción. Esto es, en las regiones de mínimos costes y mínimos consumos, la iluminación copa aproximadamente un 50 % de los consumos, mientras que el resto se reparte, casi a partes iguales, entre calefacción y refrigeración.

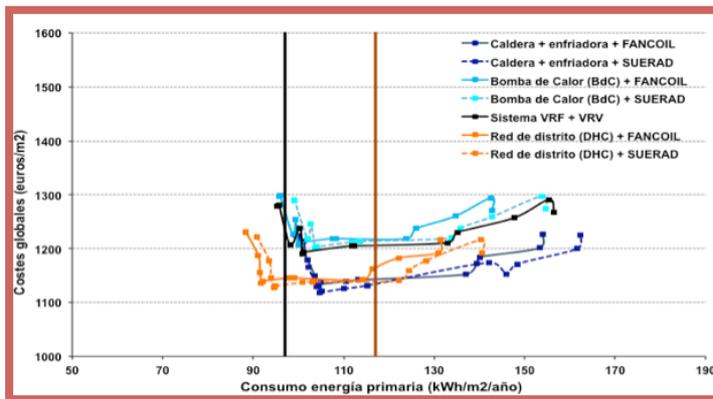
En cuanto al resto de análisis por parámetros relevantes, orientaciones, o frecuencia de casos en las regiones de interés, tanto para los escenarios bajo condiciones reales, como en los de condiciones optimizadas, se observan las mismas tendencias que se tenían para condiciones normativas, aunque evidentemente con un desplazamiento de los valores absolutos a regiones de consumos y costes más elevados (caso real), o reducidos (caso optimizado). Ello supone, entre otras, que los escenarios mejores y peores en condiciones normativas, continúan siéndolo en condiciones reales y optimizadas, aunque con valores distintos. Por ello, los edificios tipo en las regiones de interés, manifiestan condiciones equivalentes bajo las tres condiciones analizadas.

### ***Results of HVAC systems analysis***

En base a todo lo anterior, y para los escenarios que conforman las respectivas curvas de Pareto en los distintos análisis (por fachadas y globales, según análisis financiero, macroeconómico y en inversión, y bajo condiciones normativas, reales y optimizadas), se ha

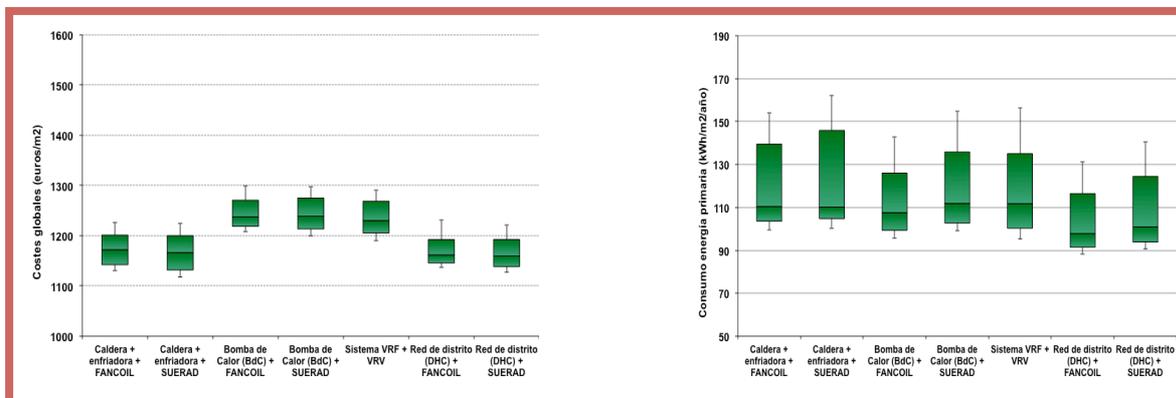
analizado el comportamiento de distintos sistemas de generación/transformación energética (caldera más enfriadora, bomba de calor eléctrica, VRF con motor alternativo térmico, y sistema de barrio DHC), y elementos de emisión (convectiva por fan-coil y radiativa por suelo y techo radiante).

De esta forma, y para la curva de Pareto global (en base a la totalidad de escenarios comparables en las tres condiciones operacionales), se representa en la gráfica 16 los resultados para el caso normativo y según análisis financiero.



*papernumber1097\_graphicnumber16 (Análisis del comportamiento de sistemas energéticos en escenarios de Pareto bajo condiciones normativas y según costes financieros. Fuente: elaboración propia)*

En donde es posible observar una mejor actuación de los sistemas DHC, muy condicionados por la propia definición de los mismos, una situación del sistema de caldera más enfriadora óptima a nivel de costes, pero claramente desfavorecedora en consumos, y una situación inversa en el caso de los sistemas de bomba de calor eléctrica y VRF con motor alternativo térmico, muy condicionados por los costes de inversión. A nivel estadístico, se obtienen los resultados mostrados en a gráfica 17.



*papernumber1097\_graphicnumber17 (Distribuciones de escenarios en valores estadísticos de costes (izda.) y de consumos de energía primaria (dcha.) para distintos sistemas energéticos en condiciones normativas, según análisis financiero. Fuente: elaboración propia)*

En donde se constata que, más allá de las ventajas, en costes y consumos, del DHC, el sistema de caldera más enfriadora copa los valores más reducidos de costes, aunque con unos consumos en energía primaria por encima del resto. Igualmente, y sin entrar en la valoración detallada de los sistemas DHC, la bomba de calor y el VRF con motor térmico alternativo obtienen valores mínimos de consumos de energía primaria (sobre los 95 kWh/m<sup>2</sup> año), aunque a un sobrecoste respecto la referencia de 76 €/m<sup>2</sup> de promedio. En las tablas 03 y 04 se muestran los datos numéricos de los escenarios que conforman las curvas de Pareto.

Heat Pump				VRF	
Convective		Radiant		Convective	
Consumption (kWh/m <sup>2</sup> year)	Global costs (€/m <sup>2</sup> )	Consumption (kWh/m <sup>2</sup> year)	Global costs (€/m <sup>2</sup> )	Consumption (kWh/m <sup>2</sup> year)	Global costs (€/m <sup>2</sup> )
95,7	1.298	99,1	1.290	95,4	1.280
95,9	1.299	99,1	1.291	95,7	1.281
98,7	1.226	102,0	1.218	98,1	1.207
99,3	1.255	102,7	1.247	100,3	1.239
99,9	1.207	103,6	1.200	100,8	1.190
100,2	1.211	103,9	1.203	101,0	1.194
107,6	1.219	111,9	1.212	111,8	1.206
108,2	1.219	113,6	1.214	112,4	1.205
123,8	1.218	133,9	1.220	133,0	1.211
126,0	1.238	135,8	1.239	135,1	1.230
134,6	1.261	142,7	1.259	147,7	1.258
142,6	1.295	153,8	1.298	155,3	1.291
142,7	1.271	154,6	1.275	156,4	1.269

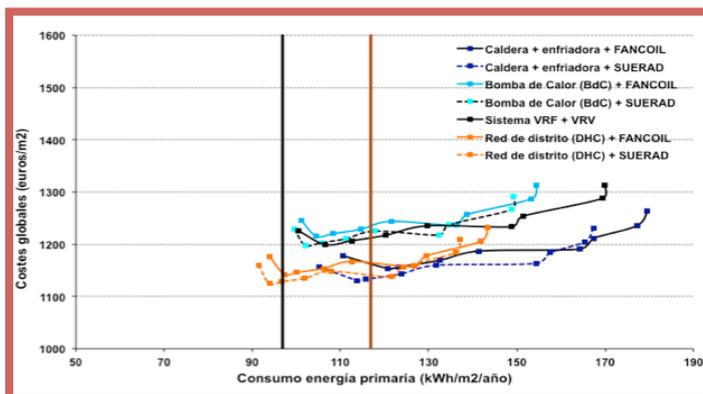
*papernumber1097\_tablenumber03 (Valores de la curva de Pareto para sistema BdC (con emisión convectiva y radiativa) y VRF en análisis financiero para condiciones normativas. Fuente: elaboración propia)*

DHC			
Convective		Radiant	
Consumption (kWh/m <sup>2</sup> year)	Global costs (€/m <sup>2</sup> )	Consumption (kWh/m <sup>2</sup> year)	Global costs (€/m <sup>2</sup> )
88,3	1.231	90,7	1.222
88,3	1.232	90,8	1.221
91,1	1.187	93,5	1.178
91,4	1.156	93,9	1.147
91,8	1.136	94,5	1.127
92,2	1.140	94,9	1.131
97,9	1.146	100,9	1.137
99,0	1.146	103,1	1.139
114,1	1.143	122,3	1.141
116,4	1.162	124,4	1.160
122,1	1.183	128,2	1.178
131,0	1.192	140,4	1.216
131,3	1.217	140,6	1.193

*papernumber1097\_tablenumber04 (Valores de la curva de Pareto para sistema DHC (con emisión convectiva y radiativa) en análisis financiero para condiciones normativas. Fuente: elaboración propia)*

Mención aparte merecen las valoraciones de los sistemas de emisión (convectivos y radiativos). En el análisis bajo condiciones normativas, se ha establecido la hipótesis que tanto los sistemas de emisión convectiva, como los radiativos, operan a unas temperaturas de consigna idénticas. Bajo esta premisa, los sistemas de emisión radiante tiene asociados costes relativamente menores que los emisivos, pero también consumos en energía primaria mayores. Este efecto se pronuncia en la región de máximos consumos en la que, las elevadas demandas no permiten que el sistema radiativo pueda cubrirlas en su totalidad, quedando penalizado por el sistema de apoyo.

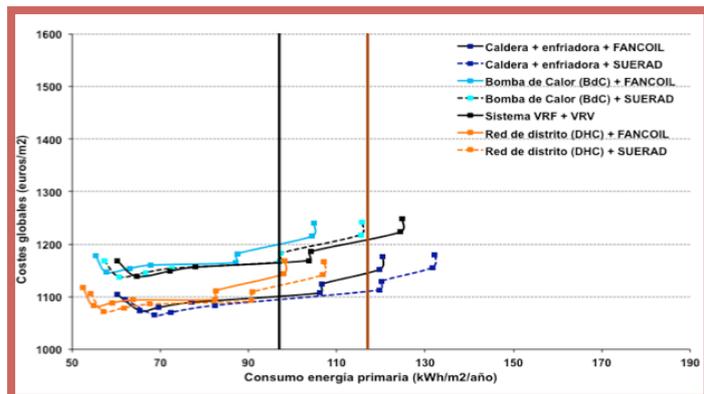
Sin embargo, se entiende que las condiciones reales de operación de los sistemas tienen una fuerte dependencia con las temperaturas operativas. Esto, que en el caso de sistemas de emisión convectiva deriva en temperaturas de consigna de 21 y 25°C para las condiciones reales, en sistemas de emisión radiativa comporta, siendo conservadores, temperaturas equivalentes de 19 y 26°C a idénticas condiciones de confort. De esta forma, y para el mismo análisis financiero de sistemas pero en condiciones reales, se muestran en la gráfica 18 los resultados obtenidos.



*papernumber1097\_graphicnumber18 (Análisis del comportamiento de sistemas energéticos en escenarios de Pareto bajo condiciones reales y según costes financieros. Fuente: elaboración propia)*

En donde es posible apreciar que, si bien las tendencias observadas para las condiciones normativas se mantienen a nivel de sistemas, en relación a los elementos emisores radiativos, estos pasan a ser claramente mejores tanto en costes, como sobre todo en consumos energéticos (con ahorros entre 5 y 10 kWh/m<sup>2</sup> año en el percentil del 75 % según sistemas de generación/transformación. Ello resulta relevante en un contexto en que los consumos de energía primaria son y serán un limitante normativo restrictivo.

Finalmente, y para el contexto optimizado, el análisis financiero de tipologías de sistemas energéticos se representa en la gráfica 19.



*papernumber1097\_graphicnumber19 (Análisis del comportamiento de sistemas energéticos en escenarios de Pareto bajo condiciones optimizadas y según costes financieros. Fuente: elaboración propia)*

En donde, más allá del desplazamiento de todos los escenarios a la región de mínimos consumos, de forma coherente con la definición de las condiciones establecidas, cabe remarcar una menor diferencia en costes entre los distintos sistemas analizados y un retroceso, en consumo de energía primaria asociado, del sistema de bomba de calor eléctrica que, en gran parte del espectro, pasa a ser equivalente a la caldera más enfriadora.

El resto de análisis de sistemas, macroeconómicos y en inversión, tanto para curvas de Pareto globales como por fachadas representativas, resultan en idénticas tendencias que las observadas, aunque evidentemente en otros rangos de valores absolutos.

### ***Sensitivity analysis***

En última instancia, se lleva a cabo el análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos, según las evoluciones de precios de la energía y las tasas de descuento. Estas son dos variables de partida que, se entiende, pueden tener un peso predominante en los resultados finales, a la vez que son difícilmente justificables a nivel técnico; por ello se recomienda este análisis por parte de la propia CE en el contexto de los análisis de coste óptimo.

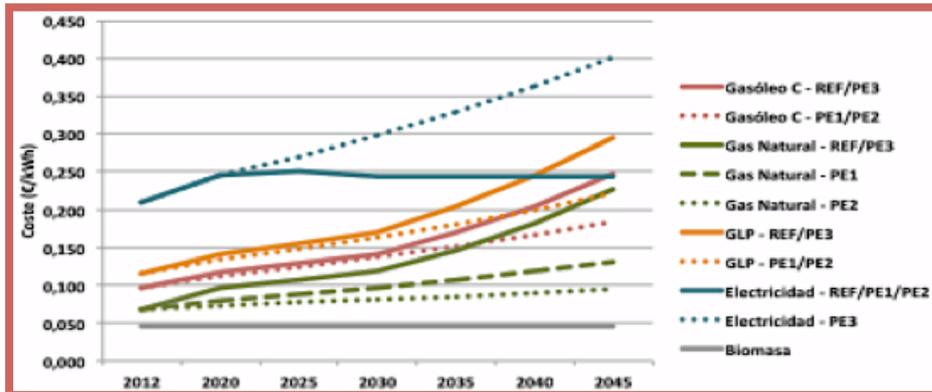
En relación a la evolución de los precios de la energía, se plantean 3 escenarios alternativos al fijado originalmente, mostrado en la tabla 05.

Costs (€/kWh)	2012	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Diesel	0,096	0,118	0,130	0,142	0,171	0,205	0,247
Natural gas	0,068	0,096	0,107	0,119	0,147	0,183	0,227
GLP	0,115	0,141	0,155	0,170	0,204	0,246	0,296
Electricity	0,209	0,245	0,250	0,244	0,244	0,244	0,244
Biomass	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046

*papernumber1097\_tablenumber05 (Costes 2013 de la energía, y evolución de precios a futuro. Fuente: elaboración propia)*

Así los escenarios alternativos, representados en la gráfica 20, se caracterizan según: una evolución de los precios del GN, el gasóleo y el GLP subiendo al 2 % anual desde el precio de referencia 2012 (escenario 1), un aumento del gasóleo y el GLP del 2 % anual, y del 1 %

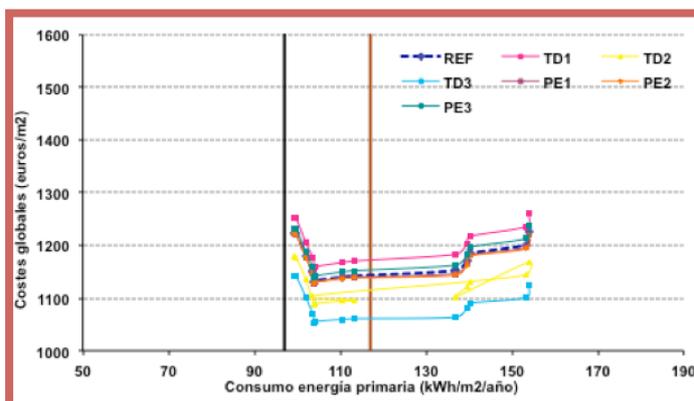
anual para el GN desde el precio de referencia 2012 (escenario 2), y un aumento del 2 % anual para la electricidad a partir del año 2020.



*papernumber1097\_graphicnumber20 (Escenarios de evolución de los precios de la energía en el análisis de sensibilidad. Fuente: elaboración propia)*

En relación a la tasa de descuento, y siguiendo las indicaciones establecidas por la CE, se analizan valores de entre el 2 y el 7 %. Así, siendo la referencia del 3 %, se han utilizado valores del 2, 5 y 7 %.

Aunque los análisis de sensibilidad se han realizado para todas las casuísticas (curvas de Pareto globales y por fachadas, en condiciones normativas, reales y optimizadas, y sistema a sistema), en todos los casos se obtienen idénticas tendencias, a mágen y semejanza de la gráfica 21 de muestra.



*papernumber1097\_graphicnumber21 (Análisis de sensibilidad para escenarios globales en condiciones normativas y para sistema de caldera y enfriadora y emisión convectiva. Fuente: elaboración propia)*

En donde es posible constatar cómo los distintos escenarios de evolución del precio de la energía tienen un impacto residual, en comparación con el peso de la tasa de descuento. Así, mientras que las variaciones máximas entre los Paretos equivalentes para distintas evoluciones de precios son del orden de 14 €/m<sup>2</sup>, la comparación entre distintas tasas de descuento arroja variaciones máximas (entre los escenarios TD1 y TD3) de casi 110 €/m<sup>2</sup>,

esto es, casi 8 veces más. Este efecto se reproduce, de forma análoga, para escenarios de sistemas y condiciones analizadas.

### Limits of the analysis

En última instancia se han estudiado los límites del análisis, en cuanto al alcance de los resultados en base a combinaciones cruzadas de parámetros de los escenarios. Esto es, suponiendo edificios en que, por distintas fachadas y orientaciones, contengan soluciones arquitectónicas y/o constructivas distintas. Entendiendo las limitaciones y condicionantes inherentes a la altura de los edificios, se ha llevado a cabo este último análisis diferenciando entre los escenarios urbanos y en altura.

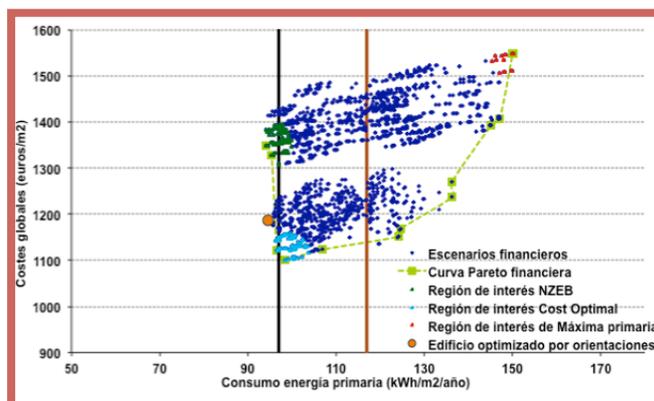
Del estudio de los datos obtenidos previamente, se definen esos dos escenarios límite según se muestra en la tabla 06.

Surroundng	Shape	Facade	Generation	Emission	Glass	Shading	Thermal mass
Urban	Square	FA02	Boiler + chiler	Fan-coil	Low-e	Screen	Heavy
Height		FA01					Light

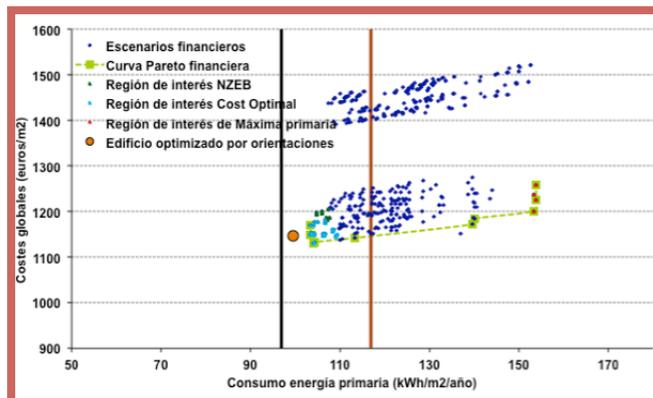
	% of windows	
	Urban	Height
North	50	30
South	60	30
East	50	40
West	40	30

*papernumber1097\_tablenumber06 (Parámetros de definición de los escenarios límite del estudio. Fuente: elaboración propia)*

Cuya representación se observa en las gráficas 21 y 22, para edificios en entorno urbano y en altura respectivamente.



*papernumber1097\_graphicnumber21 (Escenarios límite para edificios en entorno urbano bajo condiciones normativas. Fuente: elaboración propia)*



*papernumber1097\_graphicnumber22 (Escenarios límite para edificios en altura bajo condiciones normativas.. Fuente: elaboración propia)*

En donde, los valores resultantes se resumen en la tabla 07.

Type	Primary energy consumption (kWh/m <sup>2</sup> year)	Global costs (€/m <sup>2</sup> )		
		Financial	Macroeconomics	Investment
Urban	94,5	1.187	1.196	1.088
Height	99,6	1.146	1.156	1.056

*papernumber1097\_tablenumber06 (Comportamiento en costes y consumos de los edificios combinados. Fuente: elaboración propia)*

Estos valores, en un contexto de condiciones optimizadas, alcanzan consumos de energía primaria de 64 y 67 kWh/m<sup>2</sup> año, en urbano y altura respectivamente, y de 55 y 58 kWh/m<sup>2</sup> año cuando el sistema energético pasa a ser DHC (o VRF con motor alternativo térmico) a un sobrecoste, tanto en urbano como en altura, de unos 20 €/m<sup>2</sup> respecto a la referencia de la tabla anterior (y de aproximadamente 90 €/m<sup>2</sup> para el equivalente con sistema VRF).

## Main conclusions

El análisis de Viabilidad del diseño actual de edificios de oficinas en Madrid de coste y consumo energético mínimos en el horizonte de 2020, proyecto TOBEEM, es un estudio de amplitud y profundidad demostradas, que ha requerido del planteamiento y desarrollo de nuevas técnicas y adaptaciones de metodologías al contexto. Así, se han generado modelos de microclima de Madrid o de caracterización detallada de la infiltración, síntesis completas de tipologías arquitectónicas y constructivas, bases de datos de precios extensas, o la parametrización de simulaciones dinámicas y la programación de técnicas de cloud computing. En este contexto, *el estudio ofrece, en sus diversos documentos parciales, múltiples conclusiones específicas que merecen, en un análisis más de detalle de los resultados, ser analizadas y aplicadas directamente o en otros estudios sectoriales.*

Sin embargo, *se ha considerado prioritario desarrollar un trabajo de síntesis sistémica que permita adquirir una visión global bajo la que determinar las principales conclusiones del proyecto. Fruto de esto se tiene el presente resumen ejecutivo y las siguientes conclusiones*

*globales del estudio.* Las mismas se deben contextualizar al ámbito concreto del análisis: los edificios de uso oficinas para el ámbito de Madrid. Si bien es cierto que se considera que gran parte de las conclusiones podrían ser razonablemente válidas para otros usos de terciario y en otras zonas climáticas de la geografía peninsular, también queda claro que las condiciones del análisis han determinado el detalle de los resultados, y ello debe ser tomado en consideración.

- ✓ *Edificios de oficinas de consumos reducidos y coste global inferior.*  
Es perfectamente viable construir edificios de oficinas de consumos energéticos reducidos a unos costes globales significativamente inferiores de las actuaciones de mercado de los últimos años, bajo las condiciones actuales, según capacidades del sector, conocimientos técnicos y tecnología disponible en mercado. Esto es, considerando que los edificios de oficinas construidos en los últimos años tienen consumos asociados superiores a los 150kWh/m<sup>2</sup> año, se pueden reducir los mismos a un orden de 60kWh/m<sup>2</sup> año, en construcciones con un rango de costes entre los 1.100 y 1.200€/m<sup>2</sup>. Estos valores pueden verse reducidos en el diseño en detalle edificio a edificio, tanto de soluciones arquitectónicas y constructivas, como de sistemas eficientes y renovables adaptados a edificio.
- ✓ *Construir edificios eficientes es más económico.*  
Construir edificios de oficinas energéticamente eficientes a costes óptimos resulta más económico, considerando tanto los costes globales de todo el ciclo de vida, como los costes de inversión. Efectivamente, pasar de un edificio gran consumidor, a otro en una horquilla de entre 50 a 100kWh/m<sup>2</sup> año, resulta en un ahorro económico de más del 4% de la inversión inicial, sin entrar a considerar los ahorros en factura energética u otros conceptos del ciclo de vida.
- ✓ *La diferencia energética entre edificios de coste mínimo y los de consumo mínimo es pequeña.*  
En costes globales, construir un edificio de energía casi cero resulta más rentable económicamente que construir un edificio gran consumidor. Ello se basa no solo en una premisa energética, sino también de diseño eficiente en costes, y por ello es también válida para muchos de los escenarios en que solo se considere la inversión inicial. En cualquier caso, la diferencia energética entre edificios de coste mínimo y los de consumo mínimo es relativamente pequeña en comparación al sobrecoste que implica, aunque en un escenario de edificios optimizados, esto se minimiza; es importante valorar esta realidad por parte de los distintos actores involucrados en el sector, incluyendo las administraciones competentes en el marco normativo futuro.
- ✓ *Importancia del diseño arquitectónico y constructivo y de la operación.*  
Los principales elementos a considerar en los edificios eficientes, en costes y energía, son el diseño arquitectónico y constructivo y la operación en su vida útil, siendo la consideración del sistema energético el factor de menor peso. A nivel de costes económicos, el factor predominante es el diseño de la edificación con un peso 3 veces más relevante que la operación en vida útil o los sistemas energéticos. A nivel de consumos de energía, la correcta operación de edificios tiene un peso casi 3 veces

superior al diseño arquitectónico y constructivo de los mismos, y casi 9 veces superior que el sistema de energía propuesto, en escenarios conservadores.

✓ *Mayor consumo y coste de las fachadas transparentes.*

De lo anterior destaca que los edificios de fachadas transparentes (elevadas proporciones de hueco y/o muros cortinas y dobles pieles) son significativamente más caros y llevan asociado un mayor consumo que las edificaciones de soluciones más convencionales, opacas, inerciales y protegidas del entorno. Esto es especialmente relevante en el caso de edificios de dobles pieles. Efectivamente, los edificios transparentes tienen asociado, de promedio, un sobrecoste de más de 300 €/m<sup>2</sup> y un aumento de consumo en energía primaria de más de 25 kWh/m<sup>2</sup>año. Tanto en inversión, como en operación y mantenimiento, los edificios transparentes no son ni económica ni energéticamente rentables. Estas conclusiones son invariantes por orientaciones debido a una normalización de las mismas por normativa.

✓ *Mayor consumo y coste de los edificios en altura.*

Los edificios en altura (sin valorar torres singulares) son económicamente más caros y energéticamente menos eficientes que edificios urbanos. Ello deriva, en gran medida, de los condicionantes arquitectónicos y constructivos, aunque también de las condiciones ambientales del entorno, más cuando existan patologías de la construcción. No se entran a considerar, sin embargo, otros factores que pueden influir en el comportamiento, más relacionadas con temáticas urbanísticas.

✓ *Operación eficiente: diseño, ejecución, mantenimiento y formación.*

Como se ha comentado, la operación eficiente de los edificios es un factor predominante tanto en los costes económicos como en los consumos energéticos. Por ello debe abordarse desde distintas perspectivas, tanto a nivel de diseño, de ejecución, de implicación de los usuarios como a través de la formación y recursos del personal de mantenimiento. Más allá de los avances producidos en los últimos años, existe un margen amplio de mejora relacionado, en parte, con el diseño y el uso de elementos domóticos, pero también con un conocimiento adaptado y unas actuaciones transversales frente a la problemática. Esto resulta relevante tanto en la fase de la vida útil de los edificios, como en su ejecución en obra para evitar patologías, como la infiltración, que se muestran muy relevantes en la actuación final de los edificios, hasta el punto de valorarse positivamente la idoneidad de control, por normativa, en los procesos de construcción.

✓ *La correcta operación hace viable el uso de tecnología más eficientes y/o renovables.*

Los edificios con una correcta operación permiten, además, la viabilidad de tecnologías existentes más eficientes y/o renovables, que requieren de ciertas condiciones de contorno. En condiciones teóricas, sobre todo en edificios grandes consumidores, los consumos se distribuyen principalmente en iluminación, siendo la refrigeración el segundo uso en peso y la calefacción puramente residual. Sin embargo, en edificios bien operados, se obtiene una distribución de consumos más equilibrada (50 % iluminación, 25 % refrigeración y 25 % calefacción), dando entrada a tecnologías o diseños de sistemas de detalle más eficientes.

- ✓ *Viabilidad de los sistemas energéticos.*

Como tercer factor en peso, tanto en costes económicos como en consumos energéticos, la selección de los sistemas energéticos contribuye a la eficiencia en los resultados finales. Más allá de soluciones singulares, incluyendo los sistemas de distrito, los sistemas de bomba de calor eléctrica y VRF con motor térmico alternativo, alcanzan consumos energéticos más reducidos que la solución convencional de caldera y enfriadora, aunque a un sobrecoste importante. Una reducción en costes de inversión o una evolución en el rendimiento de los sistemas de bomba de calor eléctrica y VRF con motor alternativo térmico, contribuirá a su viabilidad futura en óptimas condiciones.
- ✓ *Importancia de la temperatura operativa.*

Igualmente, los sistemas de emisión radiativa de clima (suelos y techos radiantes) conllevan ahorros, energéticos y económicos, siempre que se operen de forma correcta. Este hecho, más relevante en edificios inerciales, deriva de la consideración de la temperatura operativa. Considerando la sensación térmica del usuario, la temperatura operativa es la que permite regular más eficientemente los sistemas pero también es la responsable que en edificios grandes consumidores los consumos energéticos se disparen.
- ✓ *Conclusiones independientes de la evolución de precios.*

En los escenarios de evolución de precios de la energía considerados, las variaciones que estos puedan conllevar son insignificantes ante los costes de inversión, de mantenimiento, de reposición y residuales y, con ello, de la tasa de descuento aplicada. Este hecho fehaciente, no invalida ninguna de las conclusiones anteriores: un edificio gran consumidor, lo será siempre independientemente de los escenarios de futuro considerados.
- ✓ *El aspecto energético será clave en las actualizaciones de la normativa.*

Las actualizaciones, presentes y en un futuro próximo, de la normativa de la edificación obligan a considerar como factor decisivo el vector energético y modificarán el sector de forma relevante. Más allá que la normativa vigente ya considere un limitante que se revela complejo (la obtención de la letra B), en un futuro próximo se introducirán condicionantes en valor absoluto de consumos energéticos que, entre otras cosas, invalidarán soluciones predominantes en los últimos años.
- ✓ *Margen entre resultados teóricos y resultados reales.*

Más allá de ambiciones futuras, se debe interpretar la normativa vigente de la edificación como un marco de trabajo y una referencia comparada, y no como una herramienta de diseño y dimensionado, o de evaluación de detalle de edificios existentes. Efectivamente, a día de hoy todavía se da un margen muy amplio entre las evaluaciones a nivel normativo y los consumos reales de los edificios. Este margen, que invalida las constataciones en valor absoluto aunque no tiene por qué en las directivas que se establecen a nivel relativo, es fruto tanto de las patologías derivadas de una mala ejecución en obra, como de una divergencia entre las condiciones operacionales reales y normativas. Una evolución de la normativa hacia modelos más



detallados, teóricos y/o en base a facturación energética, y que considere la obligatoriedad de llevar a cabo test de calidad constructiva, puede contribuir a ajustar el margen entre los resultados teóricos y la realidad, dando pleno sentido y una potencialidad extra a la evaluación y calificación en base a valores absolutos de consumo.

*Construir edificios de oficinas eficientes energética y económicament es perfectamente viable y altamente rentable en el contexto actual.*

Si bien a nivel de estrategia y de valoración de mercado del real estate en el ámbito internacional, ésta es una evidencia comúnmente aceptada en los últimos años, no puede decirse lo mismo en el ámbito nacional, donde, a excepción del desarrollo legislativo de transposición de Directivas Comunitarias, el mercado de oficinas y sus distintos agentes vienen actuando, salvo excepciones, al margen de estos planteamientos.

*El proyecto tobeem demuestra que también es una realidad a nivel local y de edificio evidenciando la necesidad de una revisión sustancial de los planteamientos predominantes en el sector terciario nacional.*

*Un análisis en profundidad (optimizaciones de detalle) y amplitud (zonas climáticas), revertiría en una visión integral de los planteamientos descritos y permitiría avanzar en la dirección de aproximar económicamente los NZEB a la región de coste óptimo.*

## **Acknowledgements**

The authors would like to thank the financial consortium of the project for funding and supporting this research. In particular, we would thank to Ayuntamiento de Madrid, Activos Renta, Asociación de Promotores Inmobiliarios de Madrid (Asprima), Desarrollo Urbanístico de Chamartín (DUCH), Gas Natural, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Jones Lang LaSalle, LKS, Remica, Typsa, Uponor and Yesos Ibéricos.

## **Bibliography**

- [1] MITYC (Ministerio de Industria, transporte y comercio) (2007b). La energía en España 2006. ISBN-13: 978-84-96275-52-2. <http://www.mityc.es/>
- [2] Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. IDAE 2011.
- [3] Directiva 2012/27/UE del parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012.
- [4] Directiva 2010/31/EU OF del parlamento Europeo y del Consejo de del 18 de Mayo de 2010 sobre la actuación energética en edificios.



- [5] Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.
- [6] Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. IDAE 2011.
- [7] Building Performance Energy Institute (BPIE) Data Hub 2013.  
<http://www.buildingsdata.eu/>
- [8] Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. IDAE 2011.
- [9] The Brilliant Economics of Green Buildings. William Pentland, 2012. Forbes.
- [10] Do Green Buildings Make Dollars and Sense?. Burnham-M and CB Richard Ellis. 2011.
- [11] USGBC 2013.
- [12] Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012.
- [13] Introducing cost-optimal levels for energy requirements. K. B. Wittchen, K. E. Thomsen. REHVA Journal – March 2012.
- [14] Transient System Simulation Tool. © TRNSYS group.
- [15] Advanced Daylight Simulation Software. © Christoph Reinhart.
- [16] Language and environment for statistical computing and graphics. Free software
- [17] Programming language to integrate Systems effectively. Open source software.
- [18] Evaluation of air leakage and its influence on thermal demands of office buildings in Madrid. J. Pascual et Al. REHVA January 2013.
- [19] M.H. Sherman, D.T. Grimsrud, “Measurement of Infiltration Using Fan Pressurization and Weather Data”, LBL, University of California, Berkeley (1980).
- [20] Generador de precios de la construcción. CYPE, <http://www.generadordeprecios.info/>
- [21] Generador automático de costes de la construcción 2013. <http://www.preoc.es/#!0>
- [22] Banco BEDEC de ITeC 2013. <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>
- [23] European Seasonal Energy Efficiency. Eurovent Certita Certification.
- [24] [www.proheatpump.eu](http://www.proheatpump.eu)