

**Diseño basado en prestaciones en la arquitectura. Estrategias proyectuales para mejorar la eficiencia energética de los edificios**

**Manuela Ianni**

<http://hdl.handle.net/10803/482013>

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

**WARNING.** The access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

Capítulo 3

## **DISEÑO PERFORMATIVO**

IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO BASADO EN  
PRESTACIONES EN EL PROYECTO DE  
ARQUITECTURA



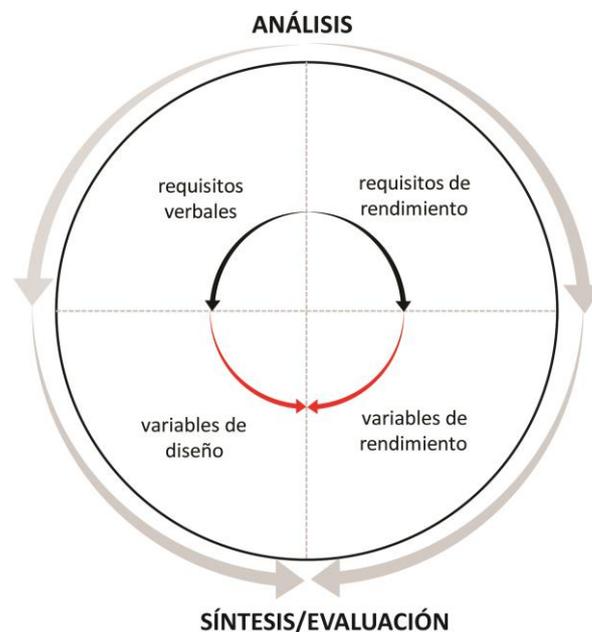
## Introducción

En el capítulo anterior se han investigado los cambios referentes a la idea de forma y a su generación surgidos durante la segunda mitad del siglo XX, a raíz del influjo del concepto de *performance*. En la arquitectura, el concepto de *performance* asumió distintos significados. Por un lado, hacía referencia a la efectividad en el cumplimiento de unos objetivos (*performance* tecnológica); por el otro, a la capacidad de transmitir un mensaje (*performance* cultural). Posteriormente, el significado de *performance* se ha extendido para abarcar tanto los aspectos estéticos y culturales no cuantificables del edificio (percepción, espacialidad, etc.), como los aspectos físico-técnicos que son cuantificables (energía, estructura, iluminación, etc.). De acuerdo con esta redefinición del concepto de *performance*, el DBP no debería limitarse al cumplimiento de unos requisitos técnicos, sino que tendría que tener en cuenta todas las variables que intervienen en el proceso de generación formal, incluidas las de carácter estético y cultural.

Esta reinterpretación del DBP en la arquitectura, que dio lugar al “diseño performativo”, fue posible por los avances en los programas de simulación que permiten evaluar el comportamiento de un edificio desde un punto de vista holístico. Básicamente, se produjo un cambio significativo en el rol de la simulación, que ha pasado de ser una herramienta de verificación y análisis, a convertirse en un medio para optimizar la forma. En la actualidad, el reto para el DBP radica en la aplicación de las herramientas de simulación en las primeras etapas del proceso de proyecto. Con este fin, se han desarrollado sistemas experimentales que combinan técnicas generativas y analíticas en el proceso de generación de la forma. El propósito de este capítulo es analizar algunos de estos sistemas prototípicos, que pueden calificarse como “sistemas de diseño generativo basados en prestaciones”, creados en el ámbito académico y de investigación.

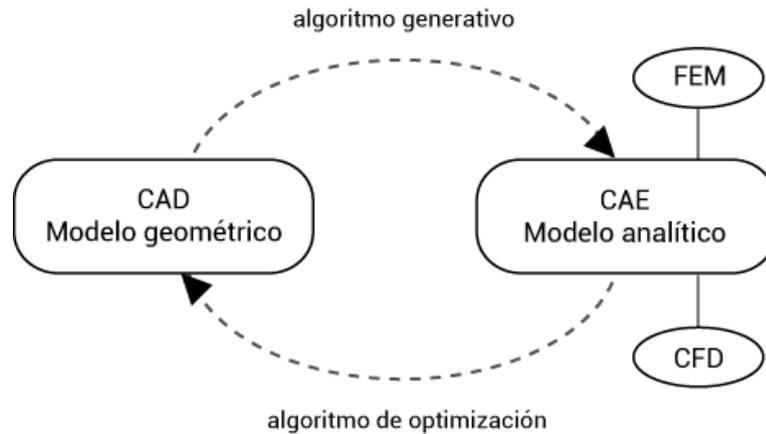
### 3.1 Sistemas de diseño generativo basado en prestaciones

El propósito de los sistemas de diseño generativo basados en prestaciones (*performance-based generative design*) es facilitar un proceso de generación formal orientado hacia el cumplimiento de unos objetivos: “*Performance-based generative design is based on generative processes driven by performance*” (Oxman, 2006, pág. 258). Este proceso de diseño, al que otros autores denominan morfogénesis performativa –*performative morphogenesis* (Kolarevic, 2003)–, se basa en la generación y evaluación del rendimiento de un conjunto de propuestas de diseño a partir del intercambio de información entre un modelo geométrico y un modelo analítico. El objetivo último de los sistemas de diseño generativo basado en prestaciones es apoyar el proceso de toma de decisiones en las primeras fases del proceso de proyecto, cuando el abanico de posibles soluciones formales es más amplio (Figura 1).



**Figura 1.** Conceptualización del diseño generativo basado en prestaciones. Fuente: Gráfico de elaboración propia.

Los sistemas de diseño generativo permiten introducir los resultados (*output*) generados por un algoritmo generativo como datos de entrada (*input*) en un modelo de análisis, y luego convierten los resultados del análisis (*output*) en datos de entrada para el modelo geométrico (*input*). Según las herramientas de simulación que se utilicen (FEM, CFD), estos sistemas permiten analizar el comportamiento energético, estructural, acústico o lumínico del edificio en proyecto, aquellos que son cuantificables (Figura 2). Además, los sistemas de diseño generativo basado en prestaciones pretenden afrontar el programa arquitectónico desde un punto de vista holístico, incluyendo tanto criterios cuantitativos (*hard criteria*), como cualitativos (*soft criteria*), por ejemplo, los que tienen que ver con el espacio (distribución, privacidad, vistas, confort) y la estética. Algunos de los sistemas desarrollados permiten expresar criterios cualitativos a través de reglas geométricas para limitar el campo de búsqueda de soluciones; otros sistemas permiten la intervención directa del arquitecto en el proceso de selección de una propuesta.



**Figura 2.** Diagrama de flujo de datos de sistemas de diseño generativo basado en prestaciones. Fuente: Gráfico de elaboración propia.

Por lo general, los sistemas de diseño generativo basado en prestaciones entienden el proceso de diseño como un problema de decisión multicriterio. Así, algunos sistemas utilizan algoritmos multiobjetivo (como el de Pareto), para identificar objetivos conflictivos y luego negociar entre ellos (método multicriterio continuo u optimización multiobjetivo). Otros sistemas limitan el campo de búsqueda de soluciones a unos objetivos (restricciones) y optimizan las soluciones según un criterio predominante, o función objetivo (método multicriterio discreto).<sup>1</sup> En ambos casos, no se trata de hallar una “solución óptima” (optimización como problema matemático), sino de encontrar una propuesta de consenso entre los diversos criterios de evaluación.

En el proceso de generación, los sistemas de diseño generativo basado en prestaciones recurren a los algoritmos metaheurísticos (*genetic algorithm, simulated annealing, ant colony optimization, neural networks, cellular automata, hill climbing, particle swarm y self-organizing systems*).<sup>2</sup> Estos algoritmos permiten explorar varias propuestas, incluso inesperadas, recurriendo a mecanismos no deterministas de combinación aleatoria (proceso estocástico). Así, mediante la integración de técnicas metaheurísticas, los sistemas generativos basados en prestaciones permiten:

<sup>1</sup> La toma de decisiones consiste en elegir lo mejor dentro de lo posible, es decir, entre el conjunto de alternativas posibles. Este conjunto puede ser discreto o continuo. Se define como discreto cuando se pueden enumerar y definir todas las alternativas posibles; continuo cuando se define un conjunto o región de soluciones mediante restricciones. Los problemas de decisión con un único criterio (función objetivo) y conjunto factible continuo (entendiendo por esto la extensión a conjuntos discretos no definidos explícitamente) son básicamente problemas de optimización clásica (optimización lineal, entera o no lineal). Si incluyen aleatoriedad, sin embargo, se convierten en problemas de optimización estocástica, en los que cobra sentido plantear una búsqueda multicriterio.

<sup>2</sup> La metaheurística proporciona un marco general para la aplicación de algoritmos híbridos que combinan diversas técnicas derivadas de la genética –Algoritmo Genético, en inglés *Genetic Algorithm* (GA) –, la biología –Optimización basada en Colonias de Hormigas (OCH), en inglés *Ant Colony Optimization* (ACO)–, la inteligencia artificial –Lógica Difusa o Borrosa, en inglés *Fuzzy Logic*–, las matemáticas – Algoritmos de Ascenso de Colina, en inglés *Hill Climbing Algorithm*–, la física –Recocido o Enfriado Simulado, en inglés *Simulated Annealing* – y la neurología –Redes Neuronales, en inglés *Neural Networks* (NN)–, entre otras. Las técnicas metaheurísticas permiten afrontar los problemas de optimización combinatoria.

- **Definir un proceso iterativo.** La búsqueda se va adaptando a la evolución del proceso, evitando la convergencia y la linealidad.
- **Definir un proceso interactivo.** El diseñador/proyectista/arquitecto aplica su conocimiento para mejorar el rendimiento del proceso de búsqueda, deteniéndolo para reconducirlo, o eligiendo una forma entre un rango de soluciones posibles.
- **Definir un proceso de exploración.** La búsqueda incluye propuestas no prometedoras, de las que pueden surgir alternativas inesperadas (emergencia).

El objetivo de este capítulo es de presentar una sinopsis completa de los principales sistemas de diseño generativo basado en prestaciones que actualmente se están implementando en el proyecto de arquitectura. Estos sistemas prototípicos se organizan en base a su campo de aplicación (rendimiento estructural, energético y térmico-lumínico).

### 3.1.1 Sistemas generativos basados en prestaciones estructurales

#### 3.1.1.1 eifForm: Structural Shape Grammar (SSG)+ Simulated Annealing (SA)

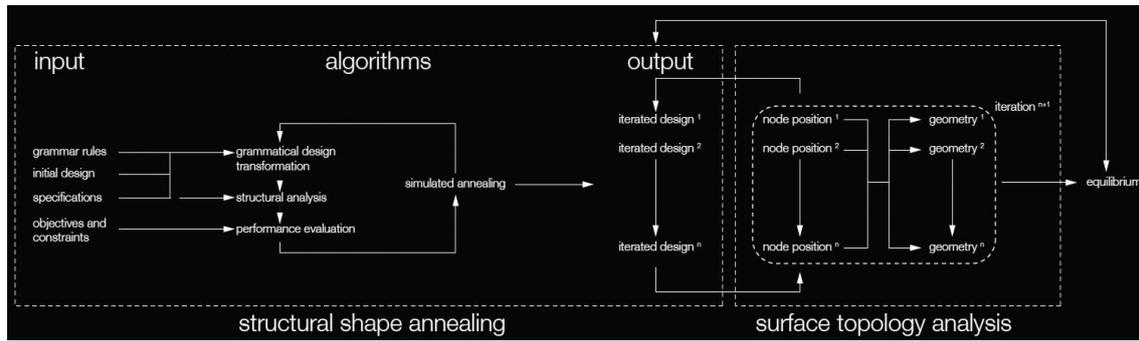
El eifForm es un sistema desarrollado por Kristina Shea en el Departamento de Ingeniería de la University of Cambridge (UK). Se trata de un sistema generativo que permite explorar topologías complejas combinando reglas de transformación geométrica basadas en la lógica estructural –*Structural Shape Grammar* (SSG) – con el algoritmo meta-heurístico de recocido simulado –*Simulated Annealing* (SA).<sup>3</sup> La combinación del algoritmo de recocido simulado con una gramática de formas estructurales se llamó *structural shape annealing*, en analogía al trabajo de William Mitchell y John Cagan “Shape Annealing” (1983) que proponía la combinación de *shape grammars* con la técnica de *simulated annealing*. Las reglas de transformación geométrica (*Structural Shape Grammar*) permiten el movimiento o la división de los componentes de una estructura de acuerdo con los patrones extrapolados de estructuras existentes. Aplicadas según una secuencia predefinida, estas reglas reproducen la estructura original desde la cual se han extrapolado (cúpula geodésica o viga reticulada), pero también pueden generar nuevas geometrías si son aplicadas de forma casual.<sup>4</sup> El algoritmo de recocido simulado (*Simulated Annealing*) selecciona y aplica arbitrariamente las reglas de transformación estructural, a partir de un proceso de búsqueda no determinista (optimización estocástica) que deja un amplio margen para la exploración de soluciones nuevas o inesperadas pero eficientes desde el punto de vista estructural. Tal como afirma Kristina Shea, se trata de un proceso basado en una “arbitrariedad dirigida” (*directed randomness*): “*Generating new forms while also having instantaneous feedback on their performance from different perspectives (space usage, structural, thermal, lighting, fabrication, etc.) would not only spark the imagination in terms of deriving new forms, but guide it towards forms that reflect rather than contradict real design constraints. [...] Digital design tools will then be used to not only generate new funky forms but direct this generation towards efficient forms that can be built effectively. The aim is to use generative design tools to aid in achieving a balance between aesthetic intrigue, innovation and efficiency in new structural forms*” (Shea, 2004, p. 89). El proceso empieza con una propuesta que, según la valoración del proyectista, cumple con una serie de requisitos (estéticos, económicos y funcionales) y continúa con una serie de ciclos de

---

<sup>3</sup> El algoritmo de recocido o enfriamiento simulado (*Simulated Annealing*) debe su nombre a la analogía con los procesos de cristalización en el tratamiento de los metales. Se trata de un algoritmo de optimización estocástica cuyo objetivo es encontrar una aproximación al valor óptimo de un espacio de búsqueda muy grande en un tiempo razonable.

<sup>4</sup> A partir de 1997, Kristina Shea y Jonathan Cagan empezaron a trabajar en la posibilidad de derivar formas inusuales, pero estructuralmente eficientes. Este es el campo de investigación de Shea y Cagan, es decir, la definición de un método creativo para la síntesis estructural. En el artículo “Innovative Dome Design: Applying Geodesic Patterns with Shape Annealing” (1997), Shea y Cagan describen cómo se puede reproducir la cúpula de Buckminster Fuller si se aplican unas reglas topológicas en una determinada secuencia manteniendo la simetría. En el mismo artículo se explica cómo modificar la cúpula geodésica por medio de transformaciones topológicas para obtener formas distintas caracterizadas por la integridad estructural (Shea & Cagan, 1997). De hecho, cuando las reglas que definen la cúpula se aplican de forma iterativa según un orden casual se llega a crear un abanico infinito de formas. Sin embargo, entre la cúpula geodésica y una forma completamente arbitraria, se puede definir un espacio de soluciones según restricciones o intenciones establecidas por el arquitecto/proyectista (*directed randomness*).

generación y verificación del rendimiento estructural (Figura 3). La estructura resultante, aparentemente arbitraria, responde a los requisitos planteados con antelación.



**Figura 3.** Diagrama de flujo de datos de eifForm. Fuente: (Sprecher, Ahrens, & Neuman, 2006).

## Implementación

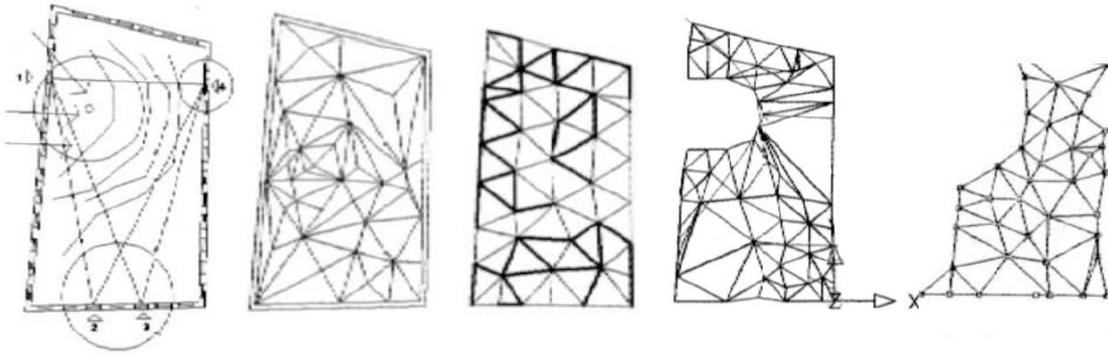
### 1) Academie van Bouwkunst Pavilion, Amsterdam (2002).

El sistema eifForm ha sido utilizado por Neil Leach, Spela Videcnik (OFIS Architects), Jaroen van Mechelen y Kristina Shea para realizar un pabellón en patio de la Academie van Bouwkunst en Amsterdam. El proceso de generación formal comenzó con la definición de una estructura inicial (entramado plano de nudos y líneas), cuya forma se obtuvo triangulando la superficie del patio y dejando abierto un hueco para albergar un árbol (Figura 4). A continuación, se realizó un primer ciclo generativo, por el que se modificó la posición y altura de los nudos, así como la longitud de los elementos lineales, en base a la aplicación arbitraria de unas reglas estructurales predefinidas (*structural shape annealing*). Las variantes obtenidas se evaluaron en base a unos criterios:

- estructurales: garantizar el equilibrio estructural;
- funcionales: permitir el flujo de personas a lo largo del pabellón;
- económicos: minimizar el número de elementos estructurales.

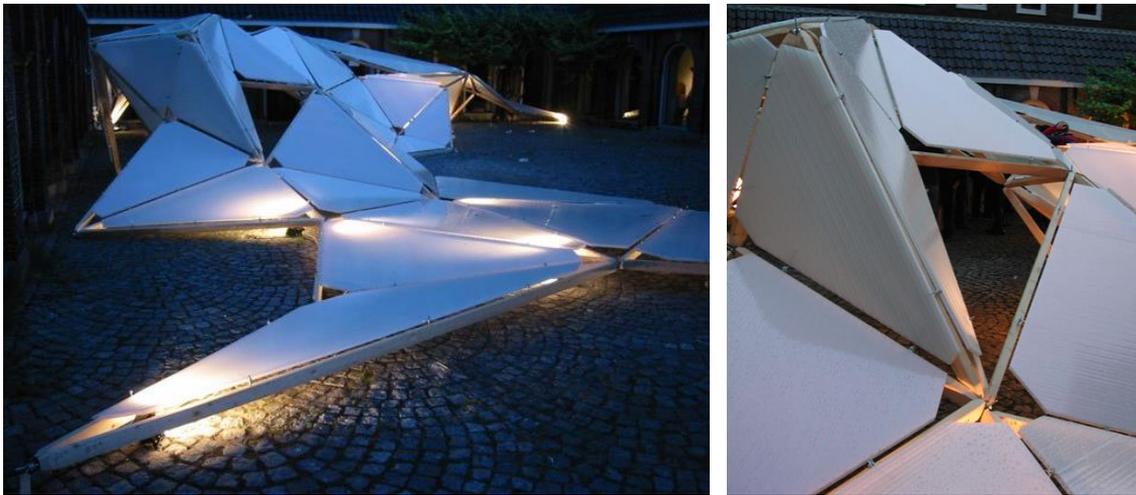
Los resultados de este primer ciclo generativo fueron evaluados por el equipo técnico el cual, en base a criterios estéticos (criterios cualitativos), decidió aumentar la dimensión del hueco que circundaba el árbol y eliminar los elementos estructurales excesivamente largos para uniformar la triangulación.<sup>5</sup> Así, se suprimieron 30 elementos estructurales situados cerca del árbol y los nudos se extendieron hasta el suelo. La figura resultante, que a su vez cumplía con el objetivo económico de reducir los miembros estructurales (un máximo de 130), se usó como forma de partida para un nuevo ciclo generativo.

<sup>5</sup> Así es como Shea describe este proceso de evaluación: “*In the design of canopy, the architect generally took a new role of interpreting and analyzing forms rather than explicitly creating and manipulating geometry. [...] Spela added annotations to the drawings, noting aspects of the design she liked and areas requiring improvement. Design intent needed to be described in terms of parameters that could be fed into eifFom. The main requests for the next design iteration were to create a more sweeping curve around the tree, to eliminate the few, very long member lengths and distribute the triangulation more evenly*” (Shea, 2004, p. 95).



**Figura 4.** Esquema del patio y condiciones iniciales del proyecto (posición del árbol y accesos al patio); definición de la forma inicial (triangulación del patio); resultado de la primera generación, y estructura final. Fuente: (Shea, 2004).

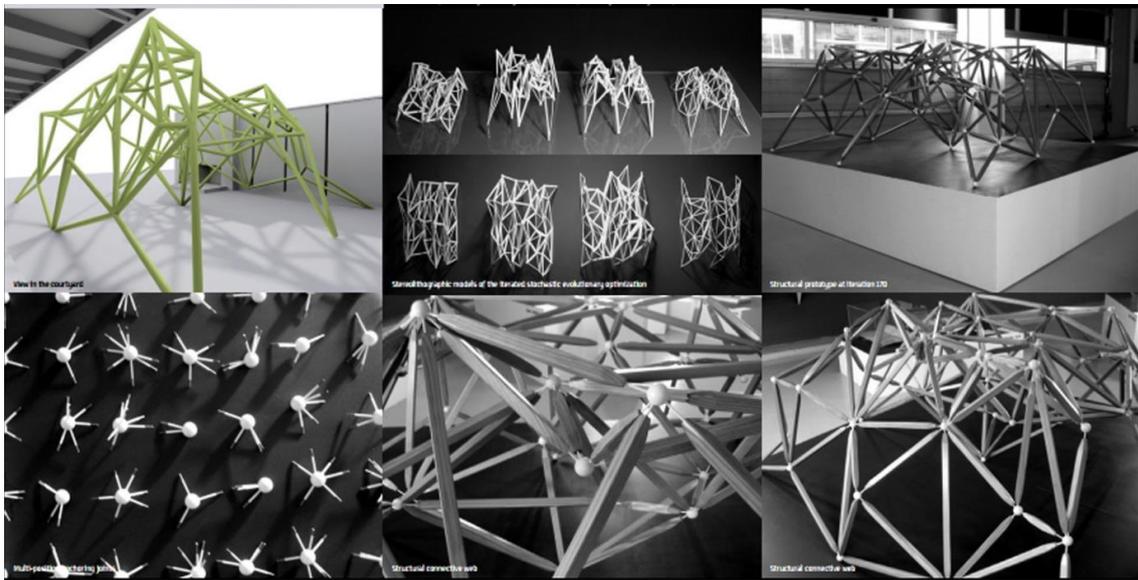
Durante el segundo ciclo generativo no se permitieron cambios en la estructura (añadir o disminuir nudos); solamente se introdujeron cambios en la posición de los nudos. Así se generaron diversas topologías, en las que se buscó alejar la estructura de la zona del árbol (se redujo el lado oeste y norte y se desplazó la estructura hacia el sur y el este). Durante una tercera iteración, se decidió en base a criterios funcionales que los lados del pabellón que albergaban las entradas debían disponerse paralelamente a los muros del patio. La forma final logró conectar las esquinas del patio usando 132 elementos estructurales con dos secciones distintas y 56 nudos. El resultado de este proceso, una estructura aparentemente arbitraria, cumplía con los criterios de estabilidad estructural, de funcionalidad y de economía (Figura 5).



**Figura 5.** Academie van Bouwkunst Pavilion, Amsterdam (2002). Fuente: (Shea, 2004).

2) Pabellón en el Mak Center for Art and Architecture, Los Angeles (2006).

El sistema eifForm se ha aplicado para la realización de un pabellón para la exposición “*The Gen[H]ome Project: Genetics and Domesticity*”, en el marco del “*Hylomorphic Project*” (Sprecher, Ahrens, & Neuman, 2006). El equipo técnico estaba formado por Aaron Sprecher, Chandler Ahrens y Eran Neuman, miembros del grupo *Open Source* (OSA), Kristina Shea, Marina Gourtovaia (Cambridge University) y Judith Leuppi (Arup). El pabellón se generó a partir de la transformación de un entramado tridimensional de vigas triangulares. Una vez definido el modelo inicial de nudos y elementos lineales, se inició un proceso generativo en que la posición de los nudos del entramado fue modificada a lo largo de tres dimensiones hasta llegar a una forma aparentemente arbitraria, aunque estructuralmente coherente (Figura 6 y Figura 7).



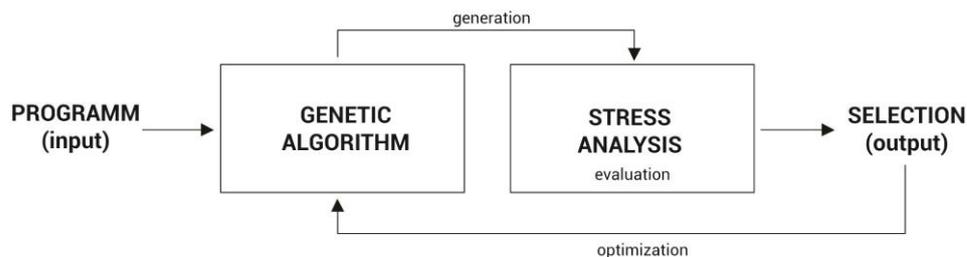
**Figura 6.** Hylomorphic Project. Pabellón en el Mak Center for Art and Architecture, Los Angeles (2006). Fuente: (Sprecher, Ahrens, & Neuman, 2006).



**Figura 7.** Hylomorphic Project. Pabellón en el Mak Center for Art and Architecture, Los Angeles (2006). Fuente: (Leuppi & Shea, 2008).

### 3.1.1.2 Voxel: Genetic Algorithm (GA)+Stress Analysis

Voxel es un sistema que combina un algoritmo genético con técnicas de análisis estructural (Figura 8)<sup>6</sup>, fruto del trabajo llevado a cabo por Peter Baron, Robert Fischer, Andrew Sherlock, Frank Mill y Andrew Tuson en el Departamento de Inteligencia Artificial de la Universidad de Edimburgo (Baron, Fischer, Mill, Sherlock, & Tuson, 1998; Baron, Fischer, Tuson, & Mill, 1999). Voxel es un sistema evolutivo capaz de generar formas a partir de la combinación y el comportamiento estructural de partículas elementales llamadas “voxel” (*volumetric pixel*), la unidad elemental de un objeto tridimensional. Básicamente, el sistema es un autómatas celular que opera en tres dimensiones.<sup>7</sup> El estudio de ingeniería Bollinger + Grohmann (Klaus Bollinger, Manfred Grohmann y Oliver Tessmann), en colaboración con el grupo LAVA (*Laboratory for Visionary Architecture*), aplicó Voxel a un proyecto realizado con un sistema constructivo tradicional. Bollinger se refirió al proceso generativo llevado a cabo con Voxel en estos términos: “*Digital feedback loops of synthesis, analysis and evaluation establish a ‘process of becoming’ in which structural solutions evolve and adapt to specific requirements*” (Bollinger, Grohmann, & Tessmann, 2010, p. 34).



**Figura 8.** Diagrama de flujo de datos de Voxel. Fuente: Elaboración propia.

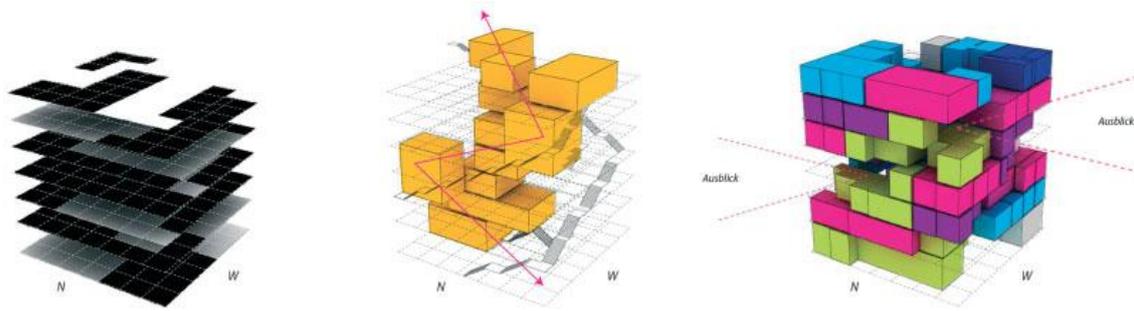
### Implementación

Hochschule für Technik, Stuttgart (2009).

El sistema Voxel se utilizó en el proyecto de la nueva Escuela de Arquitectura de la Hochschule für Technik en Stuttgart. En este proyecto se empleó un sistema constructivo tradicional, con losas y muros de corte, pero estos elementos se organizaron de forma no jerárquica para dar lugar a diversas configuraciones espaciales que respondían a los requisitos del programa. Una vez definida una estructura inicial con un número de plantas, se asignaron a las diversas zonas de cada planta diversas propiedades empleando el programa Voxel (Figura 9).

<sup>6</sup> Entre las anteriores investigaciones sobre la combinación de algoritmos genéticos con el análisis estructural se puede mencionar el trabajo sobre optimización de estructuras (Goldberg, 1989), la optimización de vigas (Wang & Chen, 1996) y de columnas (Ishida & Sugiyama, 1995).

<sup>7</sup> Como se ha mostrado en el primer capítulo, von Neumann desarrolló el primer autómatas auto-replicante en dos dimensiones basándose en la replicación de células (*Cellular Automaton*). El proceso de reproducción se describía mediante reglas muy simples que establecían la relación con las células vecinas. El resultado de la reproducción era una copia del original junto con su descripción, de forma que su reproducción se podía repetir infinitamente.

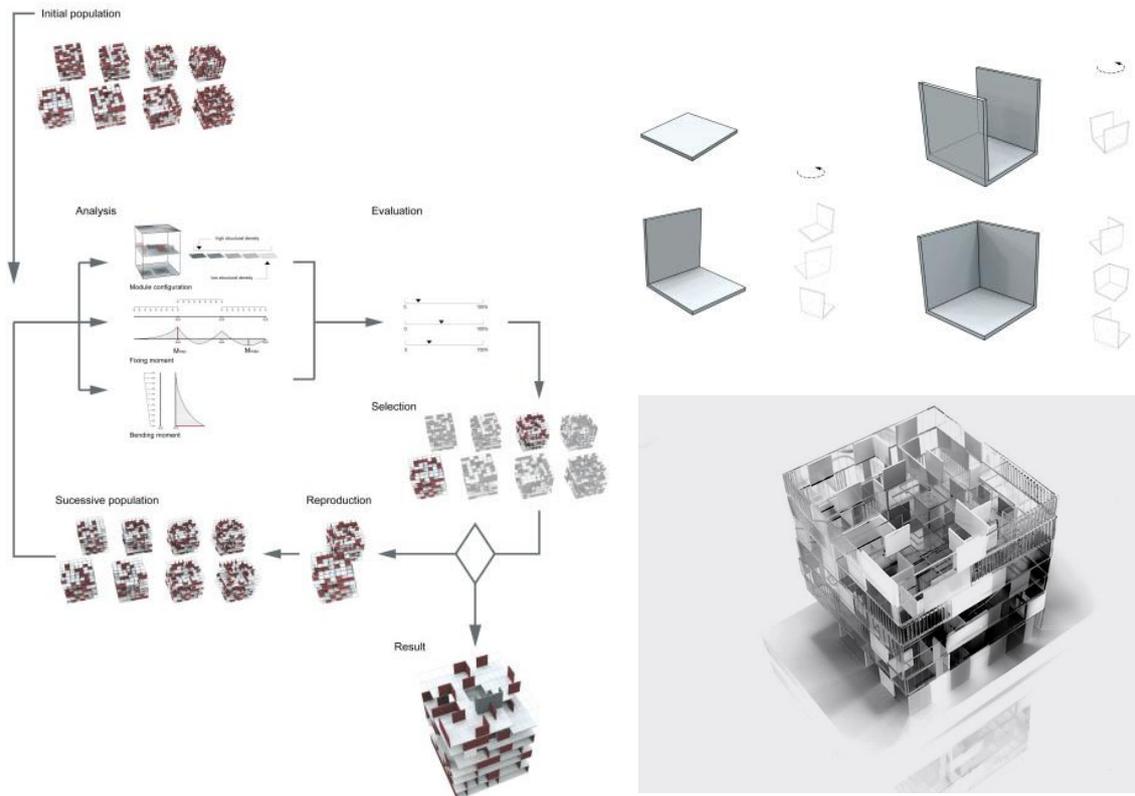


**Figura 9.** Hochschule für Technik, Stuttgart. Diagramas del programa funcional: definición de zonas con una diversa densidad estructural (alta o nula); representación volumétrica de los espacios vacíos; distribución tridimensional del programa. Fuente: (Bollinger, Grohmann, & Tessmann, 2010).

A partir de una configuración inicial se crearon 50 alternativas combinando al azar módulos estructurales, las cuales se evaluaron en base a estos criterios:

- estructurales: minimizar el momento de flexión vertical en las losas sin carga; minimizar el momento de flexión horizontal en los muros de corte bajo cargas laterales;
- funcionales: espacios diáfanos; espacios con subdivisiones estructurales.

Las propuestas con los momentos de flexión más pequeños y la mejor organización de muros de corte de acuerdo con las propiedades de cada espacio se utilizaron para generar nuevas soluciones, descendientes de aquellas que habían resultado ser las más exitosas (estrategia de elitismo). Reproduciendo iterativamente este proceso, el grupo inicial de propuestas obtenidas al azar evolucionó gradualmente hasta alcanzar las propiedades deseadas (Figura 10). Inicialmente se produjeron 50 generaciones al azar y se llegaron a generar más de 200 para obtener una estructura que se adaptase a los criterios del programa y que al mismo tiempo cumpliera con las necesidades estructurales. En este proceso, los datos del análisis retroalimentaron el proceso generativo produciendo una complejidad estructural y geométrica que permitió ir más allá del típico bloque organizado en base a una jerarquía estructural (Figura 11).



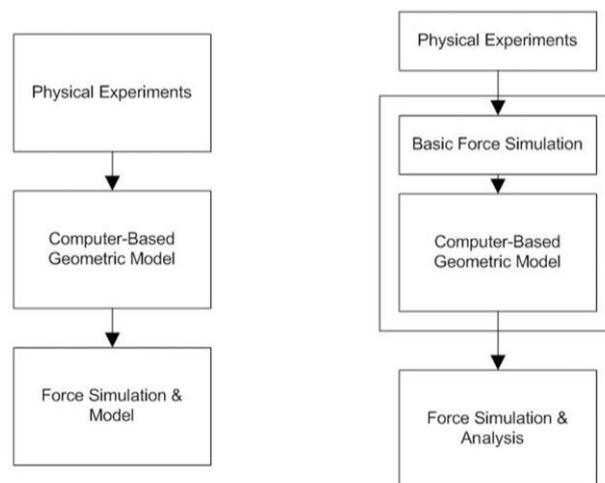
**Figura 10.** Hochschule für Technik, Stuttgart. Diagrama de flujo de datos de Voxel. Módulos estructurales y maqueta. Fuente: (Bollinger, Grohmann, & Tessmann, 2010).



**Figura 11.** Hochschule für Technik, Stuttgart. Render del edificio, vista aérea. Fuente: LAVA.

### 3.1.1.3 PBM: Curve fitting algorithm + Finite Element Method (FEM)

En el ámbito de su investigación en el Institute for Computational Design (ICD), Universität Stuttgart, Achim Menges desarrolló un sistema capaz de explorar posibilidades formales basado en un modelo del comportamiento físico – *Physics-Based Modelling* (PMB) –. El objetivo de este sistema es combinar un modelo que contiene información sobre las propiedades físicas de los materiales con el análisis estructural FEM (*Finite Element Method*) para la creación de estructuras tensadas (Hensel, Menges, & Weinstock, 2006). Como en el caso de los procedimientos tradicionales de búsqueda de formas tensadas (Antoni Gaudí, Frei Otto), la estructura se entiende como el resultado de un sistema de fuerzas internas (propiedades del material) y externas (peso, viento, etc.).<sup>8</sup> En estos casos, se emplearon herramientas analógicas para llegar a una forma que fuese el resultado de las fuerzas de tensión y compresión. En el sistema de Menges, por otra parte, se usaron herramientas digitales para generar la forma a partir de las prestaciones mecánicas del material: “*Based on an understanding of form, material and structure, not as separate elements, but rather as complex interrelations that are embedded in and explored through integral generative processes, the research presented in this paper demonstrates an alternative approach to computational design: here, the computational generation of form is directly driven and informed by physical behavior and material characteristics as well as by the fabrication constraints*” (Fleischmann, Lienhard, & Menges, 2011, pág. 760). El sistema para la generación de formas se basa en la modificación de curvas B-spline que reproducen el comportamiento del material (Figura 12).



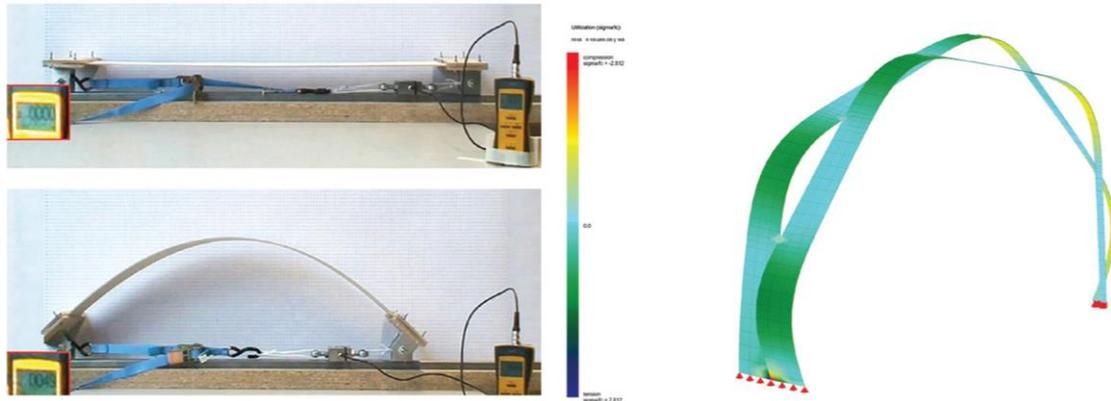
**Figura 12.** Izquierda: proceso convencional para la búsqueda de formas tensadas. Derecha: proceso propuesto por Menges para la exploración de formas tensadas. Fuente: (Fleischmann & Menges, 2012).

<sup>8</sup> Frei Otto desarrolló un método conocido como *form-finding* para definir la forma a partir de las influencias del entorno. Antoni Gaudí utilizó este mismo método para encontrar la forma de los arcos de catenaria de la iglesia Güell.

## Implementación

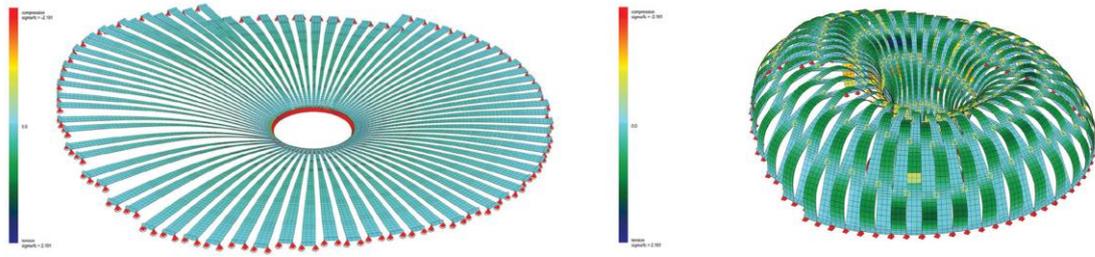
### ICD/ITKE Pavilion, Stuttgart (2010).

El proyecto de este pabellón nació de la colaboración entre el Institute for Computational Design (ICD) y el Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE) en Universität Stuttgart. El proceso empezó con la definición de un modelo paramétrico que representaba el comportamiento mecánico del material, en este caso, madera. Para ello se realizó un experimento previo a fin de obtener información sobre la elasticidad de los listones de contrachapado de madera en deflexión (Figura 13).



**Figura 13.** Experimentos con modelo físico y digital sobre la elasticidad de las tiras de contrachapado de madera. Fuente: (Fleischmann, Lienhard, & Menges, 2011).

En base a esta información, se definió un algoritmo de adaptación de la curva (*curve-matching algorithm*) capaz de proporcionar curvaturas de los listones de madera que se aproximasen al comportamiento mecánico derivado experimentalmente. Cada variante de la curvatura de los listones se evaluó en base a criterios de resistencia estructural. La forma final entre todas las alternativas posibles fue elegida en base a criterios estéticos de los proyectistas. Además, hubo que verificar que las formas elegidas cumplieran con los requisitos estructurales. Para ello, la información geométrica fue transferida a un modelo de análisis estructural (FEM), por medio del cual se optimizó la forma llevando hasta el límite la elasticidad del material y controlando la tensión interna producida por la flexión en respuesta a fuerzas externas, tales como el viento y la carga por nieve (Figura 14 y Figura 15).



**Figura 14.** Análisis estructural FEM del ICD/ITKE Pavilion, Stuttgart (2010). Fuente: (Fleischmann, Lienhard, & Menges, 2011).

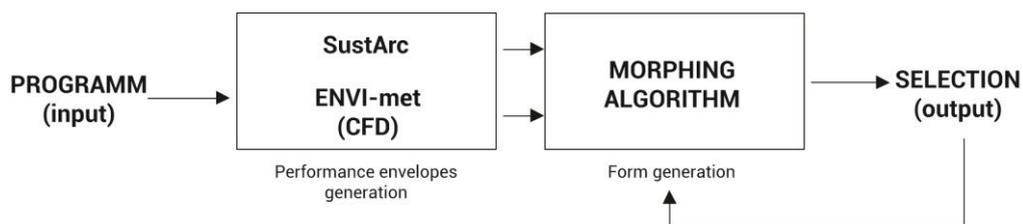


**Figura 15.** ICD/ITKE Pavilion, Stuttgart (2010). Fuente: (Fleischmann, Lienhard, & Menges, 2011).

### 3.1.2 Sistemas generativos basados en prestaciones térmicas y lumínicas

#### 3.1.2.1 GenPOD: Morphing Algorithm (MA)+ SustArc /ENVI-met (CFD)

Desarrollado por Yasha Grobman (Technion, Israel Institute of Technology), GenPOD (*Generative Performance Oriented Design model*) es un sistema que combina un algoritmo de mutación (*morphing algorithm*) con herramientas de simulación térmica (SustArc y ENVI-met 3.0). GenPOD genera superficies continuas, cuyos nudos tienen el mismo valor de prestaciones (*performance envelope*): envolvente solar (SustArc) y envolvente aerodinámica (ENVI-met 3.0), a partir de las que se genera una nueva superficie (*multi-performance envelope*) que es el resultado de la negociación entre los requisitos de ambas (Figura 16). La envolvente resultante garantiza el confort térmico del edificio. Tal como afirma Grobman: “*The chosen, most fitting, generated form, can be used as an initial building’s form for the next stages of the design process or as a design space that defines a threshold of the building’s form*” (Grobman, Yezioro, & Capeluto, 2007, p. 39). En esta línea de investigación se puede incluir también el trabajo de Michele Leidi y Arno Schlüter (ETH Zúrich).<sup>9</sup>



**Figura 16.** Diagrama de flujo de datos de GenPOD. Fuente: Elaboración propia.

### Implementación

Office Building in Alenbi Street, Tel Aviv (2008).

GenPOD se aplicó en el proyecto de un edificio de oficinas para conseguir unos objetivos económicos y de confort térmico y, al mismo tiempo, evitar perjudicar a los edificios existentes. En la primera etapa del proceso se generaron y evaluaron con SustArc<sup>10</sup> dos tipos de superficies: una que aseguraba que todos los edificios vecinos y el nuevo edificio recibiesen iluminación directa –*Solar Rights Envelope (SRE)*–, y otra que garantizaba la captación solar máxima del nuevo edificio –*Solar Catch Envelope (SCE)*–. Además, por medio de la herramienta ENVI-met 3.0, se generó una superficie en la que la acción del viento se repartía uniformemente en sus nudos. El objetivo de esta primera etapa del proceso fue encontrar una envolvente capaz de cumplir con las prestaciones asignadas a

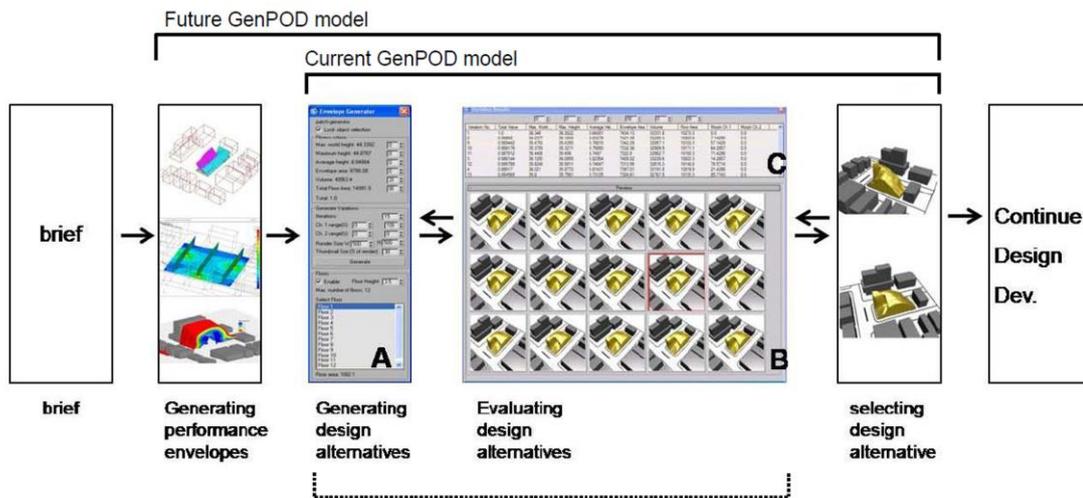
<sup>9</sup> Michele Leidi y Arno Schlüter desarrollaron un sistema de análisis y visualización que permite cuantificar y representar las propiedades físicas de un entorno para definir la envolvente del edificio (*Volumetric Site Analysis-VAS*) (Leidi & Schlüter, 2013). El sistema se basa en diversos análisis: *Volumetric Insolation Analysis (VIA)*, *Volumetric Visibility Analysis (VVA)*, *Computational Fluid Dynamics (CFD)*.

<sup>10</sup> SustArc es un programa desarrollado por Guedi Capeluto y Edna Shaviv que permite generar superficies con un mismo valor de radiación solar mediante diversas funciones objetivos: *Solar Rights Envelope (SRE)*, *Solar Catch Envelope (SCE)* y *Solar Volume (SV)* (Capeluto & Shaviv, 1997).

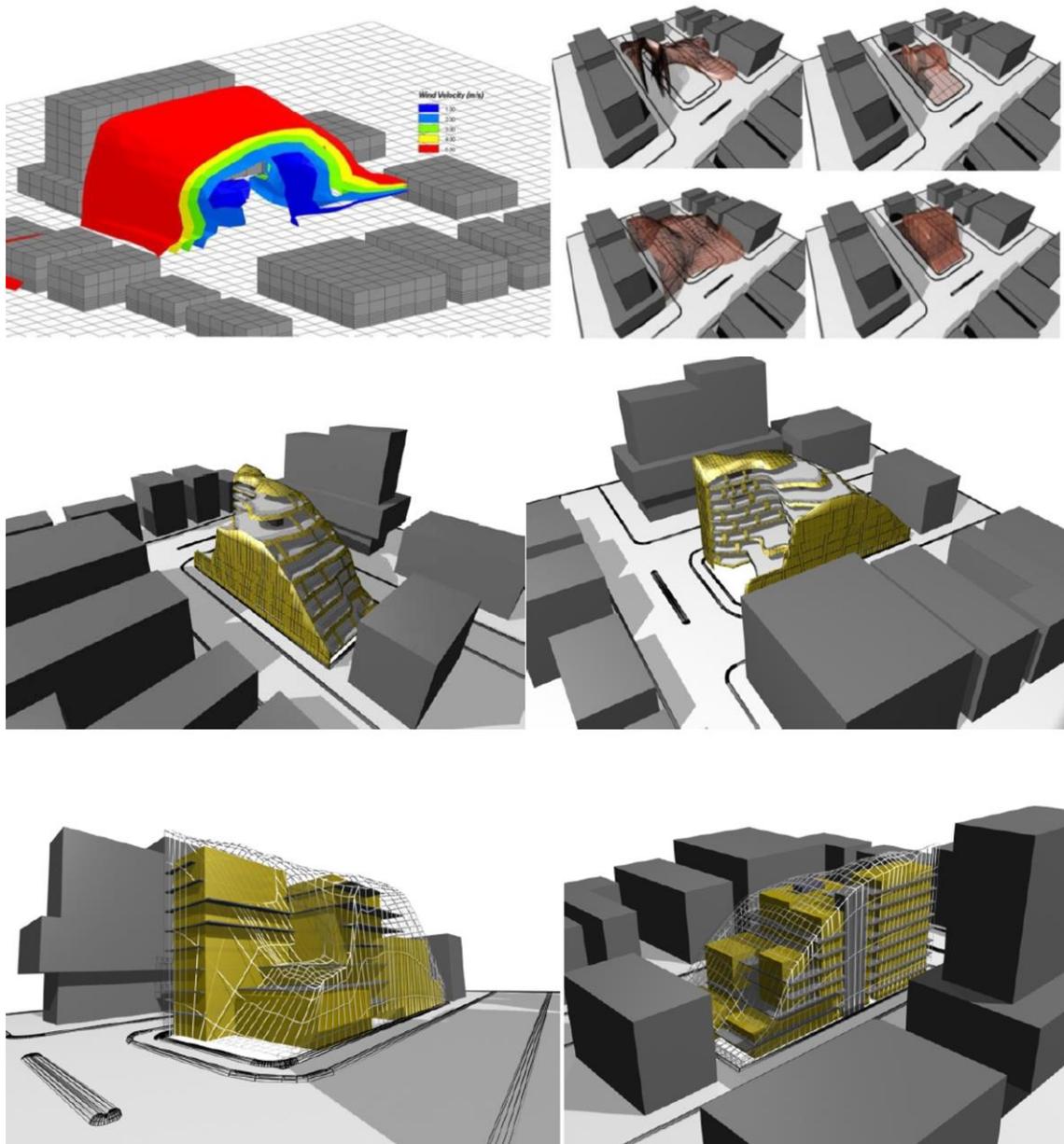
cada envolvente. Por medio del algoritmo de mutación se crearon alternativas a través de diversos ciclos de generación y prueba, hasta que las diferencias entre alternativas fuesen suficientemente limitadas, es decir, que no resultaran muy distintas en términos de superficie en planta, volumen y área de la envolvente. Este ajuste se obtuvo regulando, ciclo a ciclo, el rango de la transformación desde el 100% hasta el 35-70%. En etapas sucesivas se evaluaron las alternativas en base a diversos criterios (Figura 17):

- económicos: maximizar el número de plantas y área ocupada;
- funcionales: maximizar la superficie destinada a comercio en la planta baja y la superficie de oficinas en las plantas superiores;
- estéticos: maximizar la simplicidad de la forma (evaluación visual).

Finalmente, entre las alternativas generadas, se eligió una que garantizaba la exposición solar y la respuesta uniforme a la acción del viento. En esta propuesta final primaba el buen funcionamiento térmico sobre otros objetivos (Figura 18).



**Figura 17.** Proceso de toma de decisiones con GenPOD. Fuente: (Grobman, 2008).



**Figura 18.** Office Building in Alenbi Street, Tel Aviv. Simulación de la acción del viento en la envolvente con ENVI-met. Determinación de la forma de un edificio a partir de la envolvente y distribución de los espacios interiores según el programa funcional. Fuente: (Grobman, 2008).

### 3.1.2.2 CDO tool: Multicriteria Ant Colony Optimization (MACO) + Radiance (CFD)

Kristina Shea desarrolló un sistema de generación de envolventes que combina un algoritmo multicriterio evolutivo “*ant colony*” (MACO),<sup>11</sup> o algoritmo basado en colonias de hormigas, con una herramienta de simulación lumínica (*Radiance*) (Shea, Sedgwick, & Antonunntto, 2006). El algoritmo basado en colonias de hormigas se emplea en el proceso generativo, y también como técnica de optimización. Fundamentalmente, este algoritmo genera de forma aleatoria diversas alternativas para, una vez calculadas sus prestaciones, encontrar la óptima (optimización combinatoria). Se trata de un algoritmo meta-heurístico que puede llevar a encontrar soluciones discretas optimizadas en relación con diversos criterios, definiendo una frontera de Pareto que puede visualizarse en una interfaz gráfica interactiva (Figura 19).

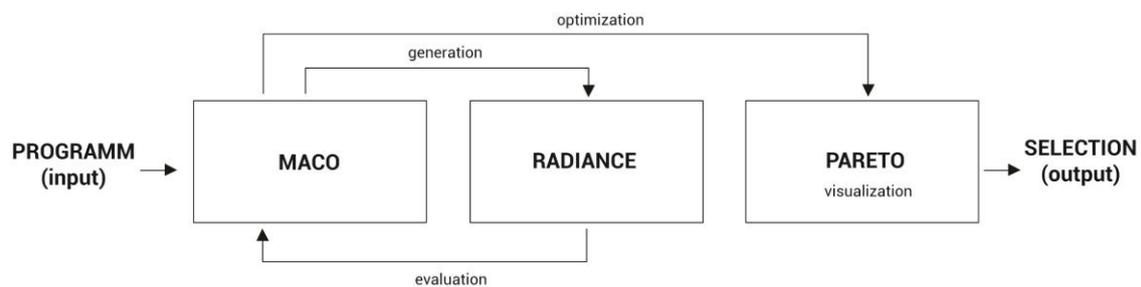


Figura 19. Diagrama de flujo de datos de CDO tool. Fuente: Elaboración propia.

### Implementación

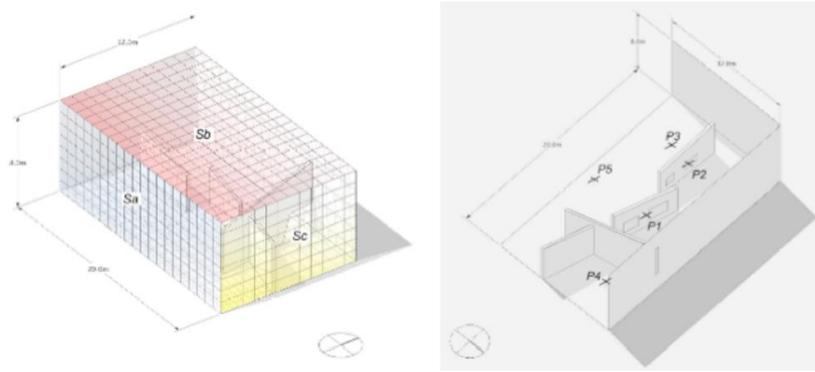
#### Media Centre Building, Paris (2006).

Kristina Shea ha aplicado el método de optimización multicriterio basado en el algoritmo *ant colony* (MACO) y la herramienta de simulación lumínica Radiance, para optimizar el diseño de la envolvente de un edificio organizado en cinco espacios de diversos usos. El problema consistía en explorar variantes de la envolvente cambiando el material de los paneles de revestimiento (vidrio opaco, vidrio claro, vidrio traslúcido y vidrio de baja transmisión) para optimizar aspectos cuantitativos y cualitativos:

- lumínicos: maximizar la entrada de luz natural;
- térmicos: minimizar las horas de luz directa;
- económicos: minimizar el coste total de los paneles;
- psicológicos: garantizar vista al exterior.

Los muros que separan los espacios interiores no llegan al techo, de forma que el edificio puede asimilarse a un gran espacio diáfano (Figura 20).

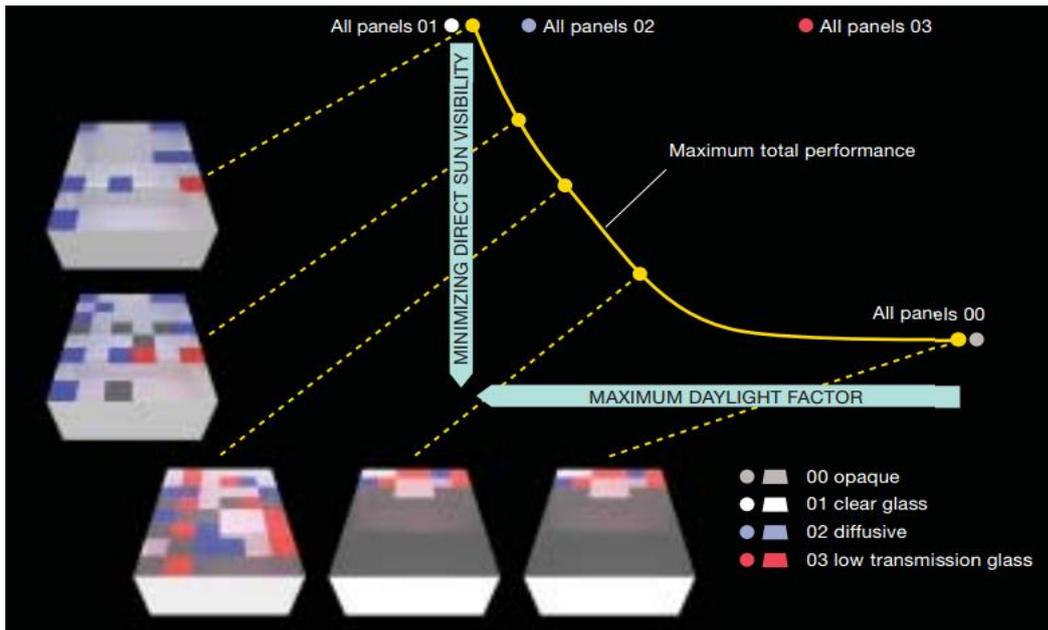
<sup>11</sup> Los algoritmos *Ant Colony Optimization* (ACO) definen procesos de optimización discreta inspirados en el comportamiento de las colonias de hormigas (Dorigo, Di Caro, & Gambardella, 1999; Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999)



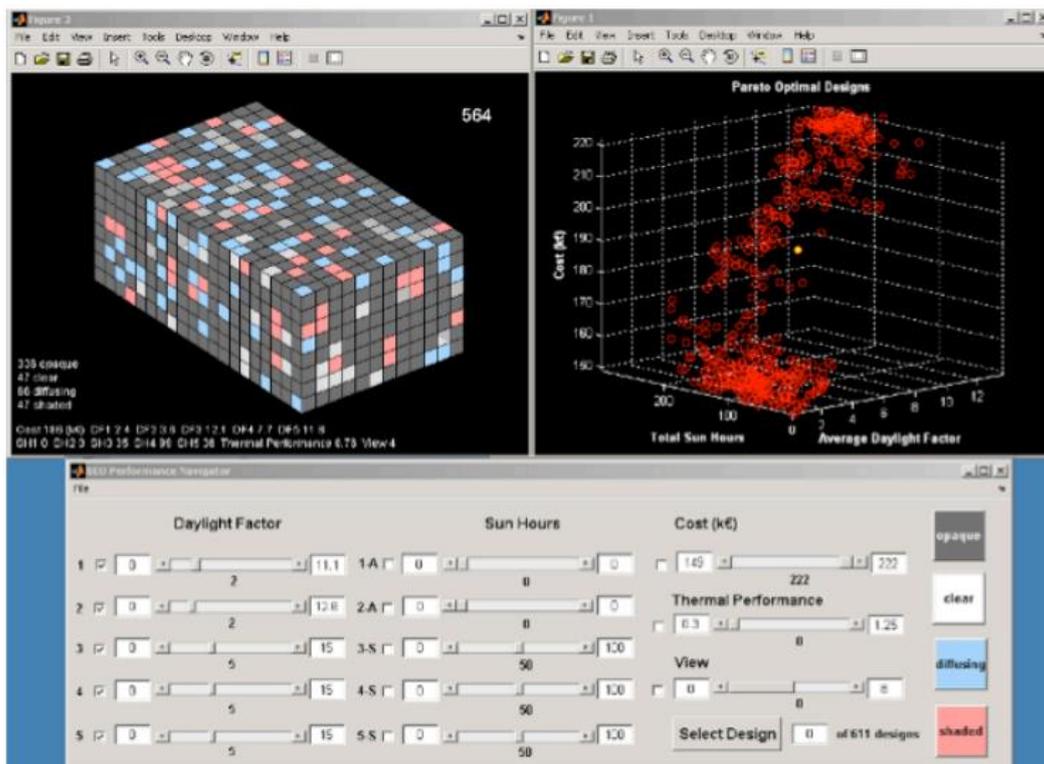
Panel material	Light transmission	Direct Sun?
00. Opaque	0%	no
01. Clear glass	75%	yes
02. Diffusing glass	75%	yes
03. Low transmission glass	25%	yes

**Figura 20.** Caso de estudio: dimensión del edificio (12 m × 20 m × 8 m); diseño del revestimiento (unidad de paneles de 1x1m por un total de 496 paneles); distribución de los espacios interiores (galerías 1 -P1, galería 2 -P2, área de reuniones -P3, recepción-P4 y oficinas-P5). Tabla de las propiedades de los materiales elegidos para los paneles de revestimiento. Fuente: (Shea, Sedgwick, & Antonunntto, 2006).

Al variar las características y posición de los paneles de revestimiento, se calculó el nivel de iluminación y las horas de luz solar directa en los diversos espacios funcionales (P1, P2, P3, P4, P5) por medio de la herramienta de simulación *Radiance* (Figura 21), ya que cada espacio necesita diferentes niveles de iluminación u horas de luz solar directa. Por ejemplo, P3 (área de reuniones) necesita maximizar el factor de luz natural y reducir al mínimo la luz directa del sol por la tarde en verano, pero otros espacios tienen otras necesidades que dependen de la orientación del edificio. En una matriz se puntúa la vista hacia un objeto desde una cierta distancia, para determinar las zonas en las que es necesario colocar paneles de vidrio para asegurar las vistas deseadas. Esto da lugar a un conflicto entre la necesidad de colocar paneles de vidrio para garantizar las vistas y los niveles de iluminación deseados. Por otro lado, la selección de paneles de uno u otro material incide en los costes. El proceso de combinar alternativas y optimizar soluciones se llevó a cabo usando el algoritmo multicriterio *ant colony*, cuyos resultados dan lugar a una “nube” de soluciones en equilibrio de Pareto. La decisión sobre la solución final dependía de las preferencias del proyectista, quien asignaba valores a los diversos objetivos en una interfaz gráfica (Figura 22).



**Figura 21.** Exploración del *trade-off* entre el factor de iluminación y las horas de luz directa. Fuente: (Luebkean & Shea, 2005).



**Figura 22.** GUI (Graphical User Interface) realizada en Matlab para la optimización de la fachada del edificio y visualización de las soluciones de Pareto. Esta interfaz permite evaluar una propuesta por medio del ajuste de los valores deseados por cada criterio según un rango predefinido. El punto correspondiente a una data propuesta es indicado en amarillo en la frontera de Pareto (vista 3D de la frontera de Pareto, arriba a la derecha). Fuente: (Luebkean & Shea, 2005).

### 3.1.2.3 DEXEN: Genetic Algorithm (GA) + Radiance (CFD) + Pareto Algorithm

El trabajo de Patrick Janssen, llevado a cabo en la National University Singapore (NUS), se centró en la creación de un sistema evolutivo, DEXEN (*Distributed EXecution ENvironment*) capaz de integrar varios algoritmos metaheurísticos, tales como algoritmos genéticos, algoritmos de ascenso de colina (*hill climbing algorithm*) y algoritmos de enfriamiento (*simulated annealing*), con unas herramientas de cálculo y simulación (Radiance, Energyplus). DEXEN permite la generación de varias propuestas (o fenotipos), asignando valores a una serie de parámetros a un genotipo. DEXEN evalúa diversas alternativas respecto a unos criterios predefinidos, clasificándolas por medio del método Pareto. A partir de ellas, se crean nuevas propuestas por medio de operadores de mutación o de cruzamiento. DEXEN emplea Sidefx Houdini, una aplicación CAD avanzada que incluye un editor gráfico de algoritmos (Figura 23).

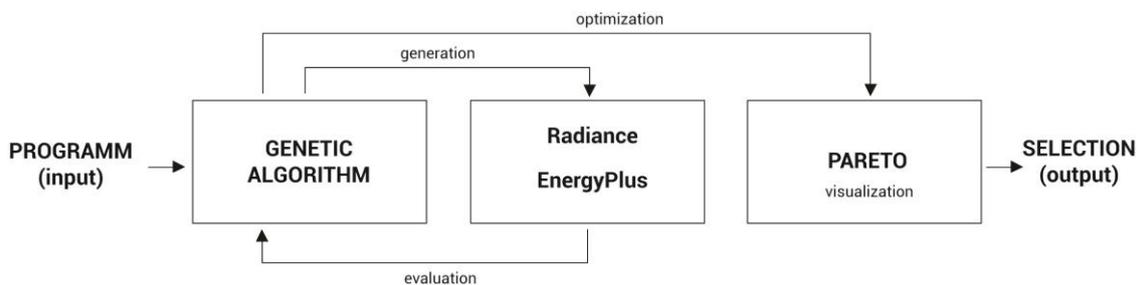


Figura 23. Diagrama de flujo de datos de DEXEN. Fuente: Elaboración propia.

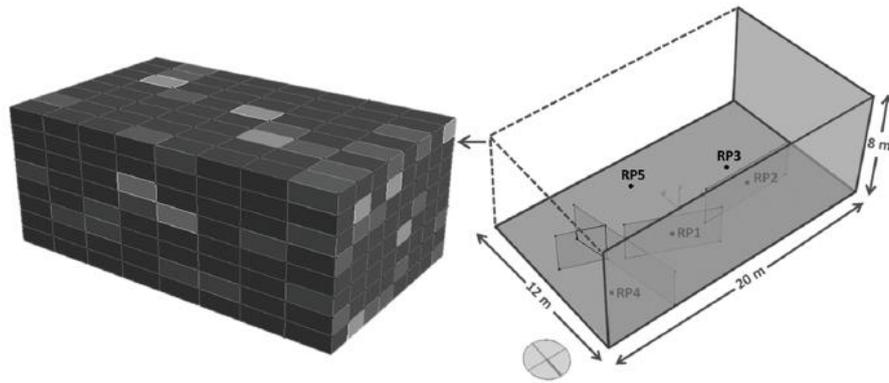
## Implementación

### 1) Media Centre Building, Paris (2012).

El caso de aplicación de DEXEN es similar al de Kristina Shea, en el que se buscaba optimizar el diseño de una envolvente para alcanzar unas condiciones óptimas de iluminación. También en este caso se consideró un edificio (12 m × 20 m × 8 m) organizado en cinco espacios de diversos usos (dos galerías, área de reuniones, recepción y oficinas) y con diferentes requisitos de iluminación (Figura 24). El sistema DEXEN se aplicó en dos casos: en el primero, se tuvieron en cuenta las variaciones de los paneles de revestimiento y la forma del edificio; en el segundo, las variaciones de los paneles de revestimiento y la distribución interna del edificio. En ambos casos, las variantes se evaluaron en base a los mismos criterios cuantitativos:

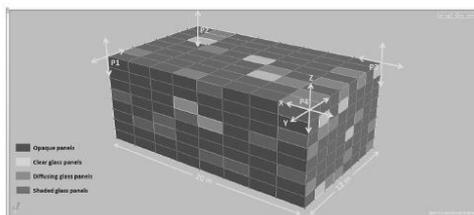
- lumínicos: maximización (máximo 15%) del factor de luz natural (*daylight factor*); minimización de las horas de sol directas (*sunshine duration*);
- térmicos: minimización del valor de transmitancia de los paneles (valor U);
- funcionales: cumplimiento con la altura deseada en cada uno de los cinco espacios interiores (cada espacio interior tiene diferentes requisitos de altura, teniendo en cuenta factores tales como el aire acondicionado, la privacidad, la iluminación);
- económicos: minimización del coste global de los paneles.

Para el cálculo de los dos criterios conflictivos relacionados con la iluminación, maximización del factor de luz natural (lux) y minimización de las horas de iluminación directa (h), se utilizó el programa de simulación Radiance.



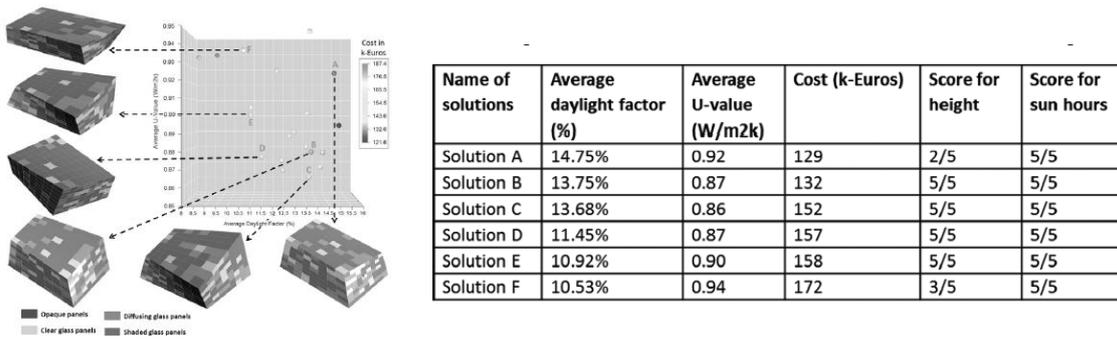
**Figura 24.** Media Centre Building: galería 1 (RP1), galería 2 (RP2), área de reuniones (RP3), recepción (RP4), oficinas (RP5). Fuente: (Kaushik & Janssen, 2012).

Caso de aplicación 1. Se creó un modelo con Sidefx Houdini (Figura 25), cuyos parámetros controlan la forma geométrica: los puntos P1, P2, P3 y P4 pueden moverse a lo largo de los ejes X -Y modificando el largo y el ancho del edificio hasta 3 metros, y a lo largo del eje Z, modificando la altura entre 4 y 8 metros. Los paneles utilizados son de diversos materiales (vidrio opaco, vidrio claro, vidrio traslúcido, vidrio de baja transmisión) y medidas, pero su número está fijado en 192. Después de una serie de generaciones por medio de un algoritmo evolutivo multicriterio, se obtuvo la frontera de Pareto (10.000 soluciones en equilibrio) y se eligieron seis soluciones, entre las que conseguían alcanzar valores máximos de iluminación solar directa, con el fin de compararlas (Figura 26).



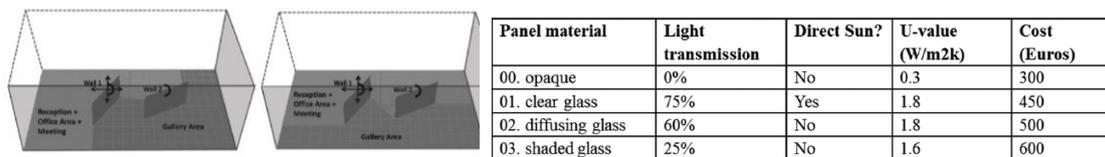
Panel material	Light transmission	Direct Sun?	U-value (W/m2k)	Cost (Euros)
00. opaque	0%	No	0.3	300
01. clear glass	75%	Yes	1.8	450
02. diffusing glass	60%	No	1.8	500
03. shaded glass	25%	No	1.6	600

**Figura 25.** Modelo paramétrico realizado en Sidex Houdini: parámetros que influyen en la forma del edificio. Fuente: (Kaushik & Janssen, 2012).

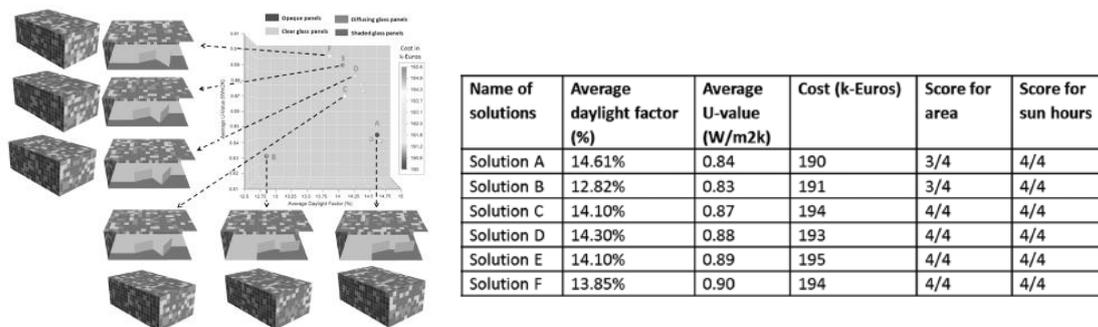


**Figura 26.** Selección de 6 alternativas sobre la frontera de Pareto y tabla comparativa de sus prestaciones (factor de luz natural, valor de transmitancia medio, costes, puntuación para altura y horas de sol). Fuente: (Kaushik & Janssen, 2012).

**Caso de aplicación 2.** El edificio se representó mediante un modelo cuyos parámetros determinan la distribución interior: dos paredes pueden rotar hasta un máximo de 90° o desplazarse en el plano X-Y (Figura 27). En este caso, los paneles que componen los elementos divisorios tienen un tamaño de 1x1 metros. En total son 496 paneles que pueden variar según las características de los materiales (vidrio opaco, vidrio claro, vidrio traslúcido, vidrio de baja transmisión). El proceso de optimización es el mismo que en caso anterior, con la diferencia de que, en este caso, se calcularon las prestaciones del edificio en relación con la iluminación y la energía de acuerdo con las variaciones de ratio entre la superficie de las oficinas y la galería de exposiciones. Después de una serie de generaciones por medio de un algoritmo evolutivo, se obtuvo la frontera de Pareto (10.000 soluciones en equilibrio). Para poder compararlas, se eligieron seis soluciones entre las que alcanzaban valores máximos en términos de ratio entre superficie de oficinas y galerías (Figura 28).



**Figura 27.** Modelo paramétrico realizado en Sidex Houdini: parámetros que influyen en el espacio interior. Fuente: (Kaushik & Janssen, 2012).

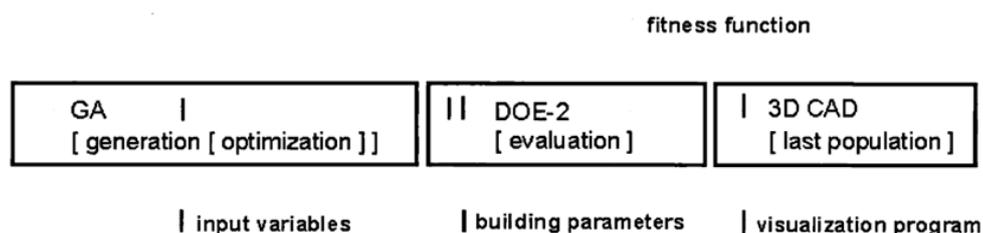


**Figura 28.** Tabla comparativa de los resultados de prestaciones de las seis soluciones seleccionadas, respecto a los diversos criterios de prestaciones. Fuente: (Kaushik & Janssen, 2012).

### 3.1.3 Sistemas generativos basados en prestaciones energéticas

#### 3.1.3.1 GDS: Shape Grammar (SG)+ Genetic Algorithm (GA)+ Energy Simulation (DOE-2.1)

El trabajo realizado por Luisa Caldas y Leslie Norfold se centra en la integración de la generación con el análisis energético para el proyecto de edificios (Caldas & Norfold, 1999). Su sistema de diseño generativo –*Generative Design System (GDS)*– combina un algoritmo genético (GA)<sup>12</sup> con la simulación energética (DOE-2),<sup>13</sup> con el fin de encontrar soluciones que optimicen el comportamiento energético del edificio (Figura 29). En este sistema, el algoritmo genético se aplica como un mecanismo generativo y de optimización. El algoritmo produce un conjunto o población (*population*) de alternativas modificando aleatoriamente las características de los parámetros en base a unas reglas de composición (*shape grammar*). Cada propuesta –generada a partir de las intenciones, estilo o lenguaje del arquitecto– se evalúa en base a la información obtenida por medio de la simulación energética. Una vez que el algoritmo es capaz de identificar la propuesta que mejora el rendimiento (prestaciones térmicas y lumínicas), se crea una nueva población a partir de las características de esta propuesta ganadora (estrategia de elitismo). A pesar de que el problema se plantea en términos de optimización, el algoritmo genético proporciona una serie de alternativas posibles, más que una solución óptima: “*Solutions must not be interpreted as definite optimal answers, but as diagnoses of potential problems and as suggestions for further architectural explorations*” (Caldas & Norfold, 2001, pág. 1404). Es decir, las propuestas que se alcanzan por medio del sistema no son una respuesta definitiva a un problema, sino que facilitan información útil para continuar con el proceso de proyecto.



**Figura 29.** Diagrama de flujo de datos de GDS. Fuente: (Caldas, 2001).

<sup>12</sup> El algoritmo genético es un proceso estocástico que produce una serie de soluciones en base a combinaciones aleatorias, y emplea un procedimiento de prueba y error para aproximarse al cumplimiento de los objetivos. En el sistema GDS se implementa un tipo especial de algoritmo genético definido como *micro-GA*, que opera con unas poblaciones más reducidas que las de un algoritmo genético normal (30-200 individuos), convergiendo más rápidamente en la solución.

<sup>13</sup> DOE-2 es un programa que proporciona información sobre el uso de energía –*Energy Use Intensity (EUI)*–, los costes que derivan del consumo energético –*Life Cycle Energy Use (LCEU)/ Life Cycle Energy Cost (LCEC)*– y la proporción entre pérdidas y ganancias térmicas –*Monthly Heating/Cooling Loads*– de edificios. También puede realizar un análisis simplificado de la iluminación (*Daylight Factor Method*).

## Implementación

### Optimización de la fachada de la Escuela de Arquitectura de Oporto, de Álvaro Siza (2001).

El sistema GDS se ha utilizado en el proyecto de un edificio para la Escuela de Arquitectura de Oporto realizado por Álvaro Siza (Figura 30), para comparar los resultados obtenidos con las prestaciones del edificio. Concretamente GDS se aplicó para componer las fachadas, determinando las dimensiones de las aberturas y las protecciones solares en base a estos criterios:

- energéticos: minimizar el consumo eléctrico para la iluminación;
- térmicos: maximizar el acondicionamiento térmico;
- lumínicos: garantizar los niveles de iluminación por zonas.

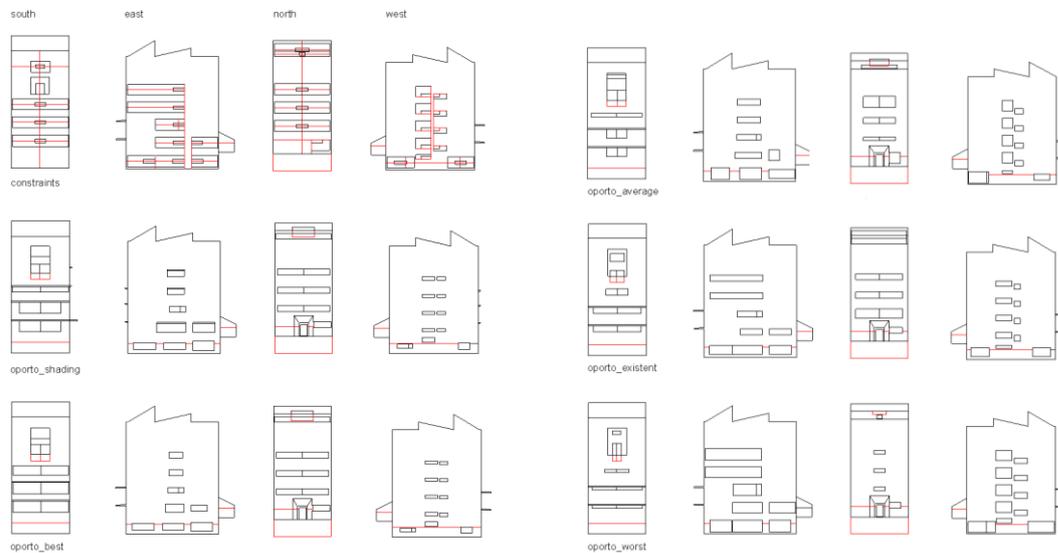
Aunque el aprovechamiento máximo de la luz natural es un objetivo deseable desde el punto de vista térmico, una ventana muy grande puede implicar una excesiva carga térmica o una excesiva pérdida de calor a través de la superficie vidriada, es decir, puede provocar un efecto no deseado. Así, el objetivo fue encontrar un diseño de la fachada capaz de equilibrar las cargas y las pérdidas térmicas (punto de equilibrio).



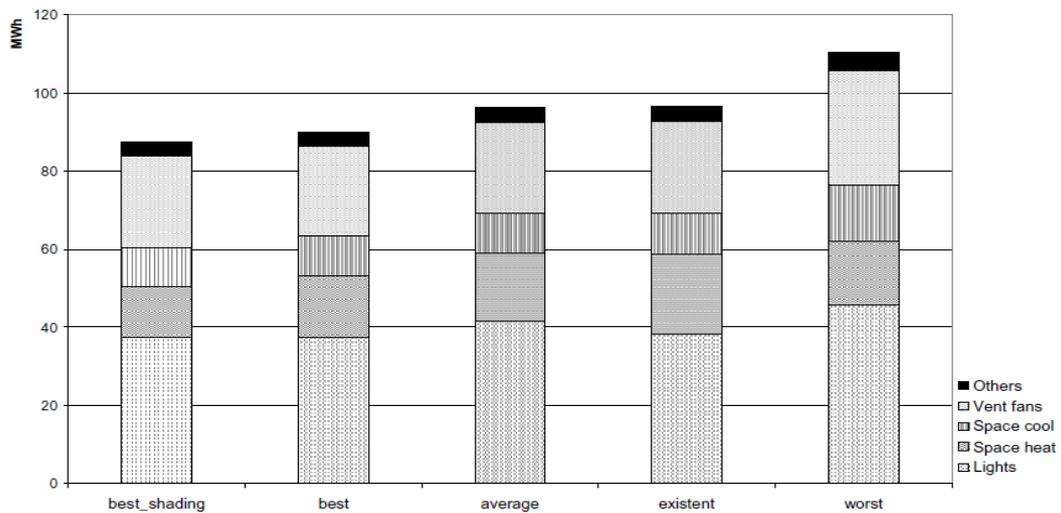
**Figura 30.** Edificio H de la Escuela de Arquitectura de Álvaro Siza, Oporto. Fuente: Fotografías propias.

El sistema GDS permitió codificar los criterios estéticos o lenguaje del arquitecto, en base a una serie de reglas (*shape grammars*). Luego, GDS generó aleatoriamente un conjunto (población) de propuestas para la fachada a partir de las reglas compositivas y calculó sus prestaciones. Una vez descartadas aquellas alternativas que no cumplían con los requisitos lumínicos, el sistema buscó otras que minimizasen el consumo energético. Las soluciones obtenidas iban evolucionando a lo largo del proceso, ajustándose a los objetivos. El sistema generó propuestas para cada fachada del edificio que en algunos casos coincidieron con el edificio original, y en otros divergieron radicalmente. Manteniendo los niveles de iluminación deseados (luz natural), la propuesta óptima

proporciona por GDS reducía un 10% el consumo energético respecto del edificio original (Figura 31 y Figura 32).



**Figura 31.** Variantes por las fachadas de un edificio de la Escuela de Arquitectura en Oporto, de Álvaro Siza, generadas por el sistema GDS. En rojo se representan las reglas de composición (restricciones del espacio de búsqueda). Fuente: (Caldas & Norfolk, 2001).



**Figura 32.** Resultados del proceso que aplica GDS. Cambiando la proporción de las ventanas se obtienen variantes que mejoran las prestaciones del proyecto original. Fuente: (Caldas & Norfolk, 2001).

### 3.1.3.2 GENE\_ARCH: Genetic Algorithm (GA)+ Energy Simulation (DOE-2.1) + Pareto Algorithm

Con la introducción de un algoritmo de optimización de Pareto, el sistema de diseño generativo (GDS) desarrollado por Luisa Caldas amplió su aplicación al ámbito de la evaluación multicriterio. En este caso, el sistema combina el proceso de generación de soluciones por medio de un algoritmo genético con la simulación energética (EnergyPlus, DOE-2.1, etc.) y con la técnica de optimización de Pareto, la cual permite considerar diversas funciones objetivo simultáneamente (Figura 33). Esencialmente, se trata de un sistema compuesto de un módulo que codifica las intenciones del arquitecto (algoritmo genético), un módulo de evaluación (simulación) y un módulo de negociación (*trade-off*) entre objetivos conflictivos (algoritmo de optimización de Pareto). Este sistema, que ha evolucionado en una herramienta conocida como GENE\_ARCH (Caldas, 2006), se ha empleado para elegir los materiales de un muro exterior considerando costes, consumo energético y energía embebida de los mismos materiales, y para optimizar la geometría del edificio y distribución de los espacios interiores. Además, el sistema se ha ampliado para ser utilizado a escala urbana: GENE\_URBE, una versión ampliada de GENE\_ARCH, permite hacer proyectos de planificación urbana para reducir el consumo energético gracias a las mejoras de las condiciones de microclima (reducción del efecto isla de calor o efecto de invernadero local).

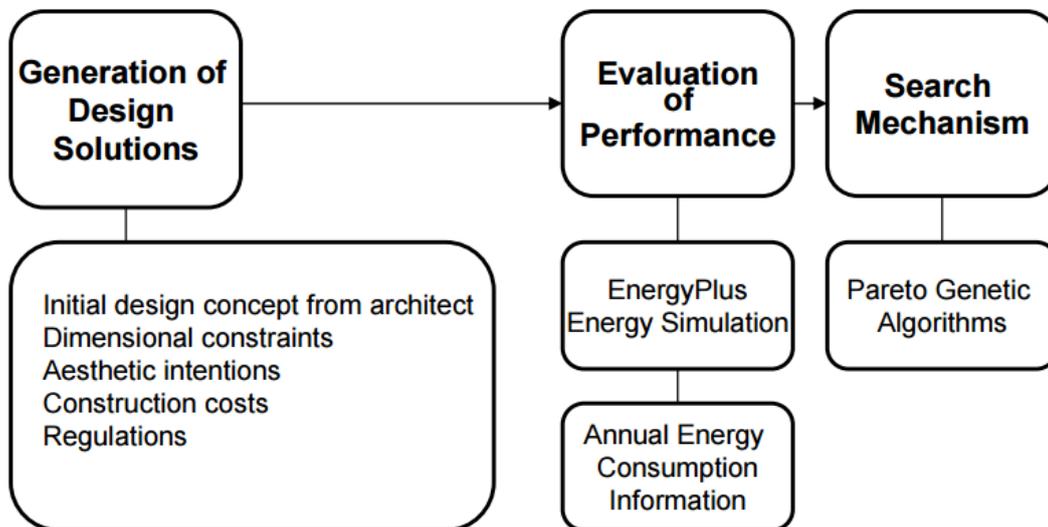


Figura 33. Diagrama de flujo de datos de GENE\_ARCH. Fuente: (Caldas, 2006).

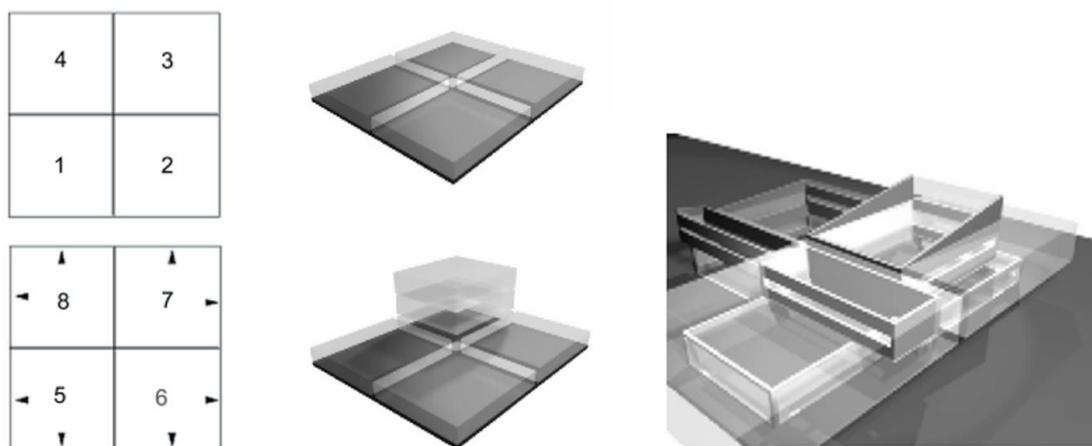
## Implementación

### Vivienda particular, Chicago (2005)

GENE\_ARCH se aplicó a la generación de la forma de una vivienda de dos plantas en Chicago para conseguir estos objetivos cuantificables:

- energéticos: minimizar el consumo energético para calefacción;
- lumínicos: maximizar la iluminación natural.

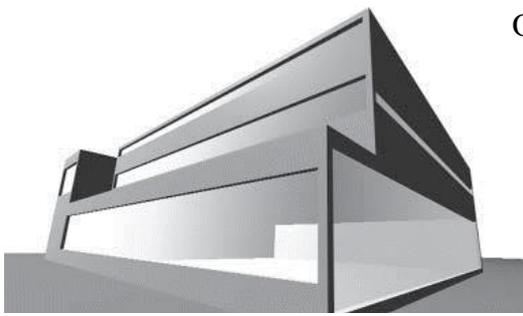
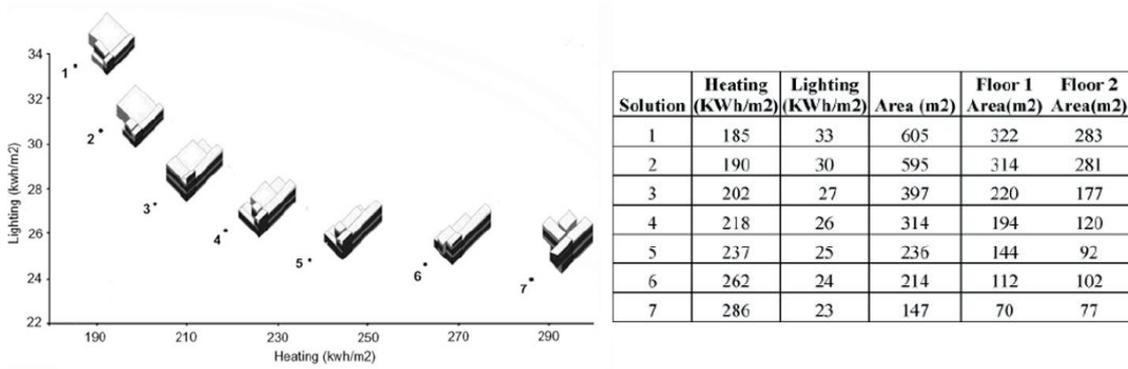
Unas aberturas grandes favorecen la entrada de luz natural y la ganancia de radiación solar, pero suponen una pérdida de calor en invierno. Por tanto, los criterios energéticos y los de confort lumínico entran en conflicto entre ellos. Para su negociación, cada uno de los criterios se ha expresado por medio de un solo indicador: el consumo se ha medido como intensidad de uso de energía (Kwh/m<sup>2</sup>)– *Energy Use Intensity* (EUI), y el confort lumínico en términos de consumo eléctrico (Kwh/m<sup>2</sup>), ya que la disminución del consumo de electricidad está relacionada con la entrada de luz natural. Una vez codificadas las reglas generativas en un modelo paramétrico que tenía en cuenta las dimensiones y la normativa (Figura 34), GENE\_ARCH generó alternativas que optimizan simultáneamente ambos objetivos, representadas en una frontera de Pareto.



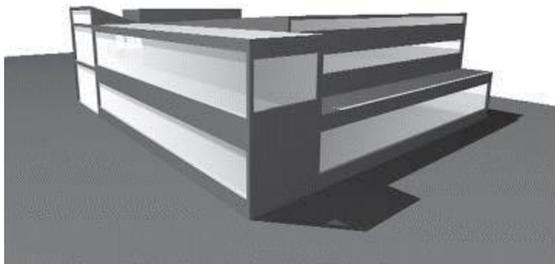
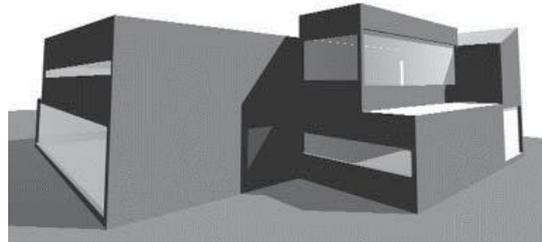
**Figura 34.** Codificación de las reglas de composición: la vivienda consta de dos plantas definidas por cuatro espacios adyacentes, cuya posición es fija y cuya dimensión es variable (la segunda planta del edificio también puede variar en altura y tener diferentes inclinaciones del techo). El ancho de la ventana es siempre igual al ancho de la pared, pero su altura puede variar. Fuente: (Caldas & Norford, 2004).

A partir de estos resultados se llegó a la conclusión de que las viviendas con un menor consumo de energía para la calefacción tienen mayor superficie que las que minimizan el consumo para la iluminación (Figura 35). Así, la solución que mejor reduce el consumo de calefacción (opción 1) se corresponde con un edificio de mayor tamaño, compacto y con grandes aberturas acristaladas orientadas hacia el sur, las cuales aumentan las ganancias térmicas; la solución que reduce el consumo de iluminación (opción 7) está constituida por la suma de pequeños espacios en los que la luz puede penetrar más

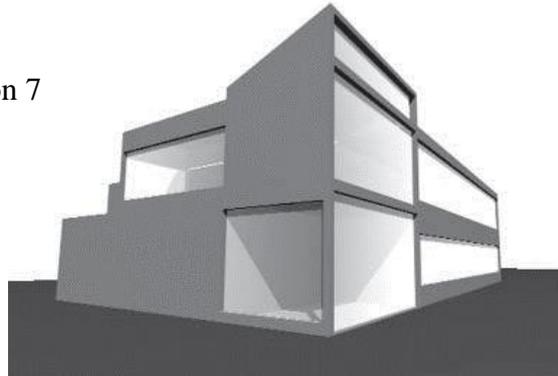
fácilmente a través de grandes áreas acristaladas orientadas al sur (Figura 35). La propuesta capaz de cumplir con ambos requisitos es una solución intermedia (opción 4).



Opción 1



Opción 7



**Figura 35.** Gráfico de las propuestas de diseño distribuidas sobre la frontera de Pareto y tabla de sus respectivos valores de las prestaciones. Vistas de las dos propuestas que optimizan el ahorro energético. Fuente: (Caldas, 2005).

### 3.1.3.3 FNT+MOEA: Fuzzy Neural Tree (FNT) + Multiobjective evolutionary algorithm (MOEA)+ PHPP

El trabajo llevado a cabo por Michael Bitterman, Sevil Sariyildiz, Ozer Ciftcioglu, Irem Erbas y Rudi Stouffs, en la Delft University of Technology (Holanda), se centró en la definición de un marco lógico representar a través del lenguaje el programa de un edificio. Para ello se recurrió a la lógica difusa *–fuzzy logic–*, con la que se puede representar el conocimiento expresado a través del lenguaje común, verbal, subjetivo y cualitativo.<sup>14</sup> Asociada a una red neuronal artificial *–artificial neuronal network–*,<sup>15</sup> la lógica difusa se convierte en un sistema *–neuro-fuzzy tree (NFT)–* capaz de representar un problema multicriterio por medio de un algoritmo árbol, cuyos nudos son neuronas artificiales. Un árbol neuronal se compone de nudos terminales (*input-leaf node*), nudos intermedios (*internal node*) y nudos de salida (*output-root node*), así como de conexiones basadas en diversos pesos o grados de importancia entre los nudos (Figura 36). El grado de importancia entre los nudos (*fuzzification*), es establecido por el proyectista o por medio de métodos de priorización como el *Analytic Hierarchy Process (AHP)*.<sup>16</sup> Cada nudo intermedio es una operación basada en lógica difusa expresada por medio de una función

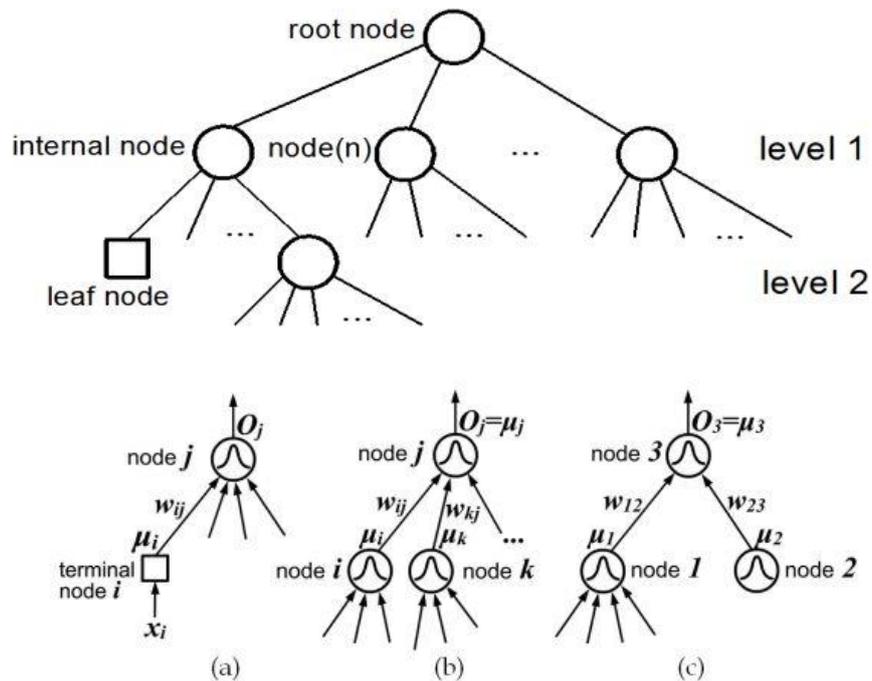
---

<sup>14</sup> La lógica difusa o borrosa *–fuzzy logic–* emplea expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas. Es la lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre el extremo de la verdad absoluta y la falsedad total. La lógica difusa comenzó a ser desarrollada a mediados de 1960 en la Universidad de Berkeley (California) por el ingeniero Lotfali Zadeh, quien sostuvo que el pensamiento humano no opera con números sino con etiquetas lingüísticas (Zadeh, 1965). La lógica difusa modifica dos premisas de la lógica clásica: la premisa del grupo y la premisa de la verdad o falsedad universal. Con respecto a la primera, la lógica clásica establece un límite estricto para un grupo de elementos que comparten las mismas propiedades. La lógica difusa, por el contrario, sostiene que este límite es borroso y que acepta la posibilidad de que haya elementos que compartan las propiedades del grupo en diversos grados. En relación con la segunda premisa, la lógica difusa introduce el valor de la indeterminación. Mientras en la lógica clásica se admiten solamente dos valores (verdadero y falso), en la lógica difusa se amplía el rango de valores a la dependencia del dominio del discurso y a la subjetividad (no verdadero, muy cierto, no muy cierto, más o menos verdadero, más bien cierto, etc.).

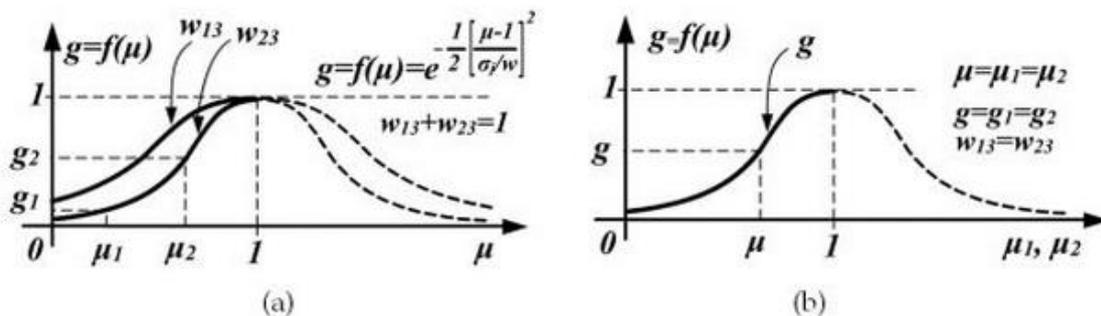
<sup>15</sup> En el campo de la inteligencia artificial, las redes neuronales artificiales *–Artificial Neuronal Networks–* buscan reconstruir la estructura del cerebro y del sistema nervioso, más que el procesamiento simbólico (actividad mental). Asumen la visión biológica según la cual el cerebro no es un procesador de información que sigue unas instrucciones, sino un procesador de señales, es decir, una máquina que compara los patrones de entrada (*input*) con los patrones almacenados, para identificar patrones coincidentes (*output*). Para la biología, el cerebro está constituido de unidades de procesamiento llamadas neuronas: una célula nerviosa que tiene la capacidad de sentir la presencia de un neurotransmisor químico en una de sus terminaciones y de realizar una neurotransmisión química a la otra extremidad. Se considera que en el cerebro humano hay más de 20 billones de células conectadas entre ellas por medio de sinapsis, un estímulo generado por una célula puede generar señales que se amplifican y se distribuyen estimulando a otras células. El recorrido del estímulo y las células que se activan a lo largo del mismo constituyen la base del mecanismo cognitivo. Las redes neuronales artificiales están compuestas de unidades lógicas en lugar de neuronas, y de señales eléctricas en lugar de neurotransmisores químicos. Las unidades lógicas (UTLs), introducidas por McCulloch y Pitts (McCulloch & Pitts, 1943), están formadas por nudos que multiplican la información de entrada (*aj*) por pesos (*wj*) indicando la fuerza de la señal. Si el valor supera el umbral de la activación (*bj*), la señal tiene valor 1, y el valor 0 en caso contrario. Esta forma de procesamiento es distinta a la programación tradicional de una computadora de von Neumann, en la que el algoritmo de reconocimiento de patrones debía ser programado explícitamente.

<sup>16</sup> El método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) o “eigenvector method” es una técnica desarrollada por Thomas Saaty para calcular el vector de prioridad y clasificar la importancia relativa de los factores que se van a comparar. Es una técnica ampliamente usada en el ámbito militar, aunque no se limita a él. De hecho, en su texto *The Analytic Hierarchy Process* (1980), Saaty describe diversas aplicaciones, como la elección de una escuela o la planificación del sistema de transporte (Saaty, 1980).

gaussiana no-lineal (Figura 37). La generación de resultados cuantificables a partir de todas las operaciones contenidas en el árbol se conoce como *defuzzification*. A diferencia de un árbol de decisiones, en el que cada nodo se corresponde con una elección entre diferentes alternativas, cada nodo del árbol neuronal (neurona) representa una operación en base a la lógica difusa que simula la actividad cerebral. Así, el conocimiento del arquitecto/proyectista está representado por la globalidad de una red construida a partir de las relaciones entre los nudos; una red constituye un modelo cognitivo artificial (*knowledge model*).



**Figura 36.** Estructura general de un árbol neuronal y detalle de distintos nudos de conexión. Fuente: (Sariyildiz, Bittermann, & Ciftcioglu, 2008).



**Figura 37.** La operación de los nodos internos (*fuzzy membership function*) es una función de Gauss. Los resultados de la función de Gauss, cuya figura depende de los pesos ( $w_{ij}$ ), se aproximan a una operación de lógica difusa en la que se obtienen valores en el rango de 0-1. Fuente: (Sariyildiz, Bittermann, & Ciftcioglu, 2008).

El árbol neuronal representa un problema multicriterio de manera que pueda resolverse por medio de algoritmos, como el algoritmo genético o evolutivo.<sup>17</sup> Esencialmente el sistema propuesto en este trabajo de investigación puede resumirse en el uso de un algoritmo evolutivo como dispositivo de optimización de diversas propuestas, siendo el árbol neuronal un modelo del conocimiento del arquitecto y también una representación de la función objetivo. De esta forma, la optimización simultánea de los objetivos se logra en base a la importancia relativa entre los objetivos, es decir, en base a las preferencias del proyectista/arquitecto.

### **Implementación**

#### 1) Conjunto de edificios (2011).

Michael Bitterman aplicó el sistema FNT+MOEA para explorar diversas disposiciones espaciales de unos bloques con distintos programas de uso, que se evaluaron en base a los siguientes criterios cuantitativos y cualitativos:

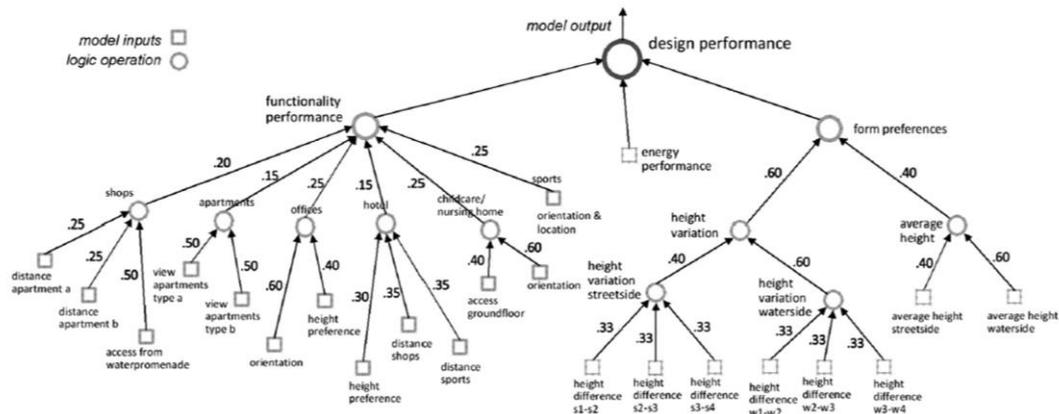
- energéticos: minimizar el consumo energético;
- funcionales: mejorar la accesibilidad de los espacios comerciales; mejorar la vista de los apartamentos; disminuir la distancia del hotel de los espacios comerciales y los equipamientos deportivos; facilitar acceso a la guardería; oficinas (orientación y altura).
- estéticos: disminuir la expresión de predominio/importancia de la forma.

Los bloques se insertaron de manera secuencial: se introdujeron uno a uno siguiendo la dirección norte hasta encontrar un obstáculo (límite del lote u otro bloque previamente insertado); para superarlo, se cambia de dirección hacia el este, hasta encontrar otro obstáculo. Este proceso de distribución de los bloques evita las superposiciones entre ellos,<sup>18</sup> pero no tiene en cuenta la cercanía o la adyacencia entre los bloques de edificios en el momento de insertarlos. Con el fin de superar esta limitación, se usó un árbol neuronal cuyos nudos intermedios representan los criterios evaluativos a tener cuenta, asignando a cada nudo un peso en base a las preferencias del arquitecto (Figura 38).

---

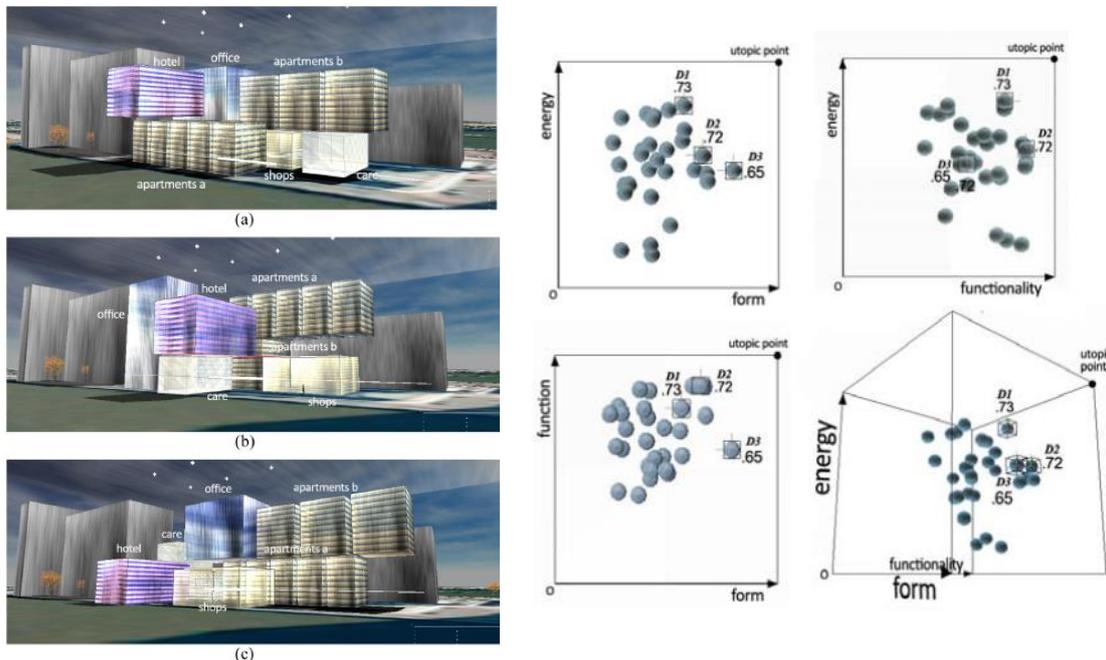
<sup>17</sup> El modelo de conocimiento neuronal basado en la lógica difusa también se emplea para resolver los límites del método de clasificación de soluciones de Pareto. Bittermann demuestra que la clasificación de Pareto solamente puede trabajar de forma simultánea con un número limitado de objetivos (no más de cuatro o cinco). Al aumentar las funciones objetivo, el ranking de Pareto pierde eficacia: ante numerosos objetivos, son pocas las soluciones que dominan a las otras en sentido estricto, por lo tanto, el algoritmo elimina prematuramente soluciones potenciales definiendo una frontera inferior a la esperada. Aunque la cognición y la inteligencia no suelen distinguirse por su naturaleza elusiva, Bittermann busca resolver el límite del método de Pareto introduciendo la agrupación jerárquica de los objetivos y los pesos que determinan la importancia relativa entre ellos mediante la “relajación adaptiva” de la frontera de Pareto - *adaptive relaxation of Pareto front* (Ciftcioglu & Bittermann, 2009). Esencialmente, se trata de un procedimiento matemático para generar fronteras progresivas de soluciones en equilibrio de Pareto.

<sup>18</sup> La organización de los objetos en el plano (dos dimensiones) es conocida en literatura como “*bottom-left two heuristic packing routine*” (Hopper & Turton, 2001).

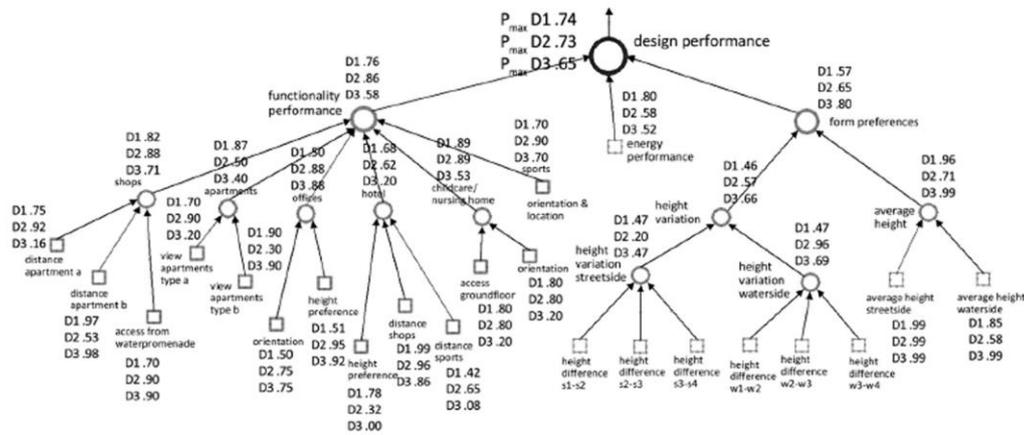


**Figura 38.** La estructura de árbol neuronal se compone de tres partes: criterio funcional, criterio energético y criterio estético. Fuente: (Bittermann, 2011).

A partir del árbol neuronal basado en la lógica difusa, se maximizó el valor de prestación con respecto al nudo raíz identificando la ubicación óptima de los edificios por medio de un algoritmo genético. Tras 16 generaciones del algoritmo genético, se encontraron tres propuestas distintas distribuidas a lo largo de la frontera de Pareto (Figura 39).



**Figura 39.** Propuestas (D1-D2-D3) seleccionadas a lo largo de la frontera de Pareto. Fuente: (Bittermann, 2011).



**Figura 40.** Valores de las propuestas seleccionadas a lo largo de la frontera de Pareto, distribuidos en el árbol neuronal. Fuente: (Bittermann, 2011).

Las soluciones D1 y D2 son muy parecidas en términos de prestación global (D1=0.74; D2=0.73); D3 presenta un valor mucho más bajo (D3=0.65), porque tiene unos valores altos en relación a los criterio cualitativos (preferencia de forma),<sup>19</sup> pero bajos en términos de funcionalidad y comportamiento energético (Figura 40). En particular, la propuesta D3 no facilita una ubicación adecuada para el hotel (0.60), ya que se ubica en la planta baja. Además, en términos energéticos, la solución D3 (0.52), no es deseable ya que propone una serie de bloques muy separados lo que supone mayores pérdidas de carga térmica. Tampoco la propuesta D2 (0.58) favorece la disminución del consumo energético, pero mejora en cambio la funcionalidad (0.86) respecto a las otras propuestas, debido a la posición óptima de las oficinas. De este modo, decidir entre las propuestas D1 y D2, las que tienen unas prestaciones similares en términos globales, depende de la decisión del arquitecto/proyectista quien tiene que elegir entre un valor máximo de prestación energética (D1) o un valor máximo de funcionalidad (D2).

## 2) Rehabilitación de una vivienda unifamiliar existente (2011).

Erbas, Bitterman y Stouffs plantearon el problema de cómo mejorar las prestaciones energéticas de una vivienda unifamiliar teniendo en cuenta diversas opciones de equipamiento energético (bomba de calor, paneles solares) y aislamiento (doble acristalamiento, ventilación natural), así como el confort visual (privacidad, vistas panorámicas), que facilita la fachada acristalada orientada al noreste. Se evaluaron tres propuestas alternativas:

- opción 1: cambio de orientación hacia el suroeste;
- opción 2 (opción de renovación): ventana de triple acristalamiento; mejora de la estanqueidad; elementos de protección solar adicionales en el exterior;

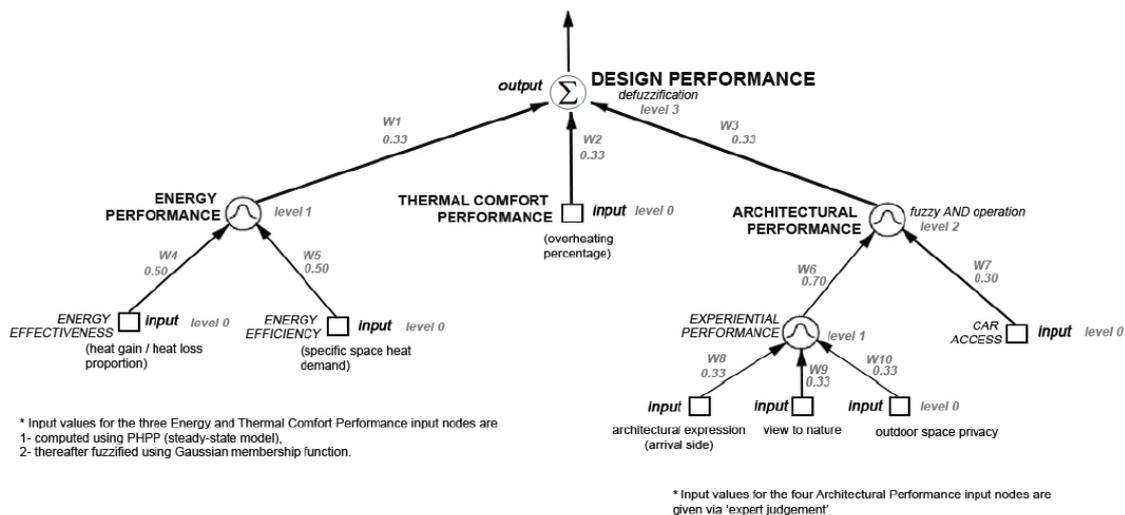
<sup>19</sup> Así es como Bitterman describe este proceso de evaluación: “For instance concerning the requirements on average height of the building the decision maker prefers to have a low average height along the street side to give the building a less dominant expression when perceived by people walking along the waterfront” (Bittermann, 2011, pág. 301).

- opción 3: cambio de orientación hacia el suroeste; ventana de triple acristalamiento; mejora de la estanqueidad; elementos de protección solar adicionales en el exterior (patio); mejora del aislamiento del muro; porche en la fachada suroeste.

El programa se organizó por medio de un árbol neuronal cuyos nudos representan criterios cuantitativos y cualitativos (Figura 41):

- energéticos: minimización del consumo energético (diminución de la demanda de calefacción y proporción entre pérdidas y ganancias térmicas);
- térmicos: reducción de sobrecalentamiento;
- psicológicos y funcionales: facilitar vistas a la naturaleza y privacidad; mejorar la accesibilidad.

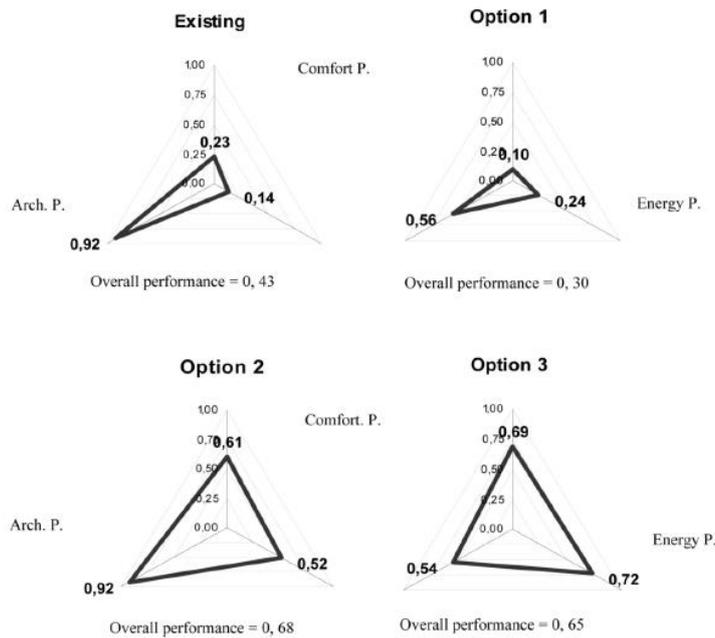
A cada criterio de optimización se le otorgó un grado de importancia. Por ejemplo, el valor asignado a la demanda de calefacción con respecto al consumo energético es de 0.5, por lo que tiene el mismo peso de la proporción entre pérdidas y ganancias térmicas. Asimismo, y en un nivel superior, se definió el grado de importancia, o *fuzzification*, de los diversos criterios respecto a la prestación global (W1 = W2 = W3 = 1/3).



**Figura 41.** Estructura de árbol neuronal. La prestación global del edificio se entiende como término medio de los tres aspectos de las prestaciones considerados (W1=W2=W3=1/3): criterio energético (W1), criterio de confort térmico (W2) y criterio arquitectónico (W3). Fuente: (Erbas, Bittermann, & Stouffs, 2011).

Una vez realizado el cálculo energético del edificio y las diversas propuestas alternativas por medio de la herramienta PHPP (*Passive House Planning Package*), se introdujeron los resultados dentro de la estructura de árbol neuronal (*input*) y se ejecutaron las funciones de los nudos intermedios y finales. Los resultados de este proceso son los valores de las prestaciones que se representaron en una serie de gráficos para poder compararlos (Figura 42). De estos resultados se dedujo que la opción 2 mejoraba

la prestación global, mientras que la opción 3 lo hacía con las prestaciones energéticas. Esta información sirvió para decidir entre las diversas propuestas planteadas.



**Figura 42.** Valores de prestaciones de las cuatro propuestas representados por medio de gráficos para poder efectuar una comparación y evaluación. Fuente: (Erbas, Bittermann, & Stouffs, 2011).

### 3.2 Conclusiones

En este capítulo se han presentado una serie de ejemplos representativos de sistemas generativos basados en prestaciones desarrollados para ser aplicados en el ámbito de la arquitectura. En general, los sistemas estudiados se adhieren a los principios del DBP, ya que exploran varias soluciones a partir de la información sobre el rendimiento del edificio, apoyando el proceso de toma de decisiones en una base factual. Estos sistemas, además, afrontan el programa de necesidades desde un punto de vista holístico, considerando simultáneamente los diversos objetivos a cumplir.

Los sistemas generativos centrados en el comportamiento estructural permiten explorar estructuras alternativas que cumplen con requisitos específicos. Los sistemas eifForm (Shea, 2000) y PMB (Menges, 2011) permiten generar formas complejas y estructuralmente resistentes partiendo de una estructura básica (cúpula geodésica). La aplicación de estos sistemas, sin embargo, se limita a cierto tipo de estructuras, como cubiertas, pabellones y hangares, que pueden soportar su propio peso, pero no otras cargas. Asimismo, emplean un solo material o combinan el mismo elemento constructivo para generar la forma. Una vez generada una solución, es necesario un análisis posterior más detallado para verificar las cargas de viento y nieve. Voxel (Bollinger y Grohmann, 2009) es otro sistema generativo que permite explorar la distribución de espacios con volumetrías simples. A diferencia de la práctica común basada en apilar plantas iguales o parecidas para definir un edificio en altura, este sistema permite crear plantas distintas de

acuerdo con el programa de uso. Su aplicación se limita a un sistema constructivo específico (sistema constructivo tradicional de losas y muros de corte). Sin embargo, el resultado de Voxel es un esquema que no tiene en cuenta las características constructivas de los componentes, como el espesor de los muros. Por ello, para garantizar la viabilidad constructiva de una propuesta generada por el sistema, se necesita llevar a cabo un cálculo estructural más detallado.

Los sistemas generativos centrados en las prestaciones térmicas y lumínicas, GenPod (Grobman, 2008), CDO tool (Shea, 2006) DEXEN (Janssen, 2009), permiten determinar algunas características de la envolvente de un edificio considerando varios criterios a la vez. GenPod se ha aplicado para definir la compacidad de la envolvente teniendo en cuenta el confort térmico, el programa de usos, confort visual y la economía. La envolvente que se genera optimiza la demanda energética del edificio, pero omite el porcentaje de oberturas, que es un parámetro fundamental para determinar las prestaciones energéticas, globalmente. CDO y DEXEN permiten definir una envolvente a partir de la combinación de componentes de distintos materiales, con el objetivo de garantizar el confort lumínico y térmico, teniendo en cuenta también los costes económicos. Sin embargo, el resultado de la aplicación de este sistema es un esquema abstracto, en los que no se incluyen elementos arquitectónicos como puertas, ventanas u otros componentes básicos de la envolvente de un edificio.

Los sistemas generativos basados en prestaciones energéticas, GDS (Caldas, 1999), GENE-ARCH (Caldas, 2006) y FNT+MOEA (Bitterman, 2008), permiten valorar alternativas encaminadas a reducir el consumo energético. Con GDS se optimiza el diseño de la fachada de un edificio variando la dimensión y la proporción de las ventanas, con el fin de reducir el consumo energético. Con el mismo propósito, GENE-ARCH se aplica para definir la compacidad de un edificio. FNT+MOEA permite asignar diversas funciones a bloques distribuidos en un área determinada. En este proceso se tienen en cuenta factores psicológicos (vistas, privacidad) para garantizar la privacidad sin limitar la vista abierta al paisaje. Estos tres sistemas, sin embargo, no tienen en cuenta el material de la envolvente, que es un parámetro esencial a tener cuenta en la reducción de la demanda energética del edificio.

De este análisis se deduce que todos los sistemas considerados pueden servir para cuantificar el impacto de algunas decisiones sobre el comportamiento físico del edificio, y también para sugerir alternativas. Estos sistemas permiten tomar decisiones sobre la base de una mayor información en las primeras etapas del proyecto. Sin embargo, obvian la dimensión temporal en el desarrollo de un proyecto a través de sus diferentes fases (anteproyecto, proyecto básico y proyecto de ejecución), en las que se avanza desde una visión esquemática del edificio, a otra cada vez más detallada. A lo largo estas fases es difícil mantener la congruencia de las decisiones, ya que la evaluación de las prestaciones en una etapa avanzada del proyecto puede llevar a cuestionar las decisiones que se tomaron en unas fases previas. El proceso de proyecto, por tanto, no es lineal. Esto implica que para implementar el DBP es preciso emplear varios sistemas o herramientas de simulación que se adecúen al nivel de representación del edificio o el tipo de información que se maneja en cada etapa del proyecto. Para implementar el DBP, por tanto, se requiere

de una estrategia para seleccionar las herramientas de simulación más adecuadas en cada proyecto, y para integrarlas en el proceso de proyecto.

Más allá de recurrir a diversas herramientas de simulación durante proyecto, el DBP requiere definir explícita y globalmente sus objetivos, y actualizarlos constantemente a lo largo del desarrollo del mismo. Los sistemas aquí expuestos permiten elegir entre varias propuestas que se comparan entre ellas en base a unos criterios cuantitativos, los cuales han sido previamente definidos con palabras o mediante indicadores. En este proceso, la simulación proporciona los datos para poder elegir una propuesta que cumpla con los criterios cuantitativos. Sin embargo, en el campo de la eficiencia energética no es suficiente con decidir la propuesta “mejor” entre las que se ha planteado en el proyecto. Para evaluar la eficiencia energética de una propuesta es necesario medir sus prestaciones y compararlas con las prestaciones de edificios que hayan demostrado ser energéticamente eficientes. Por tanto, los valores de referencia (*benchmarks*) obtenidos de edificios que han sido reconocidos como energéticamente eficientes son esenciales para definir los objetivos específicos de un proyecto. Acceder a esta información no es tarea fácil. Hay que cruzar datos que provienen de las certificaciones energéticas, de la monitorización del consumo real y de la simulación energética, que se encuentran dispersos en diversos repositorios de datos.

En el capítulo siguiente se muestra, por medio de un caso de estudio, como el DBP puede mejorar la eficiencia energética de los edificios adoptando unas estrategias basadas en la integración de diversas herramientas de simulación energética a lo largo del proyecto. Asimismo, este caso de estudio incluye el sistema de información energética SEÍS (*Semantic Energy Information System*) – desarrollado por el grupo de investigación ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle– que permite acceder a información sobre edificios que destacan por su eficiencia energética; información que está distribuida en diversas fuentes de datos, y que puede servir de referencia (*benchmarks*) para un proyecto.

### Bibliografía

- Baron, P., Fischer, R., Mill, F., Sherlock, A., & Tuson, A. (1998). A voxel-based representation for the evolutionary shape optimization of a simplified beam: A case-study of a problem-centred approach to generic operator design. In R. Roy, P. Chawdhry, & R. Pant, *Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing* (pp. 251-258). London: Springer .
- Baron, P., Fischer, R., Tuson, A., & Mill, F. (1999). A voxel-based representation for evolutionary shape optimization. *Artificial Intelligence for Engineering, Design, Analysis and Manufacturing*, 13(3), 145-156.
- Bittermann, M. (2011). Sustainable Conceptual Building Design using a Cognitive System. In P. Leclercq, A. Heylinghen, & G. Martin (Ed.), *Proceedings of the 14th International conference on Computer Aided Architectural Design* (pp. 297-313). CAAD Futures. Liege: Les Éditions de l'Université de Liège.
- Bollinger, K., Grohmann, M., & Tessmann, O. (2010). Structured Becoming. Evolutionary Processes in Design Engineering. (R. Oxman, & R. Oxman, Eds.) *Architectural Design: The New Structuralism*, 80(4), 34-39.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, T. (1999). *From Natural to Artificial Swarm Intelligence*. New York: Oxford University Press.

- Caldas, L. (2001). *An Evolution-Based Generative Design System: Using Adaptation to Shape Architectural Form*. (Ph.D. dissertation). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Caldas, L. (2005). Three-Dimensional Shape Generation of Low-Energy Architectural Solutions using Pareto Genetic Algorithms. *Proceedings of the 23rd International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe* (pp. 647-654). eCAADe. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa.
- Caldas, L. (2006). Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE\_ARCH: An evolution-based generative design system. In I. Smith, *Intelligent Computing in Engineering and Architecture* (pp. 109-118). Berlin: Springer.
- Caldas, L., & Norford, L. (1999). A Genetic Algorithm Tool for design Optimization. *Media and Design Process: Proceedings of the 21st Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture* (pp. 260-271). ACADIA. Snowbird: University of Utah.
- Caldas, L., & Norford, L. (2001). Architectural constraints in a generative design system: interpreting energy consumption levels. In R. Lamberts, C. Negrao, & J. Hensen (Ed.), *Proceedings of the 7th International Conference of the International Building Performance Simulation Association* (pp. 1397-1404). IBPSA. Rio de Janeiro: Station College.
- Caldas, L., & Norford, L. (2004). Shape Generation Using Pareto Genetic Algorithms: Integrating Conflicting Design Objectives in Low-Energy Architecture. *International Journal of Architectural Computing*, 1(4), 503-515.
- Capeluto, G., & Shaviv, E. (1997). Modeling the design of urban grids and fabric with solar right considerations. *Proceedings of the 4th International Solar Energy Society World Congress*, (pp. 148-160). ISES. Taejon (Korea).
- Ciftcioglu, Ö., & Bittermann, M. (2009). Adaptive Formation of Pareto Front in Evolutionary Multi-objective Optimization. In W. P. Santos, *Evolutionary Computation* (pp. 417-444). Viena: InTech.
- Dorigo, M., Di Caro, G., & Gambardella, L. (1999). Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, 5(2), 137-172.
- Erbas, I., Bittermann, M., & Stouffs, R. (2011). Use of a Knowledge Model for Integrated Performance Evaluation for Housing (Re)Design Towards Environmental Sustainability : A Case Study. In P. Leclercq, A. Heylinghen, & G. Martin (Ed.), *Proceedings of the 14th International conference on Computer Aided Architectural Design* (pp. 281-295). CAAD Futures. Liege: Les Éditions de l'Université de Liège.
- Fleischmann, M., & Menges, A. (2012). Physics-Based Modeling as an Alternative Approach to Geometrical Constrain-Modeling for the Design of Elastically-Deformable Material Systems. *Proceedings of the 30th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe* (pp. 565-575). eCAADe. Praga: Czech Technical University.
- Fleischmann, M., Lienhard, J., & Menges, A. (2011). Computational Design Synthesis. Embedding Material Behaviour in Generative Computational Processes. *Proceedings of the 29th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe* (pp. 759-767). eCAADe. Ljubljana: University of Ljubljana.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley Publishing Company.
- Grobman, Y. (2008). *Building the DigitalWorld: Architectural Design Methods Based on the Use of Digital Tools-Performance-Based Form, Generation and Optimization*. (Ph.D Dissertation). Technion Israel Institute of Technology, Haifa.
- Grobman, Y., Yezioro, A., & Capeluto, I. (2007). Performance Based Form-generation in Architectural Design – Using Performance Envelopes in a Generative Computer-Oriented Design Method. *Proceedings of Tectonics Making Meaning International Conference* (pp. 39-50). Eindhoven: Eindhoven University of Technology.

- Hensel, M., Menges, A., & Weinstock, M. (2006). *Architectural Design: Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, 76(2).
- Hopper, E., & Turton, B. (2001). An empirical investigation of meta-heuristic and heuristic algorithms for a 2D packing problem. *European Journal of Operational Research*(128), 34-57.
- Ishida, R., & Sugiyama, I. (1995). Proposal of constructive algorithm and discrete shape design of the strongest column. *AIAA Journal*, 33(3), 401-406.
- Kaushik, V. S., & Janssen, P. (2012). Multi-criteria Evolutionary Optimisation of Building Envelopes during Conceptual Stages of Design. *Proceedings of the 17th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, (pp. 497–506). CAADRIA. Honk Kong.
- Kolarevic, B. (2003). Computing the Performative in Architecture. *Proceedings of the 21th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe* (pp. 457-464). eCAADe. Graz: Graz University of Technology.
- Leidi, M., & Schlüter, A. (2013). Exploring Urban Space, Volumetric Site Analysis for Conceptual Design in the Urban Context. *International Journal of Architectural Computing*, 11(2), 158-182.
- Leuppi, J., & Shea, K. (2008). The Hylomorphic Project. *The Arup Journal*(1), 28-30.
- Luebkehan, C., & Shea, K. (2005). CDO: Computational Design+Optimization in Building Practice. *The Arup Journal*(3), 17-21.
- McCulloch, W., & Pitts, W. (1943). A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 115-133.
- Oxman, R. (2006). Theory and Design in the First Digital Age. *Design Studies*, 27, 229-265.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw Hill International.
- Sariyildiz, S., Bittermann, M., & Ciftcioglu, O. (2008). Performance-based Pareto Optimal Design. *Proceedings of the 7th International Symposium on Tools and Methods for Concurrent Engineering*, (pp. 1005-1020). TMCE. Izmir (Turkey).
- Shea, K. (2004). Directed Randomness. In N. Leach, D. Turnbull, & C. Williams, *Digital Tectonics* (pp. 89-101). London: Wiley Academy.
- Shea, K., & Cagan, J. (1997). Innovative Dome Design: Applying Geodesic Patterns with Shape Annealing. *Artificial Intelligence for Engineering, Design, Analysis and Manufacturing*, 11(5), 379-394.
- Shea, K., Sedgwick, A., & Antonunnto, G. (2006). Multicriteria Optimization of Paneled Building Envelopes Using Ant Colony Optimization. *Proceedings of the 22nd European Group for Intelligent Computing in Engineering* , (pp. 627–636). EG-ICE. Ascona (Switzerland).
- Sprecher, A., Ahrens, C., & Neuman, E. (2006). The Hylomorphic Project. *Proceedings of the 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*, (pp. 536-537). ACADIA. Louisville (Kentucky).
- Wang, B., & Chen, J. (1996). Application of genetic algorithm for the support location optimization of beams. *Computer and Structures*, 58(4), 797-800.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338–353.

## Capítulo 4

# **CASO DE ESTUDIO**

ESTRATEGIA PROYECTUALES PARA  
MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN  
EDIFICIO DE VIVIENDA EN Cerdanyola del  
Vallès



## Introducción

En los capítulos precedentes se han analizado los límites y las posibilidades de la aplicación del DBP en el proyecto de arquitectura. Esta metodología puede ser una respuesta a la necesidad de proyectar edificios que cumplan con unas funcionalidades, sin olvidar sus cualidades estéticas y espaciales. En el capítulo anterior se han presentado una serie de proyectos, en los que se han aplicado metodologías compatibles con los principios del DBP. Del análisis de estos proyectos, se ha concluido que las herramientas que emplean son útiles para abarcar la complejidad (visión holística) del edificio. Sin embargo, en estos sistemas no se ha tenido en cuenta que el proceso de proyecto no es lineal sino cíclico e iterativo. Las decisiones tomadas en una etapa de desarrollo del proyecto determinan su definición en las siguientes, de manera que la evaluación de las prestaciones en una etapa ulterior puede llevar a cuestionar las que se tomaron en las fases previas. El DBP, por tanto, comprende un proceso de toma de decisiones que abarca todas y cada una de las etapas del proyecto, que se lleva a cabo con las herramientas susceptibles de ser aplicadas en cada una de ellas.

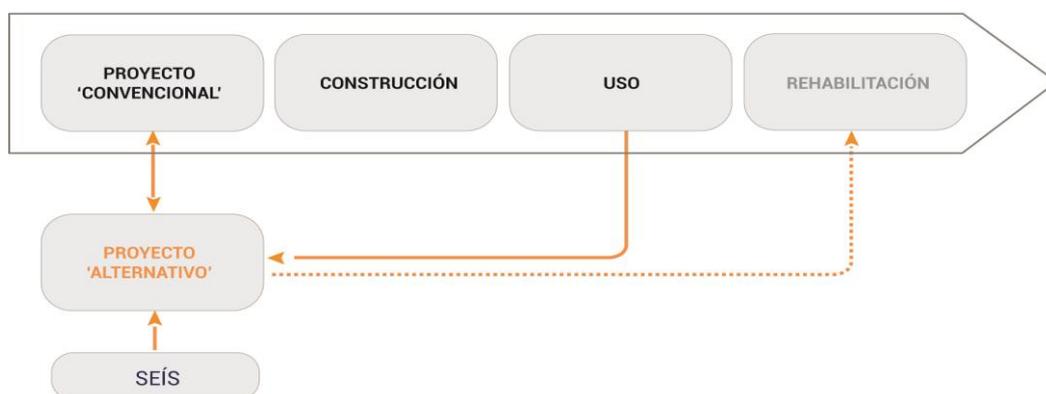
El objetivo de este capítulo final es demostrar por medio de un caso de estudio que el DBP puede contribuir a mejorar el proyecto de edificios energéticamente eficientes. Con este propósito, se ha tomado como caso de estudio un edificio de viviendas sociales construido en Cerdanyola del Vallès, en la provincia de Barcelona. Se ha analizado en primer lugar el proceso de toma de decisiones seguido por el equipo que realizó el proyecto, para a continuación plantear un proceso alternativo siguiendo la metodología del DBP, en el que esta investigadora asumió el papel de “equipo técnico”. Para llevar a cabo el estudio, ha sido necesario seleccionar una serie de herramientas de simulación energética, para aplicarlas en las distintas fases de desarrollo del proyecto. A partir de la comparación de los dos procesos de proyecto, el convencional y el alternativo, se ha podido confirmar que una estrategia proyectual basada en el DBP permite proyectar edificios energéticamente más eficientes.

Sin embargo, las dificultades para la implementación del DBP en el proyecto de edificios energéticamente eficientes no se limitan a la integración de múltiples herramientas de simulación. Es necesario además cuantificar los requisitos de las prestaciones utilizando como referencia edificios que hayan demostrado ser energéticamente eficientes. Además, hay que asegurar que los datos obtenidos de la simulación sean fiables. En el caso de estudio, el valor de referencia de la demanda energética fue proporcionado por el promotor del proyecto, y se recurrió a los datos de monitorización de las viviendas en uso para verificar la fiabilidad de las simulaciones. En el caso del proyecto de un nuevo edificio, la cuestión que se plantea es cómo obtener la información necesaria para determinar las prestaciones energéticas. Actualmente los datos sobre el comportamiento energético de los edificios son cada vez más accesibles, aunque se encuentran dispersos en fuentes de datos diversas y en formatos también variados. Esta situación dificulta considerablemente la tarea de extraer valores de referencia para un proyecto. El sistema de información SEÍS (*Semantic Energy Information System*) – desarrollado por el grupo de investigación ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle– emplea las tecnologías de la red semántica para integrar datos

energéticos de diferentes ámbitos (simulación, certificación, monitorización, etc.), con el fin de proporcionar información cualificada a diversos agentes (arquitectos e ingenieros, consultores energéticos, administraciones públicas a cargo de certificados energéticos, propietarios de edificios y gestores de instalaciones) para ayudarles a mejorar la toma de decisiones en sus respectivas áreas de actuación, desde el proyecto hasta la construcción y rehabilitación. En la fase de proyecto de un edificio, SEÍS ofrece la posibilidad de obtener valores de referencia (*benchmarks*) para definir los objetivos específicos de un proyecto, así como para verificar la coherencia de los datos obtenidos de la simulación.

SEÍS se aplicó en el proceso de proyecto reproducido en el caso de estudio. Los resultados de las simulaciones energéticas realizadas durante el proceso de proyecto recreado en el caso de estudio se introdujeron en este sistema. De esta forma, las prestaciones de un proyecto candidato a cumplir con el objetivo de reducir la demanda energética pudieron compararse con los valores de rendimiento obtenidos de la monitorización de edificios similares. En base a esta comparación, se extrapolaron unos valores de referencia con el fin de evaluar el rendimiento de una propuesta y para verificar la coherencia de los datos obtenidos de la simulación. Asimismo, pudieron extrapolarse indicaciones específicas sobre algunos aspectos de una solución, como la compacidad o la transmitancia media de la envolvente, que podían mejorarse para alcanzar los más altos niveles de rendimiento.

En este capítulo se describe el proceso seguido en el caso de estudio (Figura 1). Primero, se expone el proceso de toma de decisiones que llevó a la construcción del edificio, denominado proyecto “convencional”. A continuación, se describe el proyecto “alternativo” mediante el DBP utilizando diversas herramientas de simulación energética. Se analizan los datos recogidos de la monitorización del edificio en uso, y se comparan con los resultados obtenidos de la simulación energética realizada durante el proceso de proyecto alternativo. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos en los dos procesos de proyecto. La comparación pone en evidencia algunas limitaciones del DBP en el proyecto de edificios energéticamente eficientes, que se propone superar por medio de la aplicación del sistema de información energética SEÍS.



**Figura 1.** Proceso desarrollado en el caso de estudio. Fuente: Gráfico de elaboración propia.

#### 4.1 El proceso de proyecto convencional

El edificio de viviendas de protección oficial (VPO) construido en Cerdanyola del Vallès, fue proyectado para cumplir con los estándares más altos de eficiencia energética. Su realización fue financiada parcialmente por POLYCITY, un proyecto europeo llevado a cabo en el marco del programa CONCERTO, destinado a promover la construcción de edificios pilotos energéticamente eficientes. POLYCITY ofreció el apoyo técnico y financiero para que el suministro energético de este edificio pudiera provenir de fuentes renovables (por ejemplo, unidades de cogeneración de biomasa y de gas, colectores solares para generación de agua caliente sanitaria), fijando un valor límite para la demanda de calefacción en 43 kWh/m<sup>2</sup>.<sup>1</sup> Además, POLYCITY facilitó la monitorización de los consumos energéticos del edificio durante su primer año de funcionamiento para poder evaluar la efectividad de las medidas aplicadas. En los tres años siguientes, el seguimiento de los consumos del edificio fue llevado a cabo por el Grupo de Bioclimatismo y Eficiencia Energética (BEE Group) de CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería), gracias al proyecto europeo eSESH (*Saving Energy in Social Housing with ICT*).

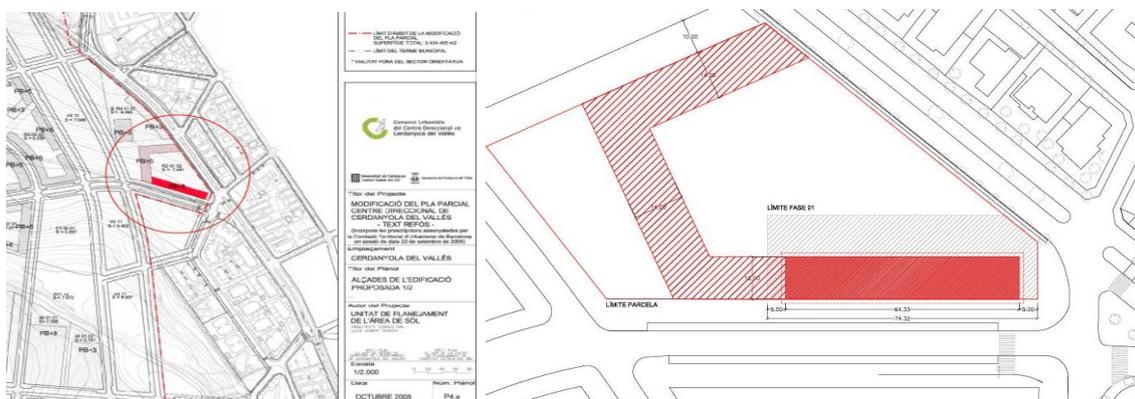
<b>Proyecto</b>	
Cliente/Promotor	INCASOL (Institut Català del Sol); POLYCITY (CONCERTO).
<b>Actores del proyecto</b>	
Arquitectos Constructora Consultoría energética Monitorización	Fidela Frutos y Josep Maria Sanmartin. CRC Obras i Servicios Grupo de Energética Universidad de Málaga (GEUMA) Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).
<b>Condiciones medioambientales</b>	
Localización Clima Sitio	Altitud: 84m; Latitud: 41°29'28" N; Longitud: 2° 8' 23" E Zona Climática: C2- Temperatura media: 15° C Zona de expansión.
<b>Normativa urbanística</b>	
A.R.M. (Altura reguladora máxima) Emplazamiento	3PT+PB=13,5m Planta Baja:2,8m; Planta-Tipo: 2,6m; Planta Sótano: 2,5 m Perímetro máximo: 12x64,33m
<b>Programa de uso</b>	
Planta baja (PB) Planta Tipo (PT) Planta sótano (PS) Circulación Superficie útil vivienda	Uso comercial. Uso residencial. Uso aparcamiento. Dos núcleos de ascensores y escaleras. 70m <sup>2</sup>
<b>Presupuesto</b>	
	3.170.000€

<sup>1</sup> En el ámbito del proyecto POLYCITY-CONCERTO se investigó el parque de edificios construido en Cerdanyola del Vallés para definir unos valores de referencia de eficiencia energética para edificios residenciales. Cruzando los datos de consumo teórico proporcionado por el Institut Català d'Energia (ICAEN) y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), así como datos reales facilitados por el Servei d'Anàlisi i Planificació Energètica (SAPE) y datos de la demanda energética adquiridos con las certificaciones energéticas (ICAEN), se extrapolo un valor máximo para la demanda de calefacción del edificio (43 kWh/m<sup>2</sup>), que supondría un ahorro de aproximadamente 20 toneladas anuales de CO<sub>2</sub> y del 20% del consumo de gas para calefacción respecto de otros edificios (Martí, Pedrals, & Reol, 2005).

El edificio es un bloque rectangular que ocupa la superficie máxima permitida (64 m. x 12m.), cuyas fachadas principales están orientadas al norte y el sur (Figura 2). El edificio se compone de cuatro plantas sobre rasante (Figura 3): el sótano se destina al aparcamiento, la planta baja a uso comercial y las tres plantas superiores a uso residencial. En base al programa de necesidades definido por uno de los promotores (INCASOL), el edificio consta de 24 viviendas con una superficie útil mínima de 70 m<sup>2</sup>, cada una de ellas con 3 habitaciones que pueden alojar hasta cinco personas. La circulación vertical se organiza con dos núcleos de escaleras y ascensor. El edificio está equipado con un sistema centralizado de calefacción de gas, pero no tiene sistema de aire acondicionado.



**Figura 2.** Edificio construido en Cerdanyola del Vallès. Fachadas orientadas al norte (izquierda) y el sur (derecha). Fuente: Google Maps Street View.



**Figura 3.** Normativa urbanística para el emplazamiento del edificio. El edificio constituye la primera fase de un programa de urbanización que prevé la construcción de una manzana abierta. Fuente: Consorci Urbanístic del Centre Direccional de Cerdanyola del Vallès (2005).

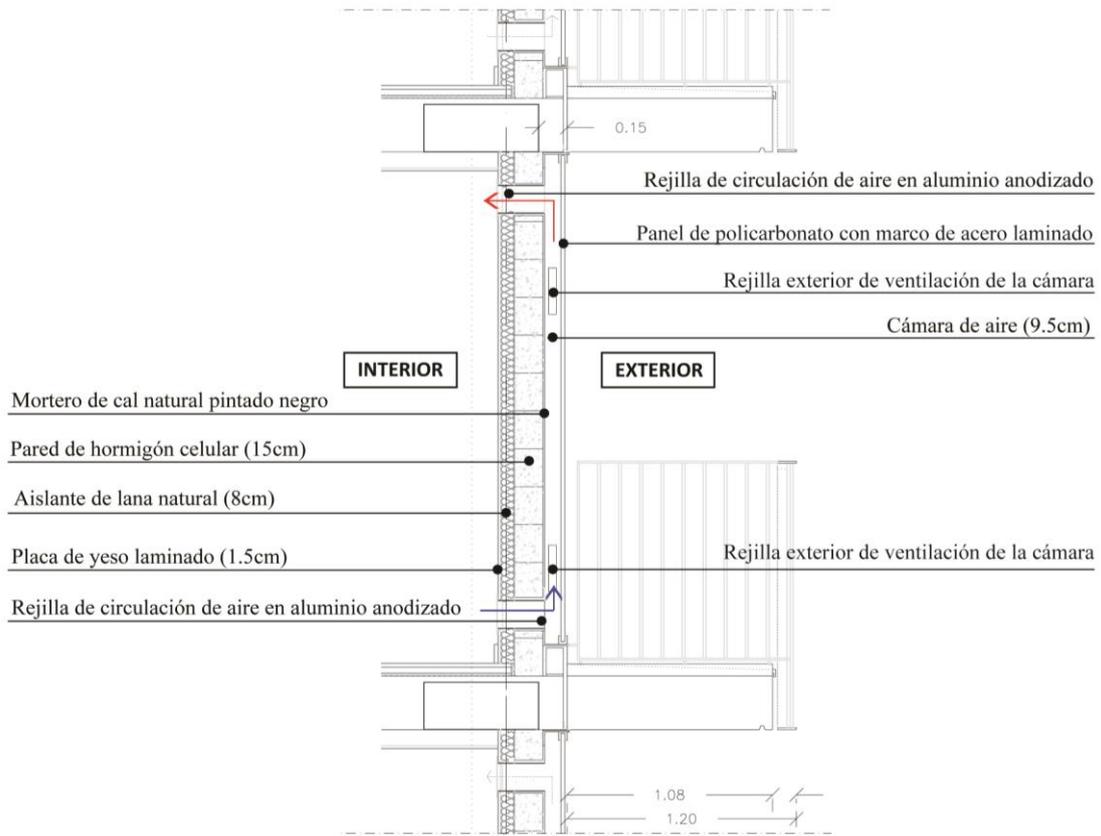
El proceso que se siguió para proyectar el edificio se analizó a partir de la información facilitada por los arquitectos, Fidela Frutos y Josep Maria Sanmartin. La conclusión del análisis fue que los proyectistas habían llevado a cabo un proceso de proyecto “convencional”, en el que las decisiones se habían basado exclusivamente en su conocimiento y experiencia personal, sin estar avaladas por los resultados obtenidos con herramientas de simulación energética. A raíz de una entrevista con los arquitectos (véase entrevista al final de la sección) se pudo deducir que las decisiones preliminares tuvieron en cuenta principios básicos de arquitectura bioclimática, como la orientación de las viviendas hacia el sur: una vivienda rectangular (vivienda R) orientada al sur, y otra vivienda con forma de L (vivienda L) parcialmente expuestas al sur (Figura 4). Asimismo

se diferenció el tratamiento de las fachadas, adoptando en la fachada expuesta al sur una solución técnico-constructiva que los arquitectos habían empleado en proyectos anteriores, como el muro Trombe<sup>2</sup> (Figura 5, Figura 6 y Figura 7). La simulación energética se usó en la fase final del proyecto para verificar el cumplimiento de las prestaciones requeridas por los promotores. Los arquitectos no emplearon la simulación en las primeras fases del proceso de proyecto, puesto que es un trabajo que no suele contemplarse en los honorarios. Además, según sus palabras textuales, “no hay tiempo para experimentar”, ya que el tiempo que se disponía para llevar a cabo el proyecto era muy limitado. En definitiva, el tiempo y los costes fueron las principales limitaciones que impidieron al equipo integrar la simulación energética en el proceso de proyecto.



**Figura 4.** Arriba: fachada del edificio expuesta al sur. Abajo: planta tipo del edificio (vivienda L y vivienda R). Fuente: Elaboración propia a partir de dibujos de Fidela Frutos y Josep Maria Sanmartin (Frutos & Sanmartin, 2012).

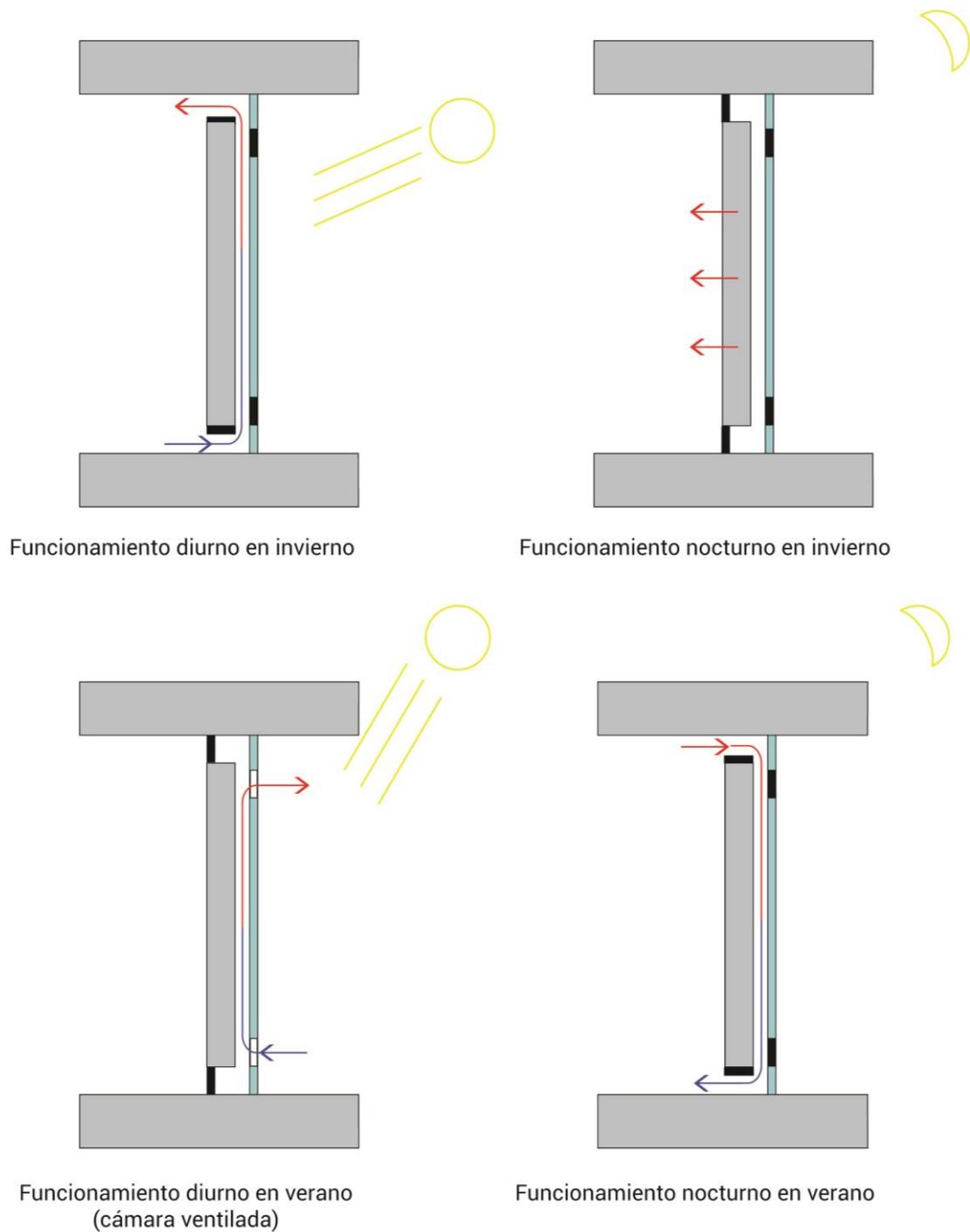
<sup>2</sup> En el Documento Básico Ahorro de Energía (DB-HE) del Código Técnico de la Edificación (CTE) se define el muro Trombe o muro solar ventilado en estos términos: “*Cerramiento que aprovecha la energía solar para el calentamiento por recirculación del aire interior del edificio. Generalmente está formado por una hoja interior de fábrica, una cámara de aire y un acristalamiento exterior. La circulación del aire puede ser natural (termosifón) o forzada*” (Ministerio de la Vivienda, 2006, pág. 24). El muro Trombe es un sistema pasivo de recolección de energía solar de forma indirecta. Se puede utilizar para el calentamiento interno de viviendas por medio de la transferencia de calor, ya sea por conducción, convección y/o radiación. Este sistema es construido con materiales que pueden acumular calor bajo el efecto de masa térmica, combinado con un espacio de aire y una lámina de vidrio: el vidrio genera el efecto invernadero, impidiendo que la radiación retorne al exterior una vez captada; la cámara de aire estanca aporta resistencia térmica a la fachada ( $0,18 \text{ m}^2\text{k/W}$ ) y el acumulador es una pared interior de gran espesor y densidad (materiales de alta capacidad calorífica, alta conductividad y transmisión térmicas). Básicamente, se trata de un sistema indirecto, ya que la captación se realiza a través de un elemento dispuesto entre un vidrio y el interior de la vivienda, y de un sistema pasivo, ya que no utiliza elementos mecánicos en su funcionamiento. El muro Trombe fue aplicado por primera vez en 1964 por el ingeniero Felix Trömbe y el arquitecto Jacques Michel en el Centre National de la Recherche Scientifique (C.N.R.S.), en Odellio (Francia). Edward Morse lo había patentado en el año 1881.



**Figura 5.** Características técnicas de la fachada expuesta al sur: muro captador o muro Trombe. Fuente: Elaboración propia a partir de dibujos de Fidela Frutos y Josep Maria Sanmartin.



**Figura 6.** Fotos del muro Trombe. Fuente: <https://ecobiohabitat.com>



**Figura 7.** Funcionamiento del muro Trombe. Invierno: durante el día se aprovecha la radiación solar para calentar el aire de la cámara e introducirlo en el local; durante la noche se aprovecha el calor que ha acumulado el muro durante el día (inercia térmica). Verano: durante el día se evita la acumulación de calor abriendo las rejillas exteriores (cámara ventilada); durante la noche, se abren las rejillas interiores para que pueda refrescarse el aire interior de la vivienda (*free-cooling*). Fuente: Gráficos de elaboración propia.

**Entrevista a los arquitectos del edificio de viviendas construido en Cerdanyola del Vallès-Barcelona, 18/10/2011**

**Fidela Frutos y Josep Maria Sanmartin.**

Miembros fundadores del grupo Arquitectura y Sostenibilidad (AUS, 2005) del Col.legi d'Arquitectes de Catalunya (COAC), han llevado a cabo numerosos cursos, jornadas y publicaciones relacionados con la sostenibilidad en la arquitectura.

**¿Podéis describir cómo se ha llegado a la configuración actual del edificio? ¿Cómo se han tomado las decisiones principales?**

En todos nuestros proyectos las decisiones son el fruto de la experiencia personal y del conocimiento adquirido a lo largo del tiempo. Sin embargo, cada proyecto es un caso específico, en el que la información necesaria para la toma de decisiones no se da de forma apriorística, más bien se va generando durante el mismo proceso de proyecto. Además, muchas decisiones son el resultado de la negociación con el cliente y el promotor. En el caso del edificio de Cerdanyola del Vallés, insistimos desde el principio en algunas ideas contundentes, indiscutibles, para asegurar un buen resultado. El objetivo era diseñar un edificio que cumpliera con unos valores prestablecidos de eficiencia energética. Por esta razón, propusimos el uso del muro captador, un tipo específico de aislamiento, y que todas las viviendas estuviesen orientadas al sur, así como también que los espacios comunes tuviesen iluminación y ventilación natural. Para otros requisitos del proyecto se llegó a un acuerdo con el promotor. El balcón es un ejemplo de esta negociación. La normativa fijaba un porcentaje de balcón por cada fachada del edificio, pero propusimos eliminar completamente el balcón de la fachada norte, para aumentar la dimensión del balcón de la fachada sur. El promotor aceptó la propuesta de un balcón corrido en la fachada sur, pero nosotros tuvimos que renunciar a la idea de una fachada curvilínea en dirección este y oeste. La forma curvilínea, según el promotor, no se adaptaba a un usuario "estándar".

**¿En qué fase del proceso de proyecto se decidió la distribución de las viviendas? ¿Qué aspecto prevaleció en esta decisión?**

El principal objetivo de nuestros proyectos es la reducción de la demanda energética del edificio. El arquitecto es responsable del comportamiento energético del edificio, y la demanda energética depende de sus decisiones de proyecto. En el caso del edificio construido en Cerdanyola del Vallés, se estudió desde el principio la posibilidad de que todas las viviendas estuvieran orientadas al sur. Esto nos llevó a plantear dos tipos de viviendas (R y L), que tienen una superficie similar y están parcialmente expuestas al sur. No hubo otra opción. Por ejemplo, no pudimos planificar viviendas rectangulares expuestas al norte y al sur con un reparto más uniforme del consumo, ya que la normativa no permitía pasarelas exteriores a lo largo de la fachada norte.

**En la fase en la que se tomó la decisión sobre la distribución de las viviendas, ¿se realizaron simulaciones energéticas? ¿Hubieran influido sus resultados en la decisión?**

En el momento en que se decidió la distribución de las viviendas no había datos de simulación energética disponibles. Pero esto no supuso un problema: el arquitecto proyecta espacios, no se ocupa de “números”. La eficiencia energética siempre se relaciona con el confort y la calidad de vida. Así, la escalera del edificio se pensó en términos de calidad de vida: es ancha, con iluminación y ventilación natural. Las ventanas del edificio se pensaron teniendo en cuenta sobre todo la orientación, no solo para mejorar la climatización, también para abrir la vista hacia el paisaje. La ventana no es solamente un mecanismo técnico, también espacial. Desde nuestro punto de vista, la calidad espacial coincide con la eficiencia energética: si un espacio funciona bien en términos energéticos, es un espacio comfortable.

**¿Se utilizaron herramientas de simulación energética para ayudar en la toma de decisiones durante el proyecto?**

Las decisiones relacionadas con la eficiencia energética se tomaron en base a nuestro conocimiento y experiencia profesional (llevamos en el sector de la eficiencia energética 16 años). Se construyó un modelo energético solamente en una fase muy avanzada de desarrollo del proyecto, cuando todas las decisiones más importantes ya se habían tomado. Sin embargo, nunca tuvimos la sensación de llevarnos una sorpresa mientras se estaba realizando el cálculo energético. De hecho, la simulación sirvió para afinar algunos detalles, como el porcentaje de las oberturas en fachada, más que para cambiar el proyecto globalmente.

**¿Más allá de verificar el proyecto definitivo, se usó la simulación energética para explorar propuestas alternativas?**

No. Se recurrió al cálculo energético solamente en una fase muy avanzada del proceso de proyecto para verificar el cumplimiento con el código técnico. La simulación energética con el fin de explorar alternativas es un trabajo que no tiene compensación económica: frente a un cliente privado o una constructora, representa un gasto imposible de justificar; en el caso de un organismo público, el plazo de entregas es tan ajustado que no hay tiempo para experimentar.

**Supongamos que el edificio en su fase de uso no respondiera al comportamiento energético esperado. En el caso hipotético de tener a disposición los datos del edificio en su fase de uso y de poder modificar algunas decisiones tomadas durante el proyecto: ¿qué datos relacionados con las prestaciones del edificio consideran más importantes o necesarios para la fase inicial y final del proyecto (demanda de calefacción del edificio o de cada vivienda, temperaturas interiores, etc.)? ¿Y en qué tipo de decisiones influiría esta información (distribución de las viviendas, accesos, componentes de la fachada, etc.)?**

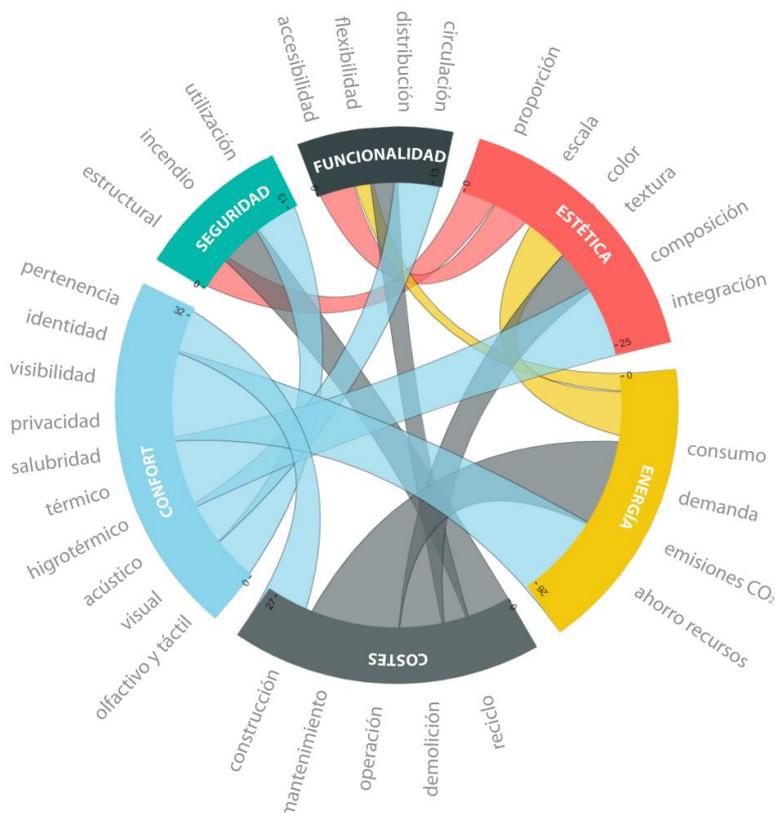
La distribución de las viviendas del edificio de Cerdanyola del Vallés representa la mejor solución dentro de los límites impuestos por una normativa muy estricta. Se optó por el muro captador desde principio del proceso de proyecto. Esta solución evita una excesiva mecanización: la gente está poco en casa, cierra las persianas y por medio del muro captador se obtiene un 17% de aportación de energía, gratuita. Aunque los datos de monitorización del edificio indicasen un bajo porcentaje en la mejora del confort interno, no hubiésemos sustituido el muro captador por otra solución técnica. Nuestra experiencia nos ha permitido comprobar que esta solución “funciona” para este tipo de clima. Así, el muro captador es una solución técnica que se ha convertido también en una solución estética: el muro captador es el “ADN” de nuestros proyectos.

**Más allá de la especificidad del proceso de proyecto del edificio de viviendas de Cerdanyola del Vallés, ¿qué tipo de datos consideran más importantes/interesantes para la fase inicial del proceso de proyecto?**

En general, es preferible tener datos específicos del comportamiento energético de los materiales, como la transmitancia, más que confiar en soluciones técnicas predefinidas por catálogo. Sería útil un repositorio de datos de materiales certificados y con fichas técnicas que explique tanto las características generales, como sus posibles aplicaciones (por ejemplo, que especifique si los materiales se siguen comportando de acuerdo con la normativa también en las juntas, donde generalmente se producen puentes térmicos). También sería útil una guía para proyectar teniendo en cuenta la sostenibilidad, una especie de código técnico, que diga lo que se puede hacer y lo que no. La información sobre este tema es abundante y está mal organizada; una guía podría ser una solución a la especulación o la falta de conocimiento respecto a este tema.

## 4.2 El proceso de proyecto alternativo que implementa el DBP

El proceso de “proyecto convencional” que llevó a la realización del edificio se recreó para implementar la metodología del diseño basado en prestaciones, en el que esta investigadora asumió el papel de un equipo técnico que utiliza la simulación energética para predecir el impacto de las decisiones de proyecto en la prestación energética del edificio. En este “proyecto alternativo” se empleó la simulación energética para verificar los niveles que alcanza un diseño en los diversos indicadores energéticos –demanda, consumo, emisiones de CO<sub>2</sub> –además del conocimiento del arquitecto para decidir sobre sus aspectos funcionales, estéticos y socio-culturales (Figura 8). Sin embargo, para implementar esta metodología fue necesario plantear una estrategia proyectual que permitiese integrar diversas herramientas de simulación a lo largo del proceso de proyecto. De hecho, en cada etapa del proyecto hubo que tratar por separado determinados aspectos del edificio sobre los que debían tomarse decisiones, para lo que se requerían herramientas de simulación adecuadas al nivel de definición del proyecto en cada etapa. Por ello, se fijaron unos criterios de selección de las herramientas de simulación a emplear en las distintas fases. Finalmente, los datos de la simulación obtenidos durante el proceso se contrastaron con los datos monitorizados del edificio en uso, de manera que se pudieron corroborar las decisiones tomadas en base a estos datos.



**Figura 8.** Interrelación entre los criterios que intervienen en el proceso de decisiones sobre la forma y espacios de un edificio. Fuente: Gráfico de elaboración propia.

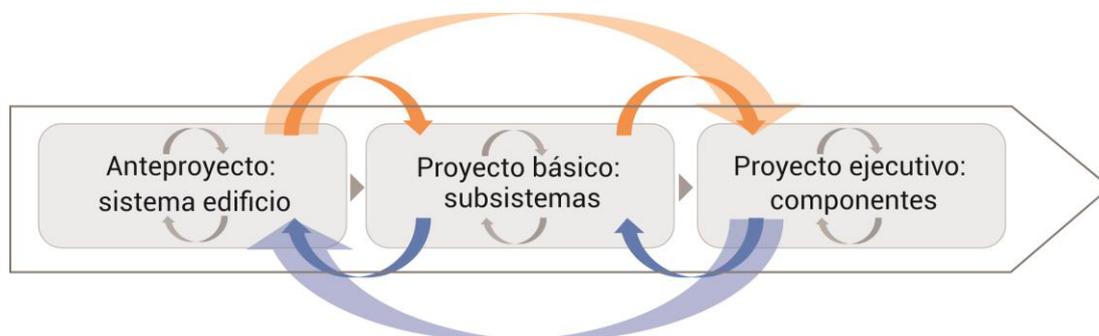
### 4.2.1 Estrategias para integrar herramientas de simulación en el proyecto

Desde el punto de vista energético, un edificio se concibe como el conjunto en el que las interacciones entre sus elementos (espacios y componentes constructivos) determinan el comportamiento energético global; el edificio es, desde este punto de vista, un “sistema energético”. Las herramientas de simulación energética representan el edificio como un sistema para así determinar los intercambios de energía dentro del edificio, y entre éste y su entorno. Por ello, estas herramientas necesitan información para crear un modelo del sistema, incluyendo información sobre el entorno que influye en el comportamiento del edificio, como el clima y emplazamiento. Sin embargo, en el marco de un proceso de proyecto, el edificio se va definiendo a lo largo de diversas etapas (anteproyecto, proyecto básico, proyecto ejecutivo), por las que se pasa de una visión esquemática del edificio, a otra cada vez más detallada. En cada etapa, el modelo del sistema energético depende de la información disponible:

- Anteproyecto: sistema edificio. En esta fase inicial del proceso se define la geometría (orientación, volumen, superficies y forma); las características de la envolvente (superficie y porcentaje de huecos); y los equipamientos de instalaciones (tipo de sistemas de calefacción, clima y agua caliente sanitaria; tipos de energía y fuentes renovables).
- Proyecto básico: subsistemas del edificio. En esta fase el edificio está lo suficientemente definido como para entenderlo como un conjunto de subsistemas relacionados: el subsistema geométrico (sistema de circulación y distribución de los espacios interiores); el subsistema envolvente (relación entre huecos y elementos de protección solar); el subsistema instalaciones (localización, distribución y definición de las instalaciones de calefacción, clima y sistemas pasivos).
- Proyecto ejecutivo: componentes de los subsistemas. En esta fase final del desarrollo del proyecto se dispone de información precisa sobre los componentes de la envolvente térmica (elementos y materiales, sistema constructivo); los componentes de las instalaciones (rendimiento del generador de calor y frío, como caldera, termoeléctrico, placa solar, bomba de calor, etc.; las características de los elementos terminales, como radiadores, fancoils, suelo radiante, etc.; las dimensiones de elementos de acumulación, como depósitos de agua caliente, depósitos de combustible, termoeléctrico, silos de biomasa, etc.; y las dimensiones de elementos de conducción o distribución, como tuberías, bomba de recirculación, grupo de presión, etc.).

Básicamente, la estrategia adoptada en el proyecto alternativo se ha basado en considerar el proceso de proyecto como un flujo de información continuo estructurado en etapas y marcado por puntos de discontinuidad que corresponden a saltos en la definición de un edificio. A lo largo de este proceso, el edificio pasa de ser considerado como un sistema para ser entendido como un conjunto de subsistemas y componentes. Sin embargo, un proyecto arquitectónico no es un proceso lineal, sino de marcha atrás y

adelante.<sup>3</sup> Por ejemplo, en las etapas iniciales pueden tenerse ya en cuenta los materiales y componentes que determinarán la forma de un edificio (*feed-forward*). Asimismo, las decisiones tomadas en las fases iniciales pueden estar sujetas a revisión en base a la información que se produce en etapas posteriores (*feed-back*). Por medio de estos saltos y reconsideraciones, una idea inicial abstracta, indeterminada e imprecisa del edificio se va concretando cada vez más a lo largo del proceso de proyecto (Figura 9).



**Figura 9.** Dimensión temporal del proyecto: progresión lineal del proceso de proyecto y progresión iterativa del proceso de toma de decisiones. Fuente: Gráfico de elaboración propia.

Este planteamiento del edificio como sistema/subsistemas/componentes permite establecer unos criterios para elegir herramientas de simulación energética BEM (*Building Energy Modelling*) adecuadas a cada etapa del proceso de proyecto: la idoneidad de una herramienta depende de los datos que requiere para el cálculo, las características del modelo de cálculo y el tipo de datos que proporciona (inteligibilidad de los resultados, precisión y tiempos de cálculo).<sup>4</sup> Por ejemplo, en las fases iniciales del proyecto, se requieren herramientas de análisis simplificadas, ya que hay un escaso conocimiento sobre la forma definitiva que adoptará el edificio; en las fases avanzadas, el edificio está mucho más definido, por lo que tiene sentido utilizar herramientas de cálculo más precisas. Otro criterio que se ha tenido en cuenta en la selección de las herramientas es la interoperabilidad entre ellas y la compatibilidad con los modelos BIM (*Building Information Modelling*), que se han utilizado para el intercambio de información a lo largo de las etapas del proceso de proyecto. Por medio de estos criterios (Tabla 1) el equipo técnico del proyecto pudo seleccionar y asociar herramientas de simulación específicas a cada etapa del proyecto.

<sup>3</sup> Cross sostiene que la toma de decisiones en el proceso de diseño no es lineal ni jerárquica: “*Designers think about the overall concept and at the same time think about detailed aspects of the implementation of that concept. [...] Although there is a hierarchical structure of decisions, from overall concept to detail, designing is not a strictly hierarchical process; in early stages of design, the designer moves freely between different levels of detail*” (Cross, 2006, pág. 37).

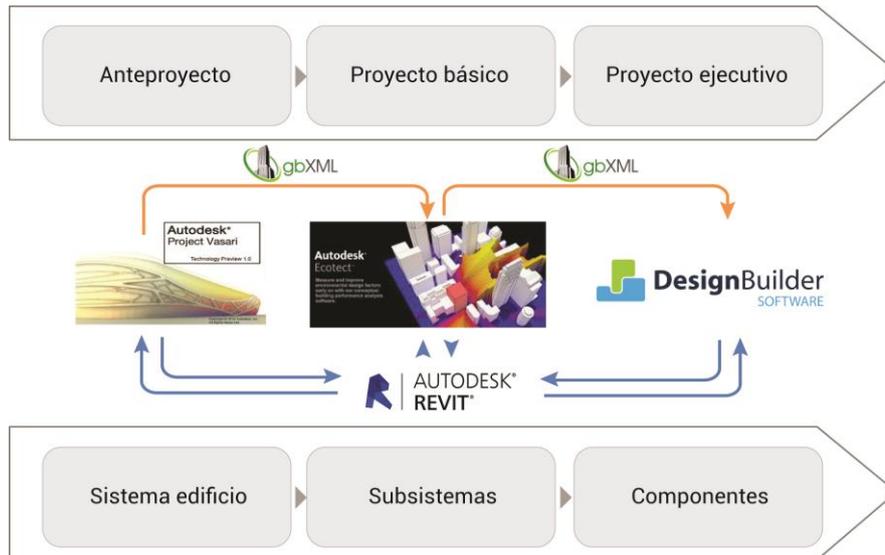
<sup>4</sup> Los criterios para la selección de herramientas de simulación energéticas han sido extrapolados de estudios previos (Weytjens, Verdonck, & Verbeeck, 2009; Attia, Beltrán, De Herde, & Hensen, 2009; Attia, Hensen, Beltrán, & De Herde, 2011; Weytjens, Attia, Verbeeck, & de Herde, 2012).

Criterios de selección de herramientas de simulación energética		
<b>Interoperabilidad entre herramientas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Formato de exportación/importación (.gbXML)</li> </ul>
<b>Idoneidad de las herramientas a las etapas del proyecto</b>	Entrada de datos ( <i>input</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Usabilidad (<i>usability</i>).</li> <li>▪ Personalización (<i>customization</i>).</li> </ul>
	Características del modelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flexibilidad (<i>flexibility</i>).</li> </ul>
	Salida de datos ( <i>output</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Comprensibilidad (<i>understandability</i>).</li> <li>▪ Precisión (<i>accuracy</i>).</li> <li>▪ Tiempos de cálculo (<i>calculation time</i>).</li> </ul>

**Tabla 1.** Criterios de selección de herramientas de simulación energética.

Tras un análisis de las herramientas de simulación energética existentes (Crawley, 2005) (DOE, 2013), se seleccionaron tres herramientas que podían intercambiar información a través de la importación/exportación de datos de un modelo BIM utilizando el formato .gbXML (Figura 10): Autodesk Vasari (DOE 2.2), Autodesk Ecotect (CIBSE Admittance Method) y DesignBuilder (EnergyPlus).<sup>5</sup> Estas herramientas presentan muchas diferencias en sus motores de cálculo, datos de entrada requeridos y resultados. Cada una de estas herramientas se ha utilizado en una etapa específica del proceso de proyecto en función de sus capacidades: en la fase de anteproyecto se ha empleado Vasari porque es sencillo y rápido de usar, además de no requerir mucha información para el cálculo y mostrar los resultados de forma visual; Ecotect se ha aplicado en la fase de proyecto básico porque permite obtener datos cuantitativos de manera rápida; y DesignBuilder se ha usado en la fase de proyecto ejecutivo, ya que requiere información más detallada del modelo y es asimismo más preciso en los cálculos energéticos. Los modelos paramétricos creado con Autodesk Revit (BIM), se han analizado con Vasari, y después se han exportado a Ecotect y DesignBuilder (.gbXML). En Vasari se empleó una plantilla predeterminada y genérica, con la que se generaron automáticamente las zonas térmicas para el cálculo; en Ecotect se especificaron por separado las propiedades de muros y ventanas, y las de las viviendas (zonas térmicas); y en DesignBuilder se definieron más detalladamente las capas de la envolvente. Este planteamiento ha permitido reducir costes y tiempos derivados de la realización de modelos diferenciados para el análisis energético del edificio en cada etapa del proyecto.

<sup>5</sup> La creación de un modelo energético con cualquiera de estas herramientas puede realizarse mediante la introducción manual de las características geométricas del edificio o mediante la importación de archivo .gbXML (Green Building Studio) exportado del modelo BIM. Este formato se ha desarrollado específicamente para transferir los datos almacenados en un modelo BIM a herramientas de análisis energético; contiene información sobre áreas y zonas para calcular las prestaciones térmicas.

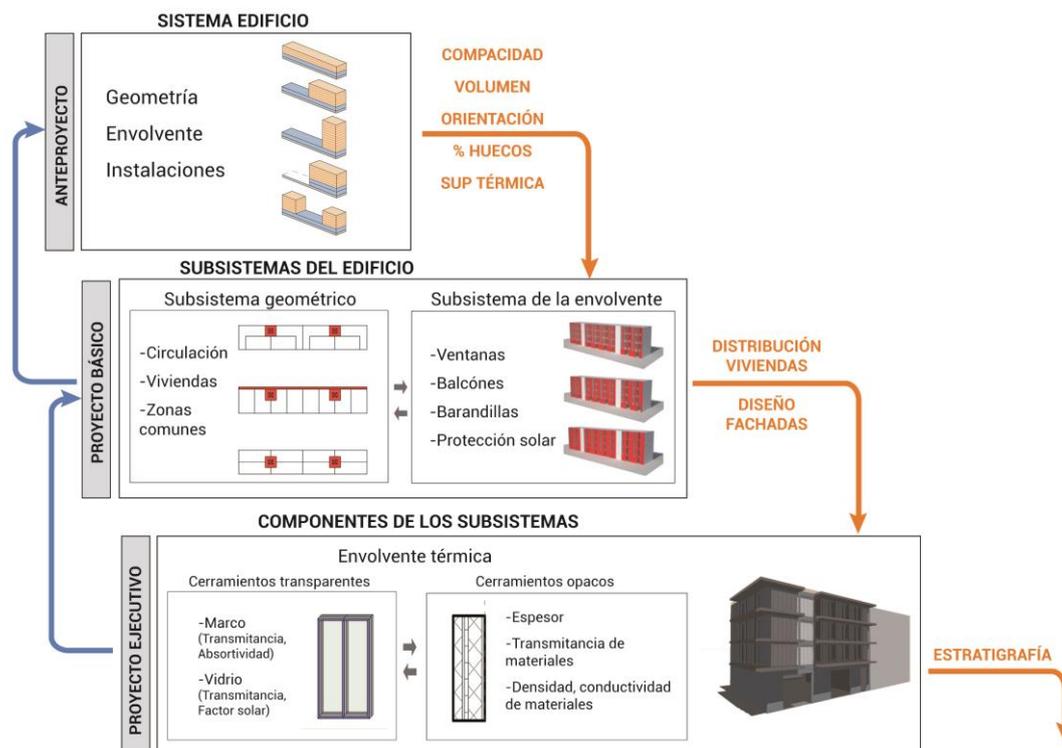


**Figura 10.** Interoperabilidad e idoneidad de Vasari, Ecotect y DesignBuilder a lo largo del proyecto (*Revit-based BIM workflow*). Fuente: Gráfico de elaboración propia.

#### 4.2.2 Implementación de las estrategias de integración de herramientas de simulación

Para cada etapa del proceso de proyecto recreado, se exploraron variantes del proyecto original, que se evaluaron con diversos indicadores de rendimiento (demanda energética y consumo energético, emisiones de CO<sub>2</sub>, confort térmico, etc.), priorizando la demanda energética del edificio. No se tomaron en consideración las instalaciones y los equipos mecánicos, ya que no influyen en la demanda del edificio. En cada etapa del proceso se utilizó una herramienta de simulación energética adecuada a la información que se tiene del edificio en cada fase, para tomar decisiones sobre la forma (anteproyecto), la distribución y la composición de la fachada (proyecto básico), los materiales y los componentes de la envolvente térmica (proyecto ejecutivo) (Figura 11). En el proceso de toma de decisiones se tuvieron en cuenta también criterios estéticos (proporción del edificio y composición de la fachada) y socio-culturales (identidad, sentido de pertenencia y costumbres del usuario), además de criterios de confort visual (iluminación y vistas).

A continuación, se describe cada etapa del proceso de proyecto alternativo, atendiendo a la descripción del proceso mismo y la utilización de las herramientas de simulación. En la descripción del proceso de proyecto se incluyen los objetivos específicos en relación a la etapa del proyecto; la implementación de la simulación energética; los resultados obtenidos en la simulación y cómo estos han sido interpretados para tomar decisiones, reproduciendo el razonamiento seguido y explicando los motivos por los que una propuesta de diseño puede ser mejor que otra atendiendo a múltiples criterios (energéticos, estéticos o socioculturales). La discusión sobre la utilización de las herramientas de simulación se centra en valorar la interoperabilidad entre herramientas, y las ventajas y desventajas de utilizar cada herramienta en la fase del proyecto en la que se ha aplicado.



**Figura 11.** Implementación de la estrategia proyectual. Fuente: Gráfico de elaboración propia.

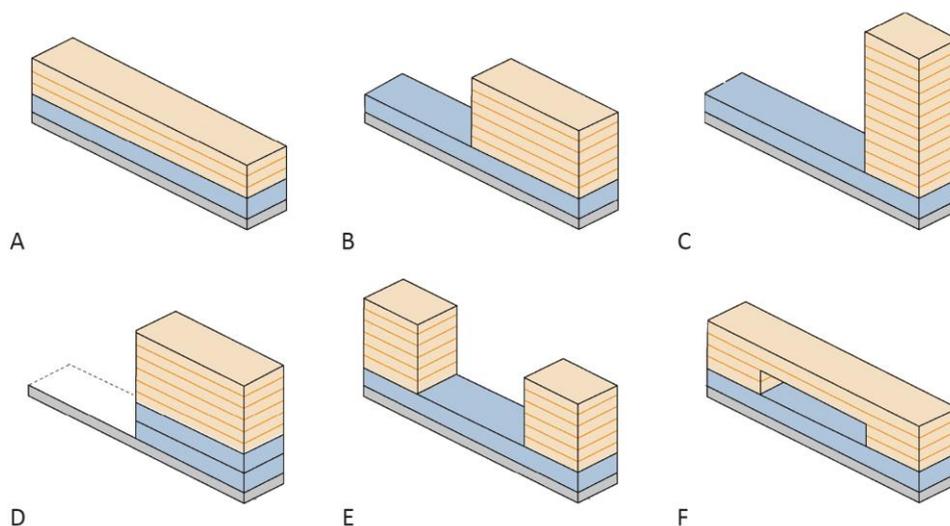
#### 4.2.2.1 Anteproyecto: sistema edificio

Durante la fase inicial del proyecto se tomaron decisiones sobre la geometría del edificio (orientación, forma, volumen y superficies) y la envolvente (superficie, orientación prevalente y porcentaje de oberturas). En el proceso de proyecto original, las decisiones sobre la geometría del edificio estuvieron determinadas por una normativa sumamente estricta. Sin embargo, en el proceso que se reproduce en este caso de estudio no se tuvieron en cuenta todas las restricciones de la normativa, con el fin de explorar otras propuestas alternativas. Así, se mantuvo el objetivo de mejorar la demanda energética del edificio ( $43 \text{ kWh/m}^2$ ), se respetaron los requisitos del programa funcional (24 viviendas) y la normativa urbanística (volumen, superficie máxima de ocupación y edificabilidad), pero no se respetaron los límites de altura y número de plantas del edificio. Esto permitió explorar una amplia gama de variantes del proyecto original (opción A): formas con diferentes valores de superficie de la envolvente térmica, compacidad y factor de forma (Figura 12 y Figura 13).<sup>6</sup>

<sup>6</sup> En el Documento Básico Ahorro de Energía (DB-HE) del Código Técnico de la Edificación (CTE) se distingue entre la envolvente edificatoria, aquella que se compone de todos los cerramientos del edificio, y la envolvente térmica que se compone de los cerramientos del edificio que separan los recintos habitables del ambiente exterior. La envolvente térmica permite regular la temperatura interna del edificio. La compacidad y el factor de forma son dos coeficientes introducidos para cuantificar la relación entre la forma de un edificio y su capacidad de intercambiar flujos térmicos con el entorno. La EN 15217 que se basa en el estándar CEN (*European Committee for Standardization*) para la implementación de la Directiva EPBD 2010/31/UE sobre certificación energética, define la compacidad como la relación de la superficie de la envolvente térmica sobre el



**Figura 12.** Ejemplos de bloques de viviendas: A) Dosmaunos Arquitectos, Madrid (2008); B) Ravnikar Potokar Arhitekturni, Nova Gorica (2007); C) Arons en Gelauff Architecten, Groninga (2003); D) PZP Arch., Bucarest (2005); E) Solana & Catalan, Bucarest (2007); F) MVRDV, Madrid (2005). Fuente: Páginas web de los autores de los proyectos.

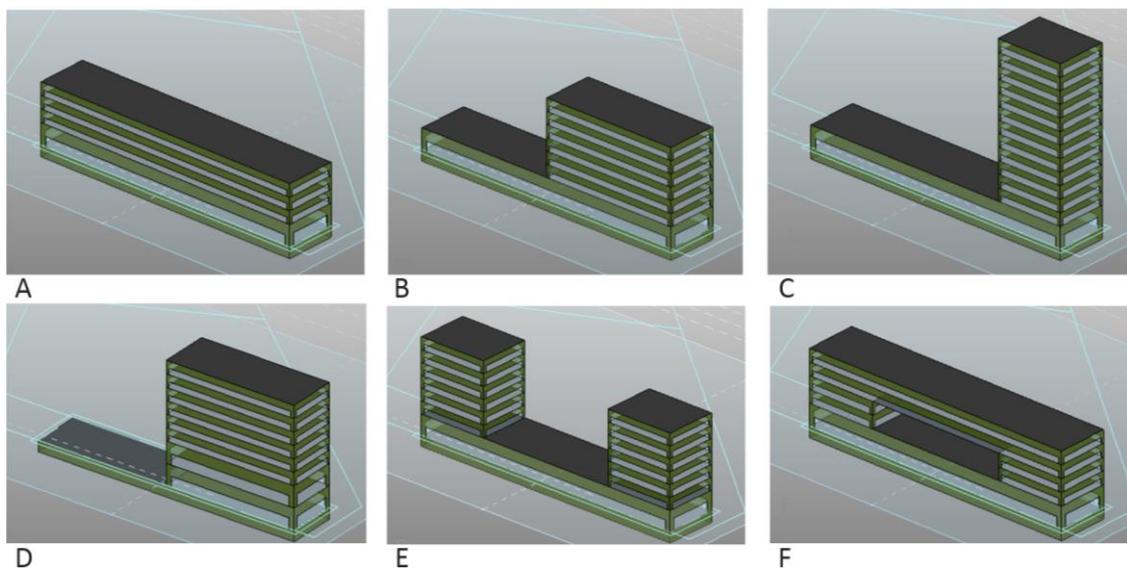


**Figura 13.** Diversas variantes volumétricas que conservan inalterado el valor de la superficie útil y del volumen, pero varían en el valor de la compacidad: A) Bloque compacto; B) Bloque sobre una base; C) Torres sobre una base; D) Torre compacta; E) Doble torre sobre una base; F) Bloque-puente. Fuente: Elaboración propia.

Opción	Superficie (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Envolvente (m <sup>2</sup> )	Compacidad (m <sup>2</sup> / m <sup>3</sup> )	Factor de forma
A	3072	10368	3588	<b>0.34</b>	<b>0.29</b>
B	3072	10368	3796,8	<b>0.36</b>	<b>0.31</b>
C	3072	10368	4214,4	<b>0.40</b>	<b>0.35</b>
D	3072	10368	3912	<b>0.37</b>	<b>0.32</b>
E	3072	10368	4214,4	<b>0.40</b>	<b>0.35</b>
F	3072	10368	4124	<b>0.39</b>	<b>0.34</b>

volumen acondicionado ( $c = AE / VC$ ), mientras que el factor forma es la relación de la envolvente térmica sobre la superficie acondicionada ( $f = AE / AC$ ) (CEN, 2007).

**Análisis de variantes de la compacidad del edificio.** Para decidir sobre la compacidad del edificio entre las diversas alternativas posibles, se calcularon las prestaciones asociadas a ellas por medio de la simulación energética, usando Autodesk Vasari. Con esta herramienta se creó un modelo paramétrico vinculado al motor de cálculo energético DOE 2.2 –suficientemente flexible, rápido y consistente –, que se empleó para modelar las diversas propuestas y calcular su rendimiento energético. El modelo geométrico se convirtió en un modelo energético mediante la división en zonas térmicas, un proceso que se llevó a cabo de manera automática para mejorar la precisión del cálculo (Figura 14). A pesar de que en esta etapa inicial del proceso de proyecto no se dispone de información detallada sobre la configuración que tomará la forma, se necesita igualmente definir los materiales para el cálculo energético. Autodesk Vasari permite seleccionar un sistema constructivo genérico apropiado para la zona climática de proyecto y asociarlo a unos valores unitarios de transmitancia. De esta forma, aunque los materiales o los sistemas constructivos no se consideraron como una variable en esta etapa del proyecto, se usó una plantilla predeterminada para realizar el cálculo (Tabla 2).



**Figura 14.** Modelo energético de las diversas propuestas realizado con Autodesk Vasari, por medio de la compartimentación en zonas térmicas recomendada por ASHRAE 90.1. Fuente: Elaboración propia.

Características del modelo energético	
MUROS Construcción ligera con aislamiento típico de climas templados	R: 1.73 m <sup>2</sup> K /W
PAREDES INTERIORES Construcción ligera sin aislamiento	R: 0.49 m <sup>2</sup> K /W
CUBIERTA Techo oscuro con aislamiento típico	R: 3.87 m <sup>2</sup> K /W
SUELOS Construcción ligera con aislamiento típico	R: 3.67 m <sup>2</sup> K /W
LOSA Construcción masiva sin aislamiento	R: 1.08 m <sup>2</sup> K /W
ACRISTALAMIENTO Doble cristal claro	U: 3.17 W/m <sup>2</sup> K

**Tabla 2.** Características del modelo energético (resistencia térmica y transmitancia de materiales) y configuración para el cálculo energético (motor de cálculo DOE 2.2).

Los resultados del cálculo energético realizado con Vasari proporcionaron al equipo de proyecto alternativo datos cuantitativos sobre el consumo energético (EUI)<sup>7</sup> y las emisiones de CO<sub>2</sub> (Figura 15). Comparando los valores resultantes obtenidos al variar la compacidad del edificio, pudo confirmarse que la propuesta A reducía sustancialmente el consumo energético del edificio y su impacto medioambiental (Figura 16). Además, el cálculo realizado con Vasari proporcionó información sobre la demanda energética del edificio<sup>8</sup> (Figura 17). De la comparación de los resultados obtenidos con el cálculo de las diversas opciones, resultó que la variante A producía menos pérdidas y ganancias térmicas (Figura 18), siendo las ganancias superiores a las pérdidas. De este análisis se concluyó que esta opción presentaba una menor demanda energética de calefacción y refrigeración, acercándose a un estado de equilibrio del balance térmico.

<sup>7</sup> EUI (*Energy Use Intensity*) es el indicador de la energía consumida por el edificio en un año respecto a su superficie útil total, que se calcula convirtiendo todas las fuentes de energía (KWh, J, etc.) en kBtu (*thousand British thermal units*). EUI es un indicador que se emplea especialmente en los Estados Unidos para comparar el consumo energético de edificios de distintos tamaños.

<sup>8</sup> Los gráficos de cargas de calefacción y refrigeración de Vasari –*Monthly Heating/Cooling Loads*– no sirven para calcular la potencia necesaria para dimensionar los sistemas mecánicos a fin de mantener condiciones interiores de confort térmico. Vasari entiende por carga térmica la energía necesaria para contrastar las pérdidas o acumulación térmicas generadas por los diversos componentes o subsistemas del edificio, es decir la demanda energética. Los resultados obtenidos con Vasari son solo valores indicativos que permiten comparar el comportamiento térmico de las diversas alternativas. Este cálculo, además, no tiene en cuenta las variaciones térmicas causadas por la ventilación que pueden tener un impacto significativo en los edificios densamente ocupados.

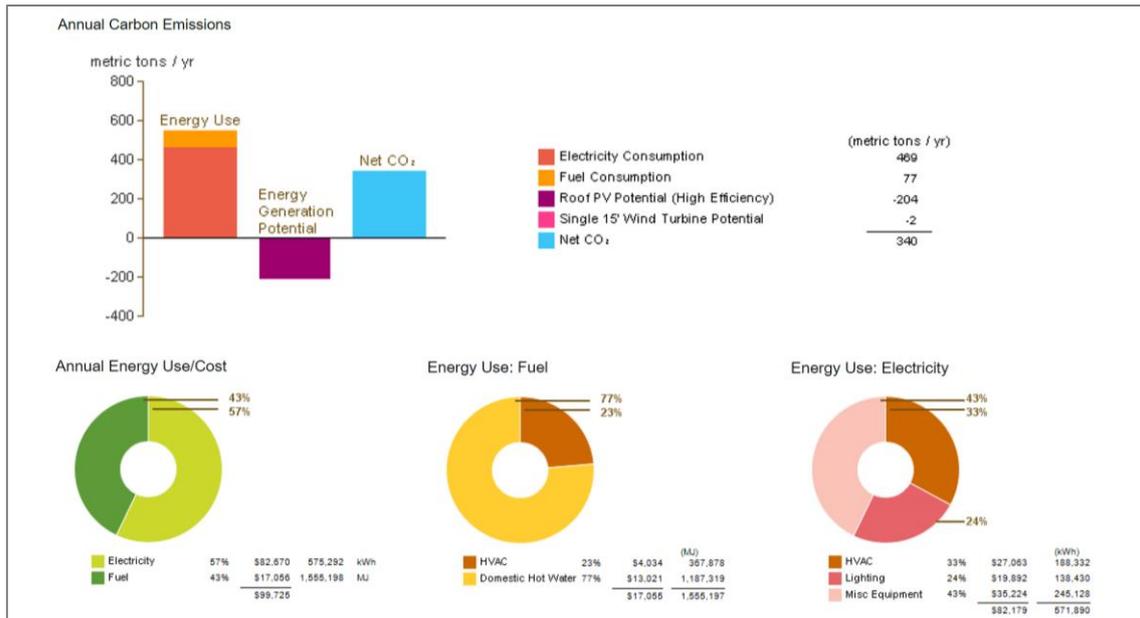


Figura 15. Gráficos de los resultados del cálculo de consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> (opción A).

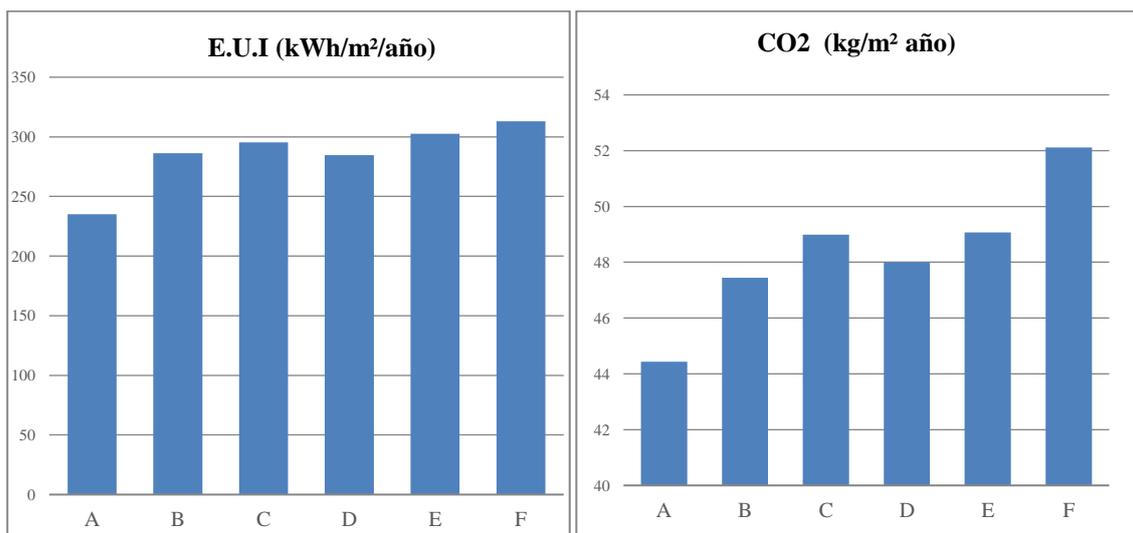
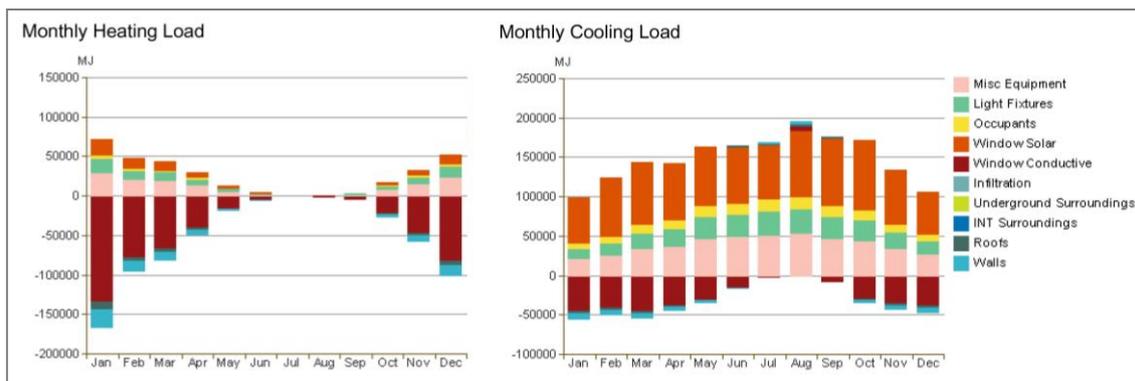
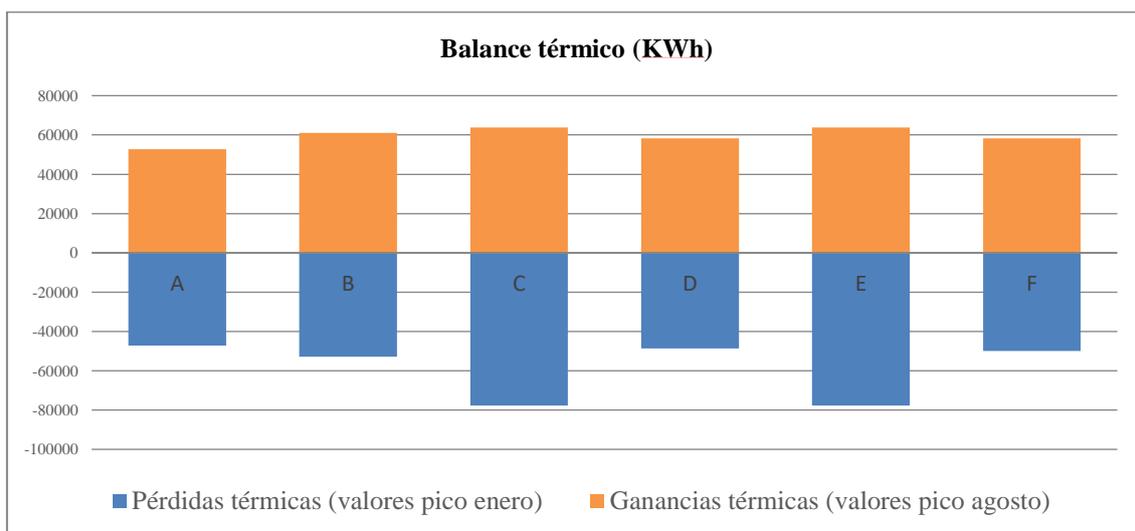


Figura 16. Gráficos comparativos de los resultados del cálculo de la intensidad de uso de energía (EUI) y emisiones de CO<sub>2</sub> en respecto con las alternativas de compacidad del edificio.



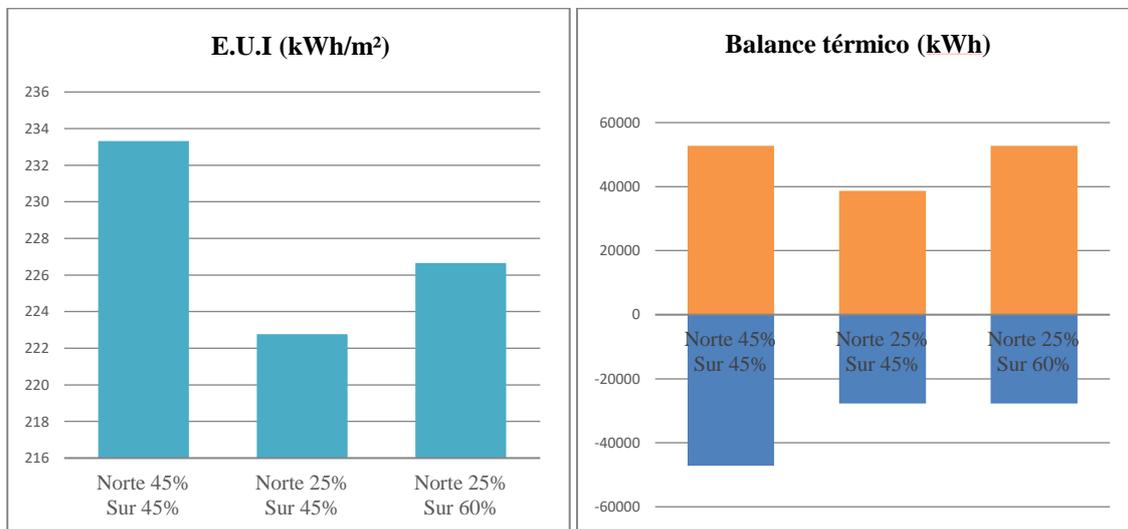
**Figura 17.** Cálculo de cargas térmicas (opción A). Los gráficos muestran, de manera indicativa, las pérdidas y las ganancias térmicas del edificio, debidas a factores externos (pérdida por conducción, convección y radiación través de la ventana, infiltraciones, suelo, fundaciones, muros, etc.) y factores internos (ocupantes, iluminación y equipamientos como enchufes, computadoras u equipos de oficinas). Del gráfico de carga de calefacción (izquierda) se deduce que los muros causan una mayor pérdida de calor respecto a otros componentes con un pico en el mes de enero, cuando más se necesita añadir calor para alcanzar las condiciones de confort (demanda de calefacción), ya que la ganancia solar por las ventanas no llega a contrastar suficientemente las pérdidas. El gráfico de carga de refrigeración (derecha) muestra que en agosto se produce la mayor ganancia térmica, también en este caso por los muros exteriores. Se necesita sustraer una cantidad de calor para alcanzar las condiciones de confort térmico (demanda de refrigeración).



**Figura 18.** Gráficos comparativos de los resultados del cálculo de cargas térmicas (valores pico de las pérdidas térmicas en el mes de enero y valores pico de las ganancias térmicas en agosto), que resultan de variar la compacidad del edificio.

La exploración de diversas alternativas por medio de la simulación energética se volvió a realizar tras cambiar el porcentaje de huecos, es decir, la relación entre las superficies opacas y la superficie acristalada. En los cálculos anteriores se consideró un porcentaje de 45% para cada fachada del edificio. Sin embargo, en climas con marcadas diferencias entre las estaciones del año, la adaptabilidad de la fachada a las diferentes condiciones climáticas es clave para el confort térmico y el ahorro energético. Por esta razón, se analizó el comportamiento térmico de la opción A, diferenciando las fachadas

con diversos porcentajes de huecos en su orientación norte y sur.<sup>9</sup> El resultado de los cálculos reveló una mejora en el comportamiento térmico del edificio en relación con la segunda opción considerada (25% obertura fachada norte, 45% obertura fachada sur) (Figura 19), que reduce la ganancia térmica en verano y las pérdidas térmicas en invierno con respecto a las otras propuestas.



**Figura 19.** Gráficos comparativos de los resultados de intensidad de uso de energía (EUI), y cargas térmicas al variar el porcentaje de aberturas en la fachada norte y sur: opción 1, fachada norte y sur 45% de huecos; opción 2, fachada norte 25% y fachada sur 45% de huecos; y opción 3, fachada norte 25% y fachada sur 60%.

**Evaluación de variantes de la compacidad del edificio.** Desde el punto de vista energético, la mejor propuesta entre las alternativas planteadas es similar al edificio existente (opción A): un edificio compacto (compacidad: 0,34), con mayor porcentaje de huecos en fachada orientada al sur (porcentajes de huecos: 45% en la fachada sur y 25% en la fachada norte). Básicamente, los cálculos realizados con Autodesk Vasari (DOE 2.2) confirmaron algunas reglas generalmente adoptadas por la arquitectura bioclimática. A saber, que el aumento de la compacidad del edificio se corresponde con el aumento de la demanda energética; que la mejor orientación de un edificio en zonas mediterráneas es norte-sur; y que es conveniente abrir la mayor cantidad de huecos en la fachada sur para aprovecharse de las ganancias térmicas. A pesar de que estos son conocimientos básicos al alcance de un profesional con experiencia, no es posible cuantificar con precisión el comportamiento energético del edificio, ni verificar si una propuesta cumple con un determinado valor de la demanda energética, sin recurrir a la simulación energética.

Por otro lado, desde un punto de vista socio-cultural, la forma de un edificio define su identidad. Así, un bloque simple y compacto es anónimo y no destaca de su entorno;

<sup>9</sup> En la fachada norte nunca da el sol y la luz, aunque escasa, se mantiene a lo largo del día. Sobre la fachada sur, debido a la inclinación de la tierra, el sol incide directamente muchas horas al día durante el invierno, mientras que en verano el ángulo de incidencia es menor en las fachadas por lo que las viviendas no se sobrecalientan. Según lo anterior, es conveniente abrir la mayor cantidad de huecos al sur para que en invierno entre la mayor cantidad de energía solar posible y se reduzca el consumo de calefacción, y evitar en verano la radiación solar directa que provoca un incremento en la demanda de refrigeración.

sus usuarios no llegan a reconocerse en él y a desarrollar un sentido de pertenencia. En el otro extremo, una excesiva originalidad en la forma de cada edificio daría lugar a entornos urbanos que no son más que el resultado de la agregación de edificios icónicos. La negociación entre las exigencias socio-culturales y energéticas puede resolverse en el tratamiento de la fachada: una composición diferenciada de las fachadas puede contribuir a paliar el problema de la homogeneidad, y al mismo tiempo mejorar el comportamiento térmico. Siguiendo con este planteamiento, una vez determinada la forma básica del edificio, se realizó un análisis más detallado del diseño de las fachadas, teniendo en cuenta los elementos fijos, como el balcón y la barandilla, sus dimensiones y la proporción de los huecos.

**Valoración de la herramienta de simulación energética aplicada en la etapa de anteproyecto.** Autodesk Vasari resultó apropiado en esta primera etapa de proyecto, en la que la información sobre el mismo es escasa. Vasari permitió analizar y comparar rápidamente diferentes alternativas a través de un modelo paramétrico vinculado a un modelo energético, que no requiere información detallada. Su motor de cálculo DOE-2 se basa en el método de simulación dinámica TFM (*Transfer Function Method*) para el cálculo de las cargas térmicas. Sin embargo, esta herramienta presenta numerosas limitaciones: no calcula las cargas de calefacción/refrigeración causadas por la ventilación, que pueden tener un impacto significativo en los edificios densamente ocupados; no proporciona información cuantitativa acerca de algunos indicadores energéticos, como la demanda energética y el confort térmico, que deben deducirse de los cálculos de carga de calefacción/refrigeración; y no permite personalizar el modelo energético (por ejemplo, no se puede caracterizar el sistema mecánico de climatización o eliminarlo, y no permite definir los requisitos de confort o el sistema constructivo). Además, el tipo de cálculo térmico efectuado por esta herramienta es indicativo, por lo tanto, no sirve para verificar el cumplimiento de las prestaciones, sino más bien para tener una idea general del comportamiento del edificio al variar algunos de sus parámetros o comparar alternativas entre ellas. Así, para poder cuantificar la demanda energética del edificio se precisa una herramienta que pueda suplir estas carencias. En una etapa sucesiva del proyecto, los datos obtenidos en esta primera etapa se cotejaron con los obtenidos con Ecotect, para continuar avanzando en la definición del edificio con una nueva secuencia de decisiones proyectuales.

#### **4.2.2.2 Proyecto básico: subsistemas del edificio**

En la etapa del proyecto básico se tomaron en cuenta separadamente los subsistemas del edificio, para especificar más detalladamente sus características: el subsistema geométrico (circulación y organización de los espacios interiores) y el subsistema envolvente (relación entre huecos y elementos de protectores del sol). En esta fase, se tomaron decisiones sobre la composición de las fachadas del edificio y sobre la organización de las viviendas. Los huecos, balcones y elementos de protección solar que conforman la fachada permiten limitar el sobrecalentamiento durante el verano, y la acumulación del calor durante el invierno, aspectos ambos que pueden contribuir a la mejora de la demanda energética del edificio. La organización de los espacios interiores

del edificio, por otro lado, no contribuye sustancialmente a modificar la demanda energética, pero puede tener repercusión en el consumo y las condiciones de confort de cada vivienda.

Antes de decidir sobre la composición de la fachada y la organización interior de las viviendas, se exportó el modelo energético creado en Autodesk Vasari a Ecotect mediante el formato .gbXML (Figura 20) para obtener datos cuantitativos de la demanda energética y del confort térmico de las diversas opciones que se generaron variando la compacidad del edificio (Figura 21).<sup>10</sup> Los resultados del cálculo confirmaron que la opción A, es decir la propuesta con el valor inferior de compacidad, presentaba una consistente reducción de la demanda de la calefacción (67 kWh/m<sup>2</sup>), y mejores condiciones en términos de confort térmico (Figura 22).<sup>11</sup> También se pudo apreciar que el mayor problema radicaba en la demanda de calefacción. Así, se calculó el valor de la demanda energética con los porcentajes de acristalamiento más convenientes (fachada norte 25% y fachada sur 45%), lo que dio lugar a una mejora consistente tanto en la demanda de calefacción (53,35 kWh/m<sup>2</sup>) como en la de refrigeración (17,63 kWh/m<sup>2</sup>). Sin embargo, esta variante no es capaz de cumplir con el valor límite de la demanda de calefacción (43 kWh/m<sup>2</sup>), por lo que hubo que introducir otras medidas para mejorar el comportamiento energético del edificio.

---

<sup>10</sup> Por medio del formato de exportación .gbXML, Ecotect reconoce las zonas térmicas y los materiales de un modelo según categorías (cubierta, muro exterior, ventanas, etc.), y asigna automáticamente a cada categoría un material o sistema constructivo específico. Sin embargo, en Ecotect las características térmicas, como la transmitancia de los materiales, no coinciden con las de la plantilla del modelo de origen. Para el cálculo se cambió el techo metálico que fue asignado por Ecotect, con un techo de hormigón revestido de tela asfáltica. Se dejó el ladrillo para el muro exterior, el hormigón para los forjados y el acristalamiento simple con marco de madera para las ventanas. El problema parece radicar en la exportación, es decir, que Vasari no exporta los materiales correctamente.

<sup>11</sup> Para el cálculo de la demanda con Ecotect se utilizó un sistema mecánico ideal eficiente al 100% (COP=1). De tal forma, el cálculo del consumo equivale al valor de la demanda (Consumo energético = demanda de energía / rendimiento del sistema). El COP (*Coefficient of Performance*) es el porcentaje (ratio) entre el calentamiento proporcionado (en vatios) y la energía consumida (también en vatios).

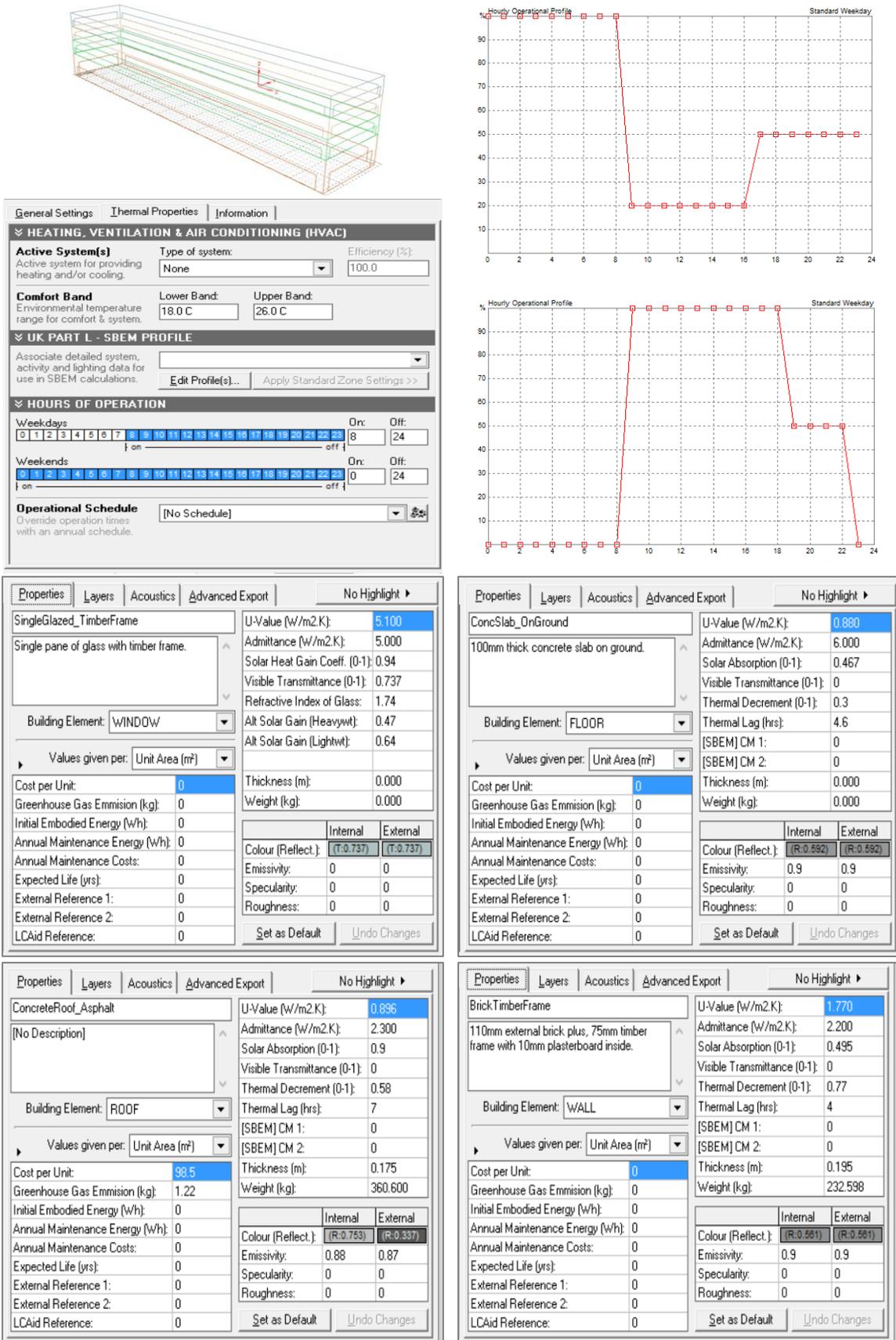


Figura 20. Características del modelo energético importado en Ecotect, plantilla de las propiedades térmicas (zona de confort y sistema mecánico) y horario de ocupación en los días laborales (viviendas y oficinas) según perfiles de uso normalizados (DBHE del CTE). Fuente: elaboración propia.

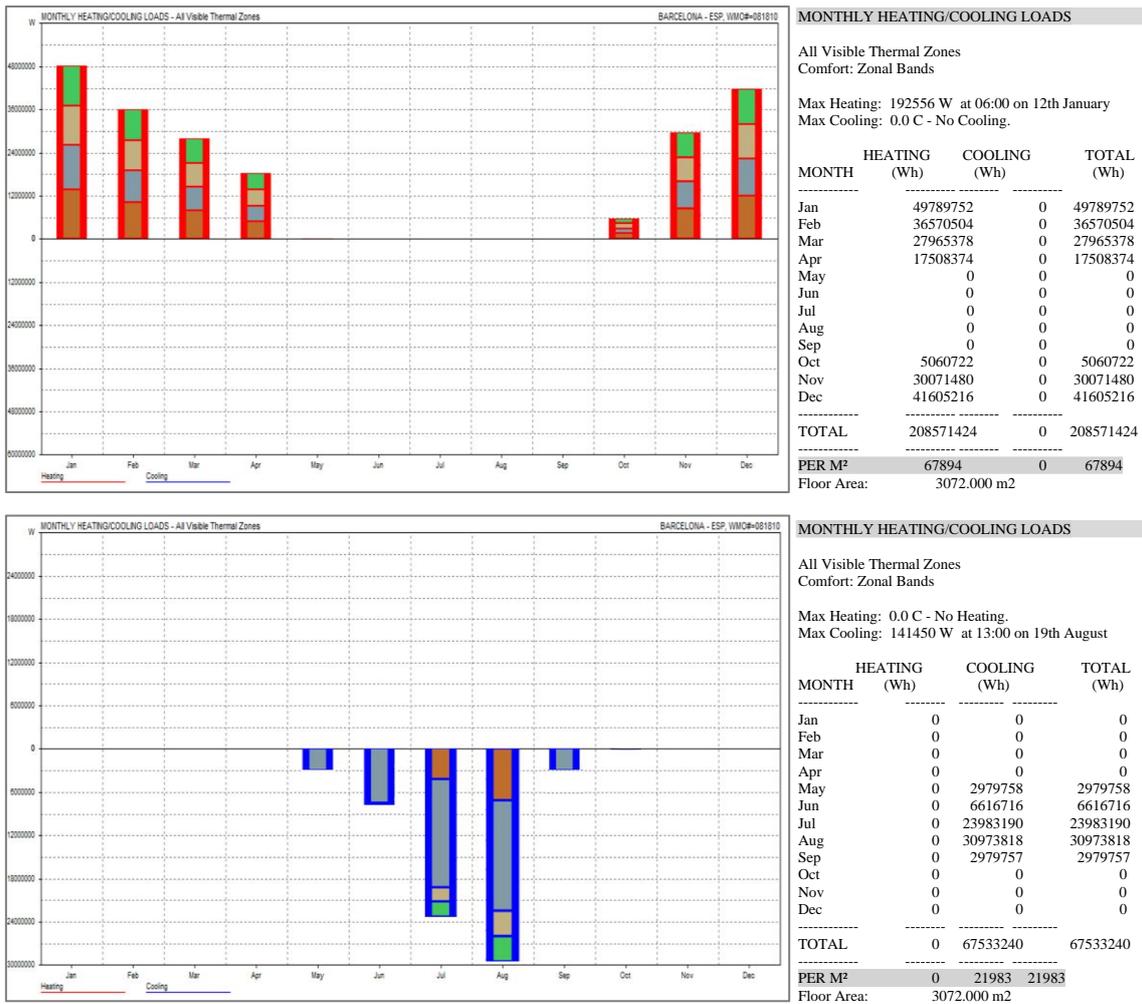


Figura 21. Resultados cuantitativos de la demanda de calefacción (arriba) y refrigeración (abajo) de todas las zonas térmicas de la opción A.

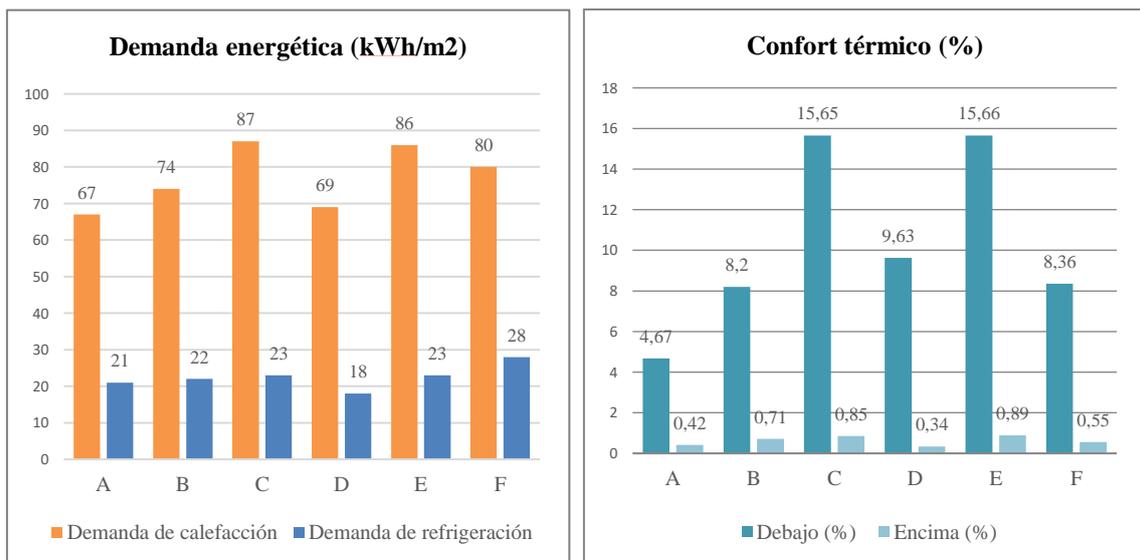
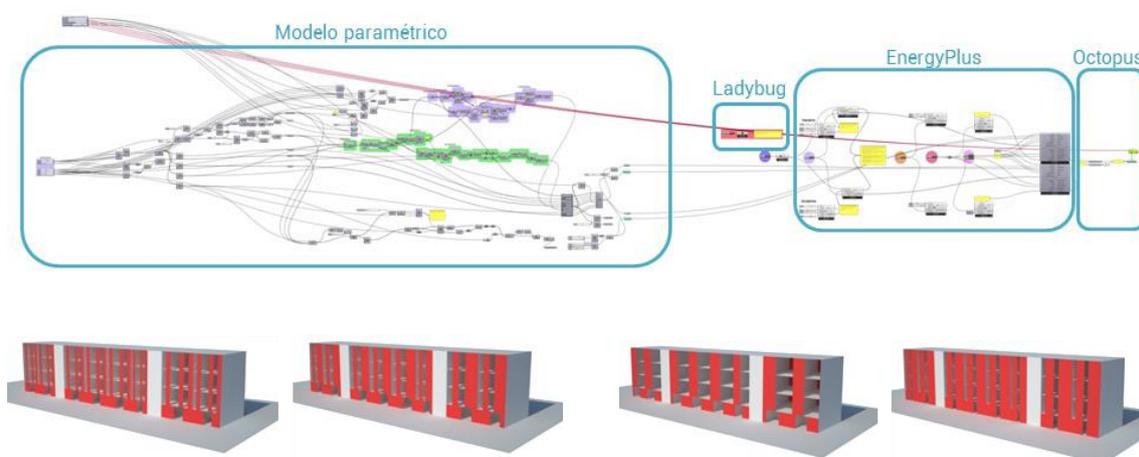


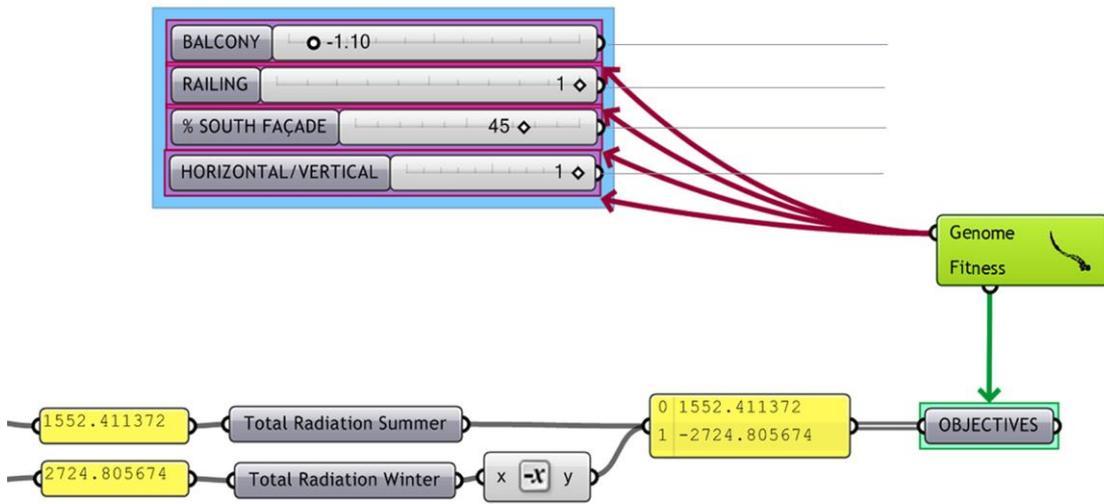
Figura 22. Gráficos comparativos de los resultados de demanda energética (kWh/m<sup>2</sup>) y confort térmico (%), al variar de la compacidad del edificio.

**Análisis de variantes del diseño de la fachada sur.** A continuación, se abordó el diseño de la fachada sur del edificio. En el hemisferio norte recae en la fachada sur la responsabilidad de lograr ganancias térmicas por captación solar en invierno, así como de impedir los excesos de ganancia de calor durante el verano. Los elementos de sombra fijos, el balcón y la barandilla, se dimensionaron en relación con el tamaño de las ventanas (horizontal o vertical), con dos objetivos: captar la máxima radiación solar durante el invierno (para poder reducir la demanda de calefacción) y reducir al mínimo la radiación solar durante el verano (para controlar el sobrecalentamiento debido a una excesiva ganancia térmica a través de los cerramientos).

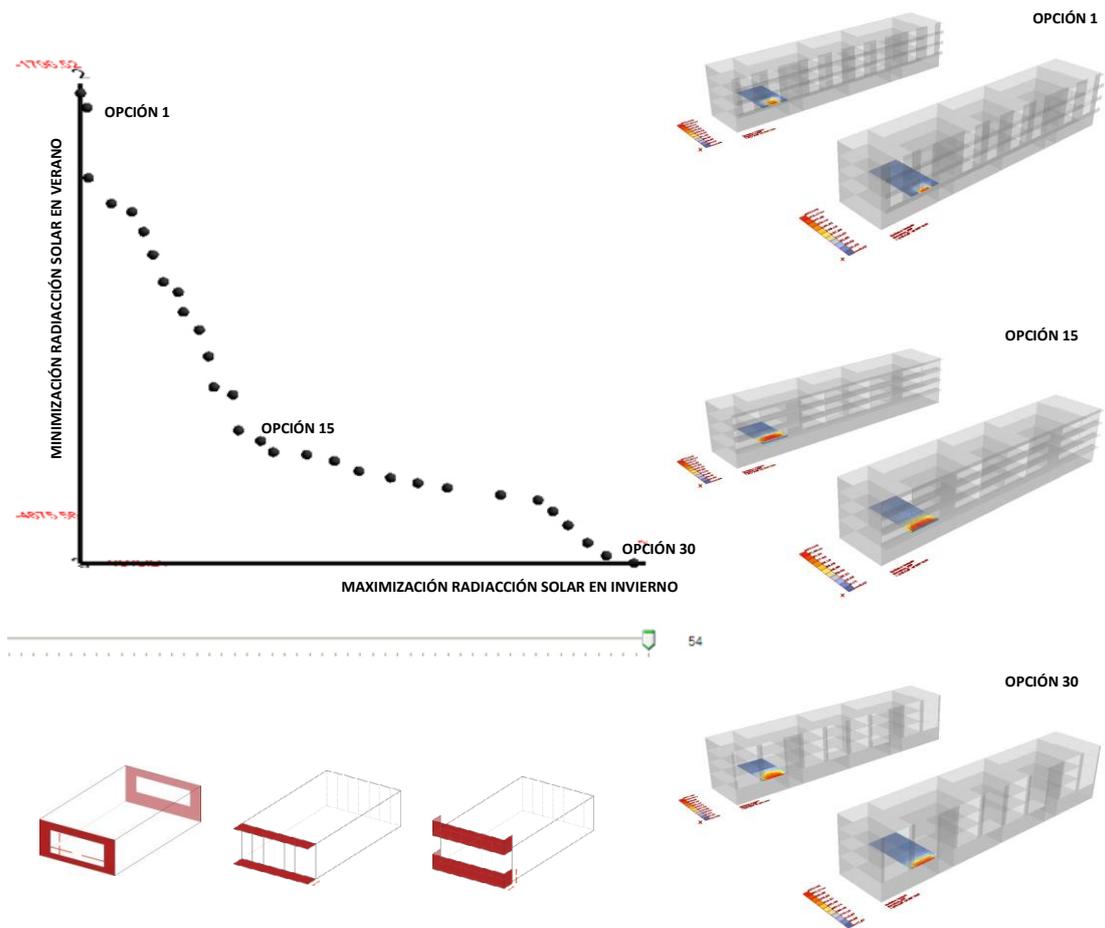
El modelo geométrico inicialmente realizado en Vasari y sucesivamente exportado a Ecotect, se introdujo en el programa Grasshopper de Rhinoceros en formato .DXF. Mediante el plug-in Ladybug, que conecta el modelo paramétrico de Grasshopper con el motor de cálculo EnergyPlus, se realizó un análisis de la incidencia de la radiación solar en el comportamiento térmico de diversas alternativas (Figura 23). El cálculo para determinar la solución óptima que cumpla con los dos objetivos conflictivos (maximizar la radiación solar en invierno y minimizarla en verano) se llevó a cabo con Octopus, un algoritmo evolutivo multi-objetivo (SPEA-2) (Figura 24), cuyos resultados fueron distribuidos de manera uniforme a lo largo de su aproximación a la frontera de Pareto (Figura 25). Estos resultados representan la mejor relación entre variables (balcón, ventana, barandilla) para lograr los dos objetivos prefijados.



**Figura 23.** Código realizado en Grasshopper. Propuestas obtenidas variando la composición de la envolvente del edificio (modelo paramétrico). Fuente: Código realizado por Francesc Bardera Collazos.



**Figura 24.** Detalle del procedimiento creado implementado en Grasshopper. Al variar de los valores de los parámetros de los elementos de fachada (balcón, barandilla, aberturas), el algoritmo multiobjetivo Octopus (SPEA-2) realiza un *trade-off* entre dos objetivos conflictivos (maximización de la radiación solar en invierno y minimización de la radiación solar en verano).



**Figura 25.** Distribución de los resultados de la optimización en una frontera de Pareto (*Optimality Frontier*).

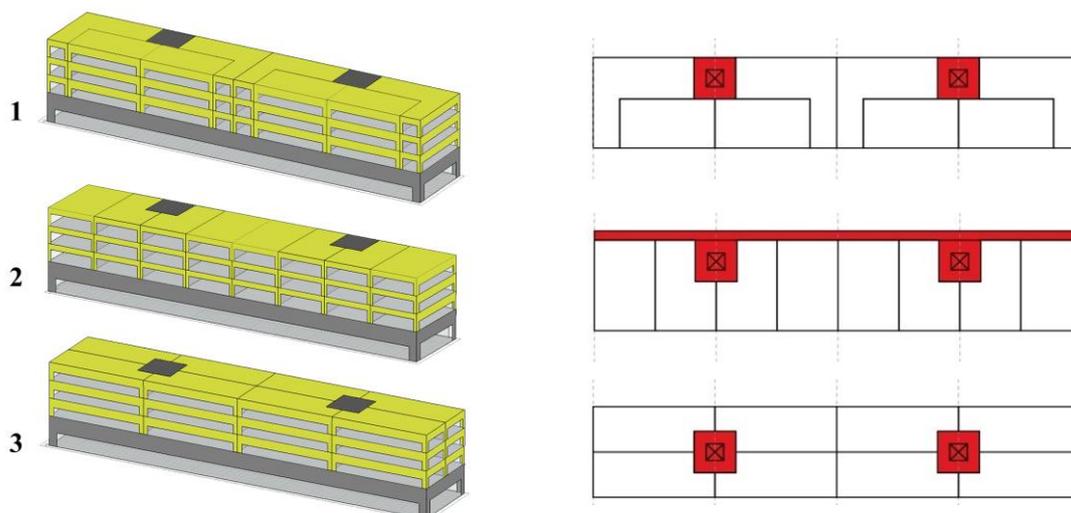
**Evaluación de variantes del diseño de la fachada sur.** Los resultados de la optimización multi-objetivo (Tabla 3), indicaron que para las ventanas verticales con balconera sería más apropiado emplear barandilla opaca, es decir, convertir la barandilla en elemento de protección solar. Por el contrario, en el caso de ventanas horizontales se podría optar por una barandilla acristalada, ya que la parte opaca de la envolvente actuaría como un dispositivo de protección solar. Esta última opción, según los resultados del análisis, resultó ser la más adecuada. Además, los datos obtenidos de este análisis dieron cuenta de la dimensión óptima del balcón: en la variante con un 45% de acristalamiento de la envolvente, una reducción del voladizo del balcón de un 10% (1,1 m) respecto al valor máximo permitido por la normativa urbanística, garantizaría un valor de la radiación solar en invierno igual al doble del valor de la radiación solar en verano. Esta relación entre la ganancia térmica en invierno y en verano se mejora más aun disponiendo de un 47-48% de acristalamiento, lo que permitiría un balcón de 1,19 m., siendo el valor máximo permitido por la normativa 1,2 m. A partir de estos datos, se reconsideró el porcentaje de aberturas decidido en la fase precedente (45%), el que tiene el edificio construido, que se incrementó para mejorar además la iluminación (criterio de confort) y facilitar las vistas hacia al paisaje.

Opción	Variables de diseño				Variables de rendimiento		
	Balcón (m)	Barandilla	Tipo ventana	Obertura (%)	Verano (Wh)	Invierno (Wh)	Proporción (Inv/Ver)
1	1,2	Si	Vertical	30%	1013	1796	1,77
2	1,18	Si	Vertical	31%	1045	1884	1,78
3	1,2	No	Horizontal	30%	1054	2315	2,2
4	1,15	No	Horizontal	32%	1171	2472	2,1
5	1,04	No	Horizontal	33%	1274	2523	1,9
6	1,11	No	Horizontal	37%	1334	2645	1,9
7	1,12	No	Horizontal	39%	1971	4157	2,1
8	1,2	No	Horizontal	40%	1381	2787	2
9	1,12	No	Horizontal	41%	1434	2953	2
10	1,13	No	Horizontal	43%	1510	3015	2
11	1,1	No	Horizontal	45%	1535	3136	2
12	1,1	No	Horizontal	46%	1662	3409	2
13	1,19	No	Horizontal	47%	1690	3596	2,12
14	1,04	No	Horizontal	47%	1786	3643	2
15	1,19	No	Horizontal	48%	1814	3862	2,12
16	1,04	No	Horizontal	50%	1926	3926	2
17	1,02	No	Horizontal	50%	1991	3995	2
18	0,98	No	Horizontal	48%	2160	4011	1,85
19	0,95	No	Horizontal	50%	2300	4049	1,76
20	0,81	No	Horizontal	50%	2425	4112	1,69
21	0,76	No	Horizontal	50%	2585	4152	1,6
22	0,7	No	Horizontal	50%	2722	4185	1,53
23	0,52	No	Horizontal	50%	2872	4215	1,46
24	0,42	Si	Vertical	50%	3142	4256	1,35
25	0,38	Si	Vertical	50%	3331	4289	1,2
26	0,33	Si	Vertical	50%	3406	4357	1,2
27	0,2	Si	Vertical	50%	3483	4443	1,2
28	0,17	Si	Vertical	50%	3583	4550	1,2
29	0,15	Si	Vertical	50%	3678	4629	1,2
30	0	Si	Vertical	50%	3818	4676	1,2

**Tabla 3.** Resultados de la optimización multicriterio obtenidos por medio del algoritmo evolutivo multiobjetivo Octopus (SPEA-2).

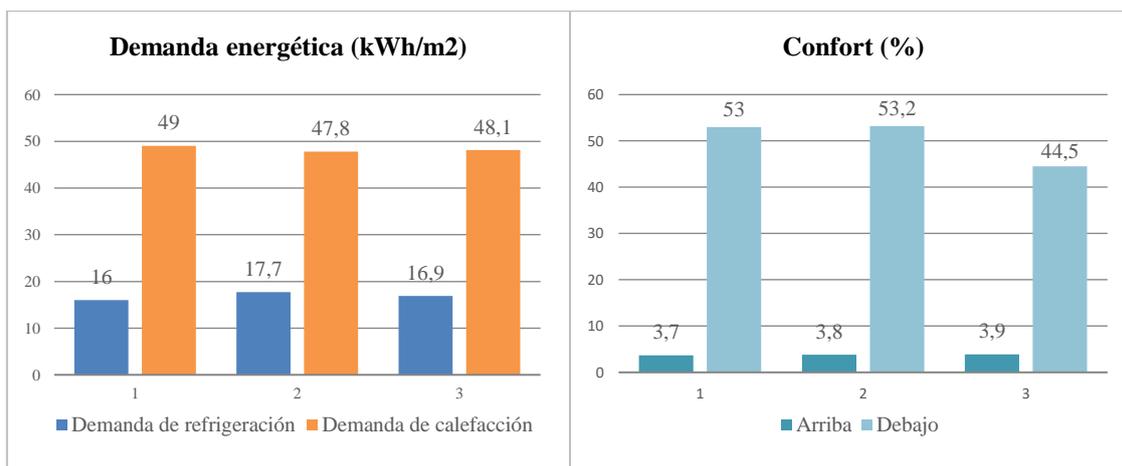
Sin embargo, para tomar decisiones sobre el diseño de la fachada tuvieron que considerarse también criterios estéticos, ya que la composición y tamaño de elementos como ventanas, barandillas o balcones influyen en el aspecto global del edificio. Las decisiones que derivan de los resultados de la simulación (balconera con barandilla opaca o ventana corrida con barandilla de cristal), hacen que se perciban en la fachada franjas horizontales alternadas de llenos y vacíos, que ponen de manifiesto la estratificación del edificio, planta a planta. Al contrario, las balconeras con barandilla de cristal o rejas dan lugar a una composición de bandas verticales, cuyo ritmo depende del porcentaje de huecos. Mientras que en un caso se acentúa la horizontalidad, en el otro se enfatiza la verticalidad del edificio (como ocurre en el proyecto construido). Así, pese a los resultados del análisis térmico, se optó por la fachada con franjas verticales (balconeras con barandilla de cristal o reja), para mejorar la proporción de un bloque que es bastante más largo que alto (criterio estético) y, al mismo tiempo, garantizar la radiación solar suficiente para reducir la demanda de calefacción (criterio energético).

**Análisis de variantes de la distribución de las viviendas.** Una vez determinadas la compacidad del edificio y la composición de la fachada en base a criterios energéticos y compositivos, se evaluaron diversas alternativas para la organización interior de las viviendas. Además de la propuesta del edificio construido (opción 1), se plantearon dos variantes (opción 2 y 3) (Figura 26). En la propuesta original, las viviendas se orientaban al sur para aprovechar la exposición solar, aunque los dos tipos de vivienda (R y L) tienen una demanda y consumo energéticos distintos. La vivienda R está más protegida de los agentes externos, por lo que debería presentar un menor consumo de calefacción con respecto a la vivienda L, la cual tiene más superficie expuesta al exterior orientada en dirección norte. En el proyecto alternativo, se consideraron dos opciones para unificar el comportamiento energético de los dos tipos de vivienda: una que distribuye las viviendas norte-sur buscando la igualdad de demanda energética de las dos viviendas (opción 2), y otra que distribuye las viviendas simétricamente (opción 3). Todas las variantes de distribución fueron analizadas con Ecotect. Al ser la demanda energética dependiente principalmente de la superficie de la envolvente más que de la distribución interior del edificio, el cálculo con Ecotect confirmó que no hay una diferencia sustancial en la demanda energética y las condiciones de confort térmico del edificio en las diversas variantes consideradas (Figura 27). Aunque la opción 2 ofrece una mejora en los valores de la demanda de calefacción, la diferencia se limita a un rango de valores muy pequeño (47,8-49 kWh/m<sup>2</sup>).



**Figura 26.** Alternativas de distribución de viviendas y circulación:

- 1- Núcleo de circulación lateral: vivienda tipo L (96m<sup>2</sup>); vivienda tipo R (81m<sup>2</sup>).
- 2- Circulación exterior: vivienda tipo L (96m<sup>2</sup>); vivienda tipo R (80m<sup>2</sup>).
- 3- Núcleo de circulación central: viviendas simétricas (88m<sup>2</sup>).



**Figura 27.** Gráficos comparativos de los resultados del cálculo de la demanda de calefacción y de refrigeración para las tres opciones de distribución de las viviendas. Gráfico comparativo del porcentaje de horas en que la temperatura interna está por debajo (valores negativos) y por encima (valores positivos) de la zona de confort (18-26°C).

**Evaluación de variantes de la distribución de las viviendas.** A continuación, se analizó la demanda energética individual de las viviendas más desfavorecidas (viviendas de la tercera planta en la extremidad oeste del bloque) de las tres variantes. Los resultados del cálculo (Tabla 4 y Tabla 5) demostraron que en ningún caso se llega a un comportamiento uniforme de los dos tipos de vivienda. El resultado puede estar debido a las limitaciones de Ecotect, que no permite simular el comportamiento real del edificio debido a la falta de precisión del método que emplea (CIBSE Admittance Method). Para paliar estas deficiencias del método empleado, las variantes volvieron a analizarse en una etapa posterior del proyecto por medio de una herramienta de cálculo más precisa (DesignBuilder).

TABLA COMPARATIVA DE LA DEMANDA DE CALEFACCIÓN (kWh/m <sup>2</sup> )						
	OPCIÓN 1		OPCIÓN 2		OPCIÓN 3	
Planta 3°	Vivienda L	Vivienda R	Vivienda Exterior	Vivienda interior	Vivienda norte	Vivienda sur
Enero	1779,59	1101,33	1715,17	1187,27	1650,66	1321,596
Febrero	1271,34	805,74	1221,55	846,28	1217,53	966,888
Marzo	866,79	568,22	879,04	570,93	803,46	681,864
Abril	516,71	318,42	531,21	331,68	475,3	382,104
Mayo	95,57	43,58	108,40	47,41	89,85	52,296
Junio	0	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0	0
Octubre	134,12	74,81	148,03	90,16	139,56	89,772
Noviembre	841,65	503,61	842,76	546,62	780,14	604,332
Diciembre	1470,57	891,77	1420,26	975,2	1366,49	1070,124
<b>TOT (anual)</b>	<b>6976,39</b>	<b>4307,51</b>	<b>6866,46</b>	<b>4595,55</b>	<b>6522,99</b>	<b>5169,01</b>
<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>95,62</b>	<b>81,22</b>	<b>96</b>	<b>80,87</b>	<b>88,43</b>	<b>88,43</b>
<b>Valor unitario de demanda (KWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>72,95</b>	<b>53,03</b>	<b>71,52</b>	<b>56,82</b>	<b>73,76</b>	<b>58,45</b>
<b>Diferencia (KWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>19,92</b>		<b>14,69</b>		<b>15,31</b>	

**Tabla 4.** Resultados de la demanda de calefacción de los dos tipos de vivienda en cada opción.

TABLA COMPARATIVA DE LA DEMANDA DE REFRIGERACIÓN (kWh/m <sup>2</sup> )						
	OPCIÓN 1		OPCIÓN 2		OPCIÓN 3	
Planta 3°	Vivienda L	Vivienda R	Vivienda Exterior	Vivienda interior	Vivienda norte	Vivienda sur
Enero	0	0	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0	0	0
Junio	229,56	144,26	235,262	195,92	177,27	230,67
Julio	966,72	544,23	1046,508	749,54	720,13	1038,78
Agosto	1154,72	629,99	1260,426	911,90	888,43	1317,64
Septiembre	135,86	108,68	206,232	192,21	69,73	352,32
Octubre	0	0	0	0	0	0
Noviembre	0	0	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0	0	0
<b>TOT (anual)</b>	<b>2486,87</b>	<b>1427,17</b>	<b>2748,42</b>	<b>2049,58</b>	<b>1855,57</b>	<b>2939,43</b>
<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>95,62</b>	<b>81,22</b>	<b>96</b>	<b>80,87</b>	<b>88,43</b>	<b>88,43</b>
<b>Valor unitario de demanda (KWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>26,00</b>	<b>17,57</b>	<b>28,62</b>	<b>25,34</b>	<b>20,98</b>	<b>33,24</b>
<b>Diferencia (KWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>8,43</b>		<b>3,28</b>		<b>12,25</b>	

**Tabla 5.** Resultados de la demanda de refrigeración de los dos tipos de vivienda en cada opción.

**Valoración de la herramienta de simulación energética aplicada en la etapa de proyecto básico.** En esta etapa del proyecto se usó un modelo único para diferentes propósitos (composición de la fachada y organización de las viviendas del edificio). Ecotect permitió importar y exportar archivos en formato .gbXML y exportar el modelo para otras herramientas (Grasshopper) utilizando un formato 3D (.DXF). A pesar de las ventajas de la interoperabilidad y flexibilidad del modelado, Ecotect no es muy preciso en el cálculo de las temperaturas internas y las cargas térmicas, ya que usa un método simplificado o simulación pseudo-dinámica (CIBSE Admittance Method), basado en la variación del valor medio, que no es capaz de simular la naturaleza dinámica del comportamiento térmico del edificio, además de no considerar los efectos de la radiación solar (CIBSE, 1999). Asimismo, Ecotect no permite realizar el cálculo del consumo o de la producción de CO<sub>2</sub>. Para superar estas limitaciones, el modelo energético realizado en Ecotect fue exportado y analizado con DesignBuilder, con el fin de conocer con más detalle el comportamiento energético del edificio, y así decidir la distribución de las viviendas.

#### **4.2.2.3 Proyecto ejecutivo: componentes del edificio**

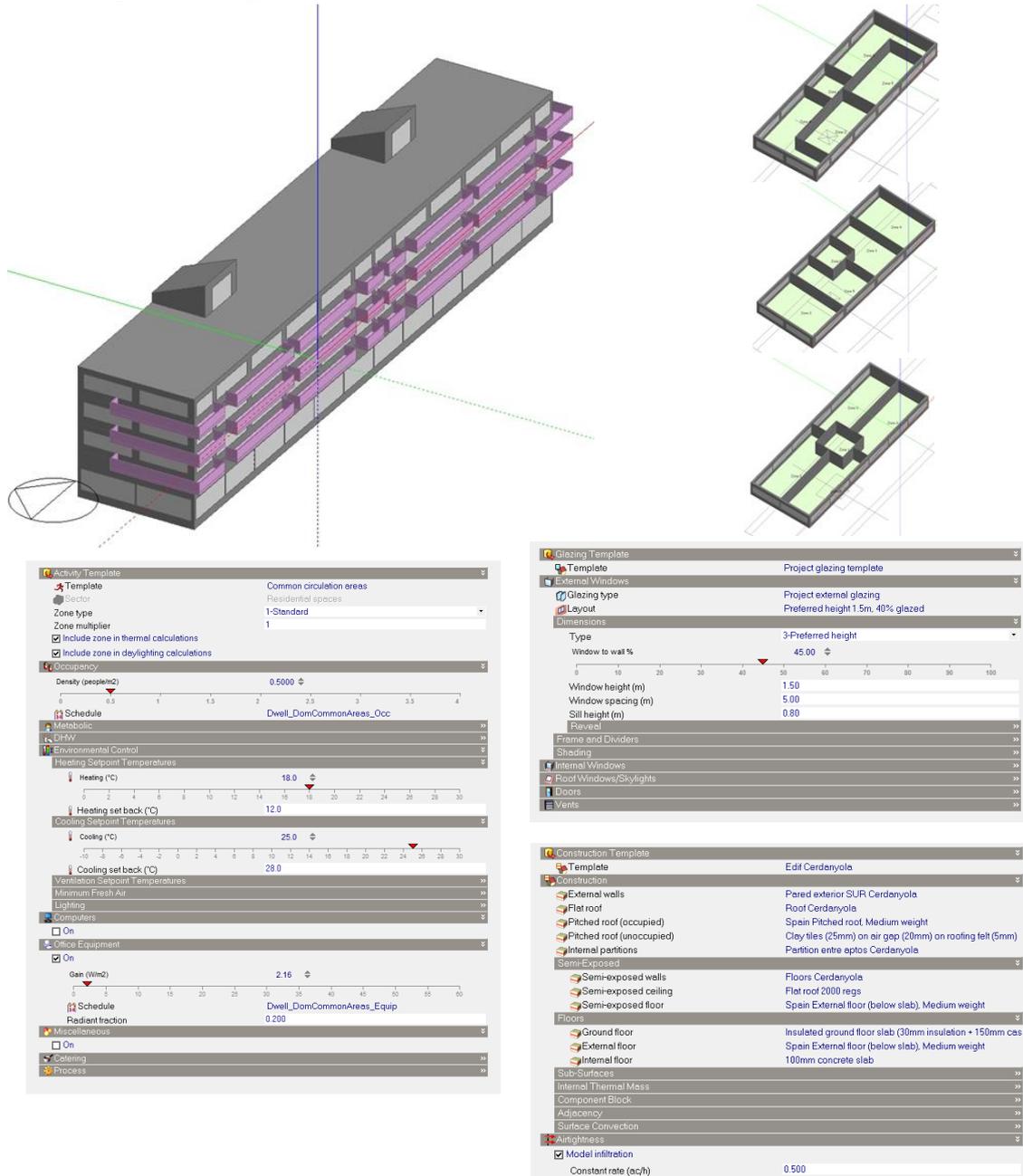
En la etapa final del proceso de proyecto se tomaron decisiones sobre la estratificación de la envolvente (sistemas constructivos y características materiales). Desde el punto de vista termodinámico, el edificio se entiende como un sistema que regula constantemente los flujos cambiantes de energía entre las diversas zonas térmicas interiores y entre el edificio y el exterior; un sistema que tiende a adaptarse a las condiciones del exterior: el flujo de calor tiende a salir a través de la envolvente en invierno lo que conlleva pérdidas térmicas, mientras que en verano el flujo de calor tiende a entrar por medio de la envolvente implicando ganancias térmicas del edificio.<sup>12</sup> La capacidad del edificio para aislarse de las condiciones externas depende especialmente de los materiales que definen la envolvente, es decir, de los cerramientos que limitan el espacio habitable del entorno, ya sea el clima, el terreno u otro edificio.

DesignBuilder (Figura 28) permite realizar el cálculo cuantitativo de la demanda energética por medio de una simulación dinámica (EnergyPlus). Por ello, antes de tomar decisiones sobre la envolvente, se verificaron los resultados de demanda para las diversas opciones de organización de las viviendas calculados previamente con Ecotect. Los resultados del cálculo realizado con DesignBuilder permitieron confirmar que al variar la organización de las viviendas no se obtenía un cambio sustancial en el valor de la

---

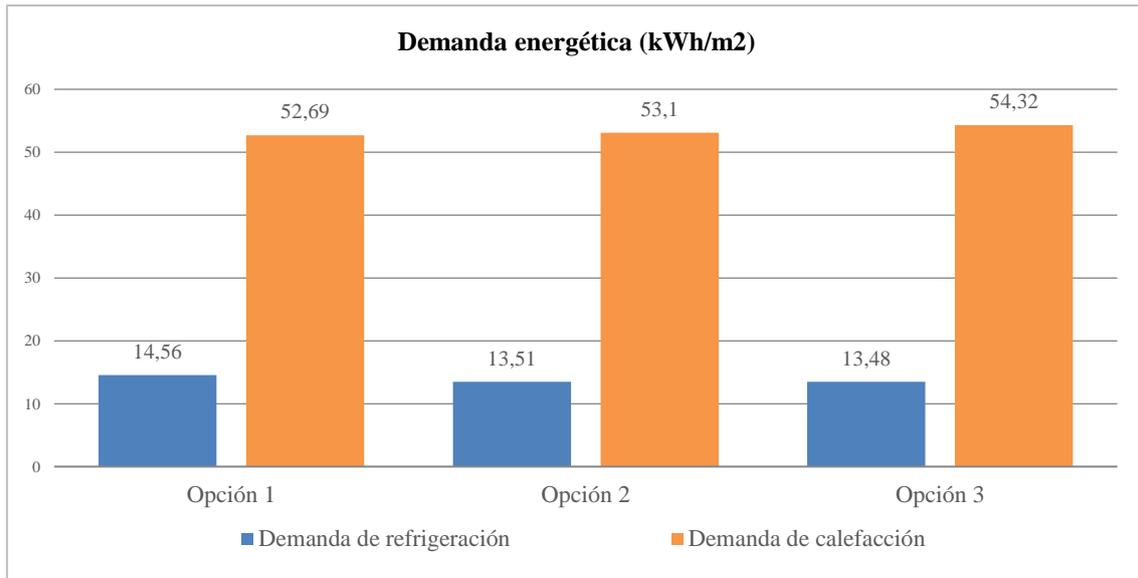
<sup>12</sup> La definición termodinámica del equilibrio se basa en el fenómeno según el cual, cuando dos cuerpos están en contacto térmico, la energía calorífica (calor) fluye de uno al otro, de manera que circula calor del más caliente al más frío, hasta que ambos alcanzan una misma temperatura. Cuando ocurre esto, los dos cuerpos están en equilibrio térmico y cesa el flujo de calor entre ambos y sus temperaturas se mantienen estables. En invierno, la temperatura exterior ( $T_e$ ) del edificio es inferior a la temperatura interior ( $T_i$ ), por lo que el flujo de calor se mueve de adentro hacia afuera del edificio (flujo vertical ascendente a través de la cubierta, flujo horizontal a través de las fachadas). En verano, la temperatura exterior ( $T_e$ ) es mayor que la temperatura interior ( $T_i$ ), por lo que el flujo de calor se mueve de afuera hacia adentro del edificio (flujo vertical descendente a través de la cubierta; flujo horizontal entrante a través de las fachadas). La dirección del flujo de calor a través del suelo (flujo vertical) depende de la temperatura de terreno.

demanda energética global del edificio.<sup>13</sup> El rango de valores de la demanda de calefacción del edificio en las diversas opciones es de 52,69-54,32 kWh/m<sup>2</sup> año, mientras que el rango de variación de la demanda de refrigeración es de 14,56-13,48 kWh/m<sup>2</sup> año (Figura 29) (Tabla 6). Por medio de este cálculo se pudo constatar que ninguna variante es capaz de cumplir con el valor límite para la demanda de calefacción (43 kWh/m<sup>2</sup>), por lo que se introdujeron cambios en las capas que conforman la envolvente. Antes de ello, sin embargo, se averiguó el valor de la demanda individual de cada vivienda.



**Figura 28.** Modelo energético del edificio (DesignBuilder), plantillas de materiales y ocupación para el cálculo energético de las diversas propuestas de la distribución de las viviendas. Fuente: Modelo realizado por Michelle Sánchez de León Brajkovich.

<sup>13</sup> Para el cálculo de la demanda con DesignBuilder se empleó un sistema mecánico ideal eficiente al 100% (COP=1). De esta manera, el cálculo del consumo se equiparó con el valor de la demanda (consumo energético=demanda/rendimiento del sistema).

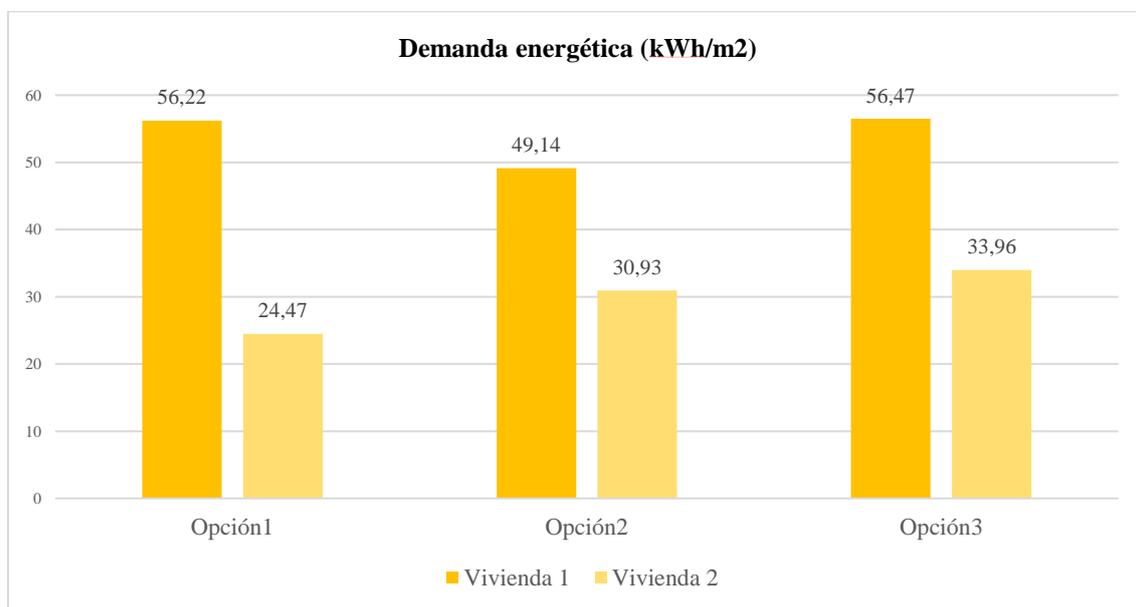


**Figura 29.** Gráficos comparativos de los resultados del cálculo de la demanda de calefacción y de refrigeración para las tres opciones de distribución de las viviendas.

TABLA COMPARATIVA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA (KWh/m²)						
	OPCIÓN 1		OPCIÓN 2		OPCIÓN 3	
	Demanda calefacción	Demanda refrigeración	Demanda calefacción	Demanda refrigeración	Demanda calefacción	Demanda refrigeración
	(KWh)	(KWh)	(KWh)	(KWh)	(KWh)	(KWh)
Enero	33287,92	0	33170,65	0	34103,88	0
Febrero	23907,45	0	24093,57	0	24861,5	0
Marzo	19025,28	0	19431,25	0	19821,49	0
Abril	12246,14	0	12836,91	0	12682,88	0
Mayo	5584,38	-2,73	5785,99	6,91	5735,60	1,87
Junio	0	3138,74	0	2983,50	0	2841,73
Julio	0	13963,76	0	13163,96	0	13033,87
Agosto	0	16993,44	0	15987,34	0	15825,25
Septiembre	0	4967,81	0	4415,59	0	4343,00
Octubre	4498,66	0	4572,36	0	4616,45	0
Noviembre	17649,85	0	17520,31	0	18162,09	0
Diciembre	26843,66	0	26674,31	0	27534,31	0
<b>TOT (anual)</b>	<b>144905,80</b>	<b>40037,65</b>	<b>146016,47</b>	<b>37159,43</b>	<b>149392,04</b>	<b>37060,45</b>
<b>Superficie (m²)</b>	<b>2750</b>	<b>2750</b>	<b>2750</b>	<b>2750</b>	<b>2750</b>	<b>2750</b>
<b>Valor unitario de demanda (KWh/m²)</b>	<b>52,69</b>	<b>14,56</b>	<b>53,10</b>	<b>13,51</b>	<b>54,32</b>	<b>13,48</b>
<b>Valor unitario de demanda conjunta (KWh/m²)</b>	<b>67,25</b>		<b>66,61</b>		<b>67,8</b>	

**Tabla 6.** Resultados de cálculo de la demanda energética en las diversas opciones de organización de las viviendas.

A continuación, se analizó la demanda energética de las viviendas más desfavorecidas (viviendas de la tercera planta en la extremidad oeste del bloque) en las tres opciones. A través de este cálculo se observó que en las diversas propuestas se producían variaciones sustanciales de la demanda de calefacción (Tabla 7): en la opción 1, la vivienda de tipo L presentaba una demanda de calefacción tres veces superior a la demanda de la vivienda de tipo R; en la opción 2, la vivienda exterior reducía la demanda de calefacción, así como la diferencia en el comportamiento respecto a la otra vivienda; y en la opción 3, como era de esperar, se llevaba al extremo todos los aspectos negativos (aumento de demanda de calefacción y desequilibrio entre el consumo y demanda en los dos tipos de vivienda). En el caso de la demanda de refrigeración no se detectaron variaciones significativas en las tres opciones (Tabla 8). En definitiva, el cálculo térmico de EnergyPlus indicó que la opción 2 permitía reducir la diferencia en la demanda energética de los dos tipos de vivienda, contribuyendo a un consumo más equilibrado en las mismas (Figura 30). Cabe deducir por tanto que la precisión de cálculo de la herramienta es fundamental para obtener información adecuada para tomar decisiones en esta fase del proyecto. Aun así, a pesar de los resultados de la simulación, tuvieron que considerarse otros factores para determinar la distribución del edificio, como la normativa que no permite la realización de una pasarela exterior para respetar las costumbres de la comunidad local (criterio socio-cultural). Por tanto, se descartó la opción 2 que permitía mejorar el comportamiento térmico de las dos viviendas tipos, para reconsiderar la opción 1.



**Figura 30.** Gráfico comparativo de la demanda energética conjunta (calefacción y refrigeración) de los dos tipos de viviendas de cada opción.

<b>TABLA COMPARATIVA DE LA DEMANDA DE CALEFACCIÓN (KWh)</b>						
	<b>OPCIÓN 1</b>		<b>OPCIÓN 2</b>		<b>OPCIÓN 3</b>	
Planta 3º	Vivienda L (1)	Vivienda R (2)	Vivienda exterior (1)	Vivienda interior (2)	Vivienda norte (1)	Vivienda sur (2)
Enero	1000,44	286,34	820,79	443,31	1000,35	404,98
Febrero	681,74	175,46	532,12	298,68	704,82	247,67
Marzo	394,64	138,37	308,96	216,14	420,50	176,29
Abril	144,11	94,78	121,36	122,32	143,17	101,84
Mayo	0,03	0,24	0	1,47	0,18	8,64
Junio	0	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0	0
Octubre	4,97	0	0,89	0	11,09	0
Noviembre	385,20	66,52	289,29	136,35	416,82	112,81
Diciembre	813,46	207,95	650,90	344,25	831,04	300,96
<b>TOT (anual)</b>	<b>3424,59</b>	<b>969,66</b>	<b>2724,30</b>	<b>1562,52</b>	<b>3527,97</b>	<b>1344,64</b>
<b>Superficie (m²)</b>	<b>89,3</b>	<b>77,7</b>	<b>92</b>	<b>74,785</b>	<b>84</b>	<b>84</b>
<b>Valor unitario de demanda (KWh/m²)</b>	<b>38,35</b>	<b>12,48</b>	<b>29,61</b>	<b>20,89</b>	<b>42,00</b>	<b>16,01</b>
<b>Diferencia (KWh/m²)</b>	<b>25,87</b>		<b>8,72</b>		<b>25,99</b>	

**Tabla 7.** Demanda de calefacción en las diversas opciones de organización de las viviendas.

<b>TABLA COMPARATIVA DE LA DEMANDA DE REFRIGERACIÓN (KWh)</b>						
	<b>OPCIÓN 1</b>		<b>OPCIÓN 2</b>		<b>OPCIÓN 3</b>	
Planta 3º	Vivienda L (1)	Vivienda R (2)	Vivienda exterior (1)	Vivienda interior (2)	Vivienda norte (1)	Vivienda sur (2)
Enero	0	0	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0	0	0
Mayo	0	0	0,19	0	0	0
Junio	171,49	57,15	188,72	48,26	126,37	130,54
Julio	623,78	340,46	664,62	295,27	503,14	542,46
Agosto	683,32	407,66	737,18	348,50	532,77	601,05
Septiembre	116,49	104,26	188,46	55,45	53,25	186,90
Octubre	0	22,36	0	3,03	0	46,07
Noviembre	0	0	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0	0	0
<b>TOT (anual)</b>	<b>1595,38</b>	<b>931,97</b>	<b>1796,36</b>	<b>750,51</b>	<b>1215,54</b>	<b>1507,76</b>
<b>Superficie (m²)</b>	<b>89,299</b>	<b>77,7</b>	<b>92</b>	<b>74,785</b>	<b>84</b>	<b>84</b>
<b>Valor unitario de demanda (KWh/m²)</b>	<b>17,87</b>	<b>11,99</b>	<b>19,53</b>	<b>10,04</b>	<b>14,47</b>	<b>17,95</b>
<b>Diferencia (KWh/m²)</b>	<b>5,98</b>		<b>9,49</b>		<b>3,48</b>	

**Tabla 8.** Demanda de refrigeración en las diversas opciones de organización de las viviendas.

**Análisis de variantes de la estratificación de la envolvente.** El modelo realizado en DesignBuilder se usó también para tomar decisiones acerca de las capas que conforman la envolvente. Los materiales que forman la fachada permiten controlar el paso de flujo de calor saliente y entrante del edificio debido al gradiente de temperaturas (diferencia entre temperatura interna y externa). Es más, la densidad de los materiales, o masa térmica,<sup>14</sup> permite controlar el fenómeno físico conocido como inercia térmica del edificio,<sup>15</sup> que hace referencia a la cantidad de calor que el edificio puede conservar y la velocidad con que lo cede o absorbe. En ambos casos (resistividad e inercia de la envolvente), el empleo de un material u otro permite estabilizar mejor o peor la temperatura interior del edificio frente a las oscilaciones de las condiciones climáticas exteriores. En base a estos conocimientos, se propuso el tratamiento diferenciado de las fachadas del edificio, usando un sistema de aislamiento en la cubierta, el suelo y la fachada orientada en dirección norte, y a su vez, recurriendo a diversas estratificaciones de materiales (diversos valores de transmitancia térmica y densidad) en la fachada sur del edificio (Tabla 9) (Figura 31 y Figura 32): un cerramiento convencional con cámara de aire (opción 1); un cerramiento con cámara de aire y aislamiento (opción 2), y un sistema de cortina de aire interno o muro Trombe (opción 3).

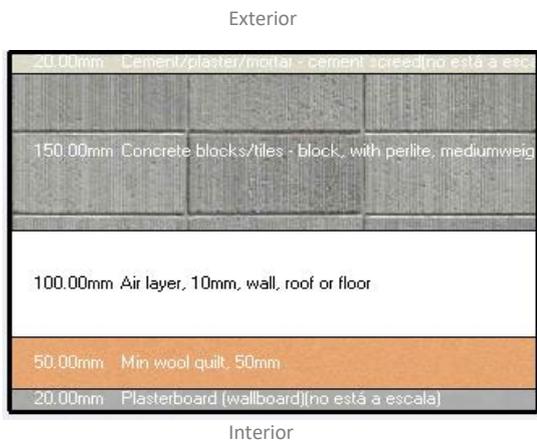
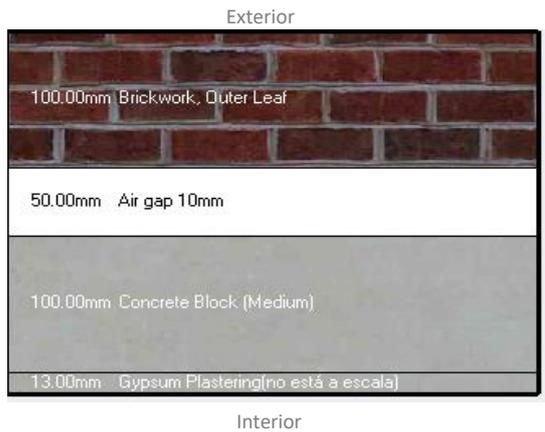
---

<sup>14</sup> La masa térmica es un sistema material con un potencial de acumulación de calor, generalmente de un espesor considerable, con un elevado calor específico volumétrico y con una conductividad térmica moderada (el hormigón es sumamente conductivo, mientras que el ladrillo lo es menos y puede retener más calor). Esta característica del material, que se resume con el término densidad, determina la distribución gradual de la energía a través del mismo.

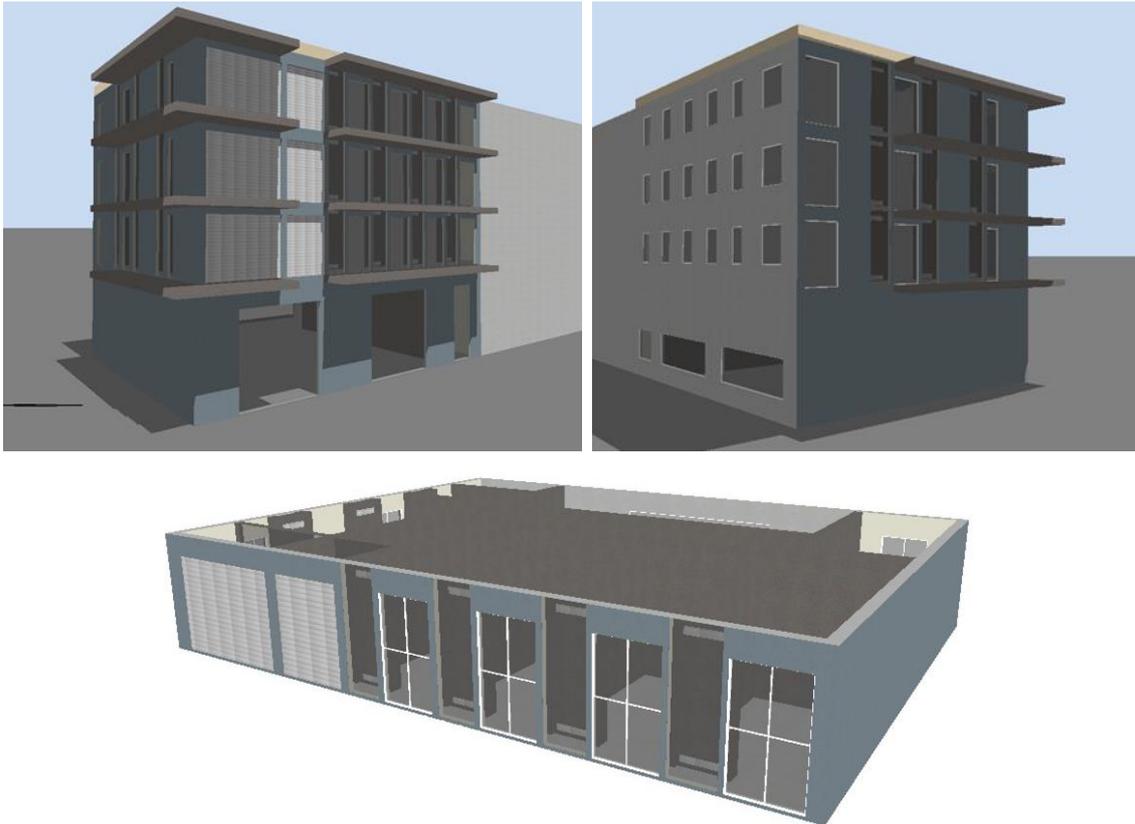
<sup>15</sup> La inercia térmica mide la cantidad de calor que el edificio puede conservar y la velocidad con que la cede o absorbe. La inercia térmica del edificio, efecto del factor tiempo y del régimen variable de temperaturas, permite controlar la amplitud de las variaciones de la temperatura interna respecto de las oscilaciones de la temperatura externa. La inercia térmica se puede controlar mediante la transmisión de calor por medio de la envolvente y a través de la absorción del calor por medio de la masa en contacto con el ambiente interior (materiales y objetos). La inercia por transmisión se caracteriza por la capacidad que tienen los materiales de retener o ceder el calor entrante o saliente en el ciclo considerado, que puede ser diario (acumula de día y cede de noche), semanal o anual (acumula en verano y cede en invierno). En la inercia por absorción interviene la masa en contacto con el ambiente interior que acumula y cede el flujo de calor. En este caso de estudio solamente se controla la inercia por la transmisión del flujo de calor a través de la envolvente térmica.

Muro cámara aire				Muro con aislamiento				Muro trombe			
	E (m)	$\lambda$ (W/mK)	R:e/ $\lambda$ (m <sup>2</sup> K/W)		E (m)	$\lambda$ (W/mK)	R:e/ $\lambda$ (m <sup>2</sup> K/W)		E (m)	$\lambda$ (W/mK)	R:e/ $\lambda$ (m <sup>2</sup> K/W)
Rse			0,04	Rse			0,04	Rse			0,04
Ladrillo	0,1	0,85	0,12	Mortero	0,02	0,32	0,0625	Policarbonado celular	0,02	0,2	0,1
				Bloque de hormigon celular	0,15	0,12	1,25	Camara ligeramente ventilada	0,1		0,085
								Mortero	0,02	0,32	0,063
Camara no ventilada	0,05		0,18	Camara no ventilada	0,1		0,17	Bloque de hormigon celular	0,2	0,12	1,67
Bloque de hormigon celular	0,1	0,12	0,83	Lana natural	0,05	0,043	1,16	Lana natural	0,08	0,043	1,86
Placa de yeso laminado	0,013	0,25	0,052	Placa de yeso laminado	0,02	0,25	0,08	Placa de yeso laminado	0,015	0,25	0,06
Rsi			0,13	Rsi		0,13	0,13	Rsi			0,13
<b>R (m<sup>2</sup>K/W)</b>			<b>1,35</b>	<b>R (m<sup>2</sup>K/W)</b>			<b>2,90</b>	<b>R (m<sup>2</sup>K/W)</b>			<b>4,00</b>
<b>U= 1/R (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,74</b>	<b>U= 1/R (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,35</b>	<b>U= 1/R (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,25</b>

**Tabla 9.** Descripción de los diversos sistemas constructivos de la fachada sur (cálculo de los valores de transmitancia unitaria).

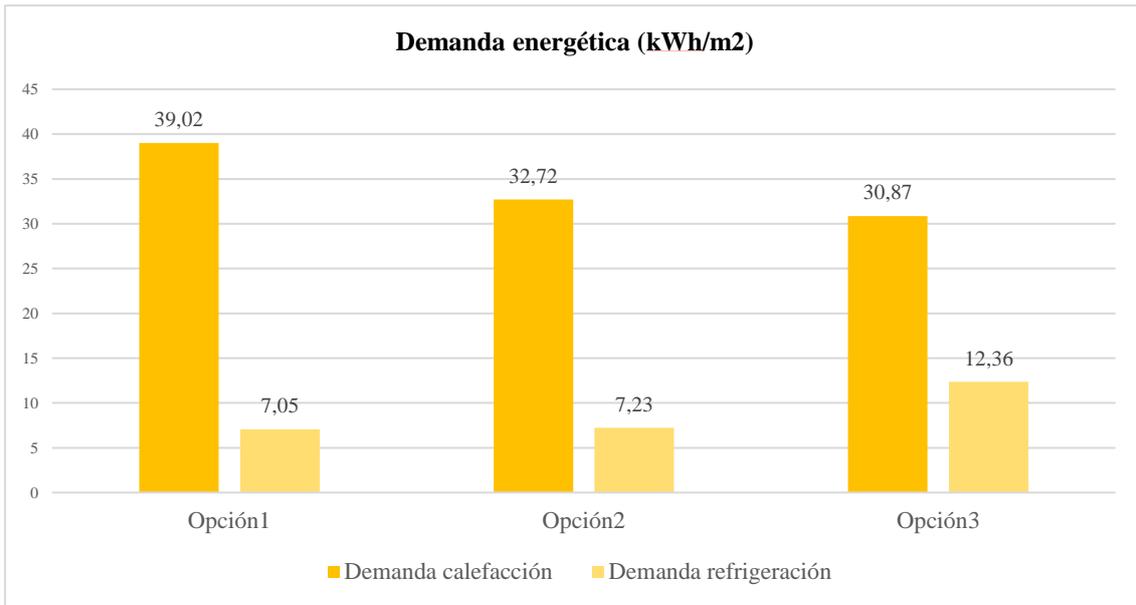


**Figura 31.** Modelo realizado con DesignBuilder. Opción 1: muro con cámara de aire. Opción 2: muro con cámara de aire y aislamiento.



**Figura 32.** Modelo realizado con DesignBuilder. Opción 3: el muro Trombe consiste de módulos de 1 metro. Horario de funcionamiento del muro Trombe: durante el invierno en función desde 9:00h hasta 18:00; durante el verano sin funcionar. Para el cálculo de la ventilación natural en verano se ha usado el algoritmo de convección (*Adaptive Convection Algorithm*), para el cálculo en invierno se ha adoptado el algoritmo de cavidad (*Cavity Algorithm*). Fuente: Elaboración propia.

**Evaluación de variantes de la estratificación de la envolvente.** Los resultados del cálculo realizado para cada tipo de envolvente en la fachada sur (Figura 33) (Tabla 10) evidenciaron que el muro con buen aislamiento (opción 2) permitía reducir de forma sustancial la demanda energética de calefacción del edificio respecto a un muro convencional sin aislamiento (opción 1). A través de los cálculos también se pudo apreciar que los valores de la demanda de calefacción del edificio con muro Trombe (opción 3) eran muy similares a los valores proporcionados por un muro bien aislado (opción 2), pero suponían en cambio un significativo empeoramiento de la demanda de refrigeración. Así, la solución de un muro bien aislado es la ideal, pues permite reducir la demanda de calefacción del edificio y controlar al mismo tiempo el sobrecalentamiento en los meses de verano. Estos resultados llevaron a cuestionar la decisión de utilizar el muro Trombe que se tomó al principio del proceso de proyecto convencional en base a la experiencia de los proyectistas, o la negativa a utilizar un sistema de aire acondicionado para contrarrestar el sobrecalentamiento en los meses de verano. Según los datos de simulación, de hecho, un sistema de aire acondicionado es necesario para complementar el muro Trombe.



**Figura 33.** Gráfico comparativo de la demanda energética de calefacción y refrigeración en los diversos sistemas constructivos utilizados para diversas opciones de tratamiento material de la fachada sur del edificio.

TABLA COMPARATIVA DE LA DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m <sup>2</sup> )						
	Opción 1 Muro con cámara de aire		Opción 2 Muro con aislamiento		Opción 3 Muro Trombe	
	Demanda calefacción	Demanda refrigeración	Demanda calefacción	Demanda refrigeración	Demanda calefacción	Demanda refrigeración
	(KWh)	(KWh)	(KWh)	(KWh)	(KWh)	(KWh)
Enero	6345,89	0	5352,23	0	5135,08	0
Febrero	4568,94	0	3768,99	0	3540,59	0
Marzo	3656,82	0	3059,43	0	2766,45	0
Abril	2318,60	0	1918,65	0	1757,91	0
Mayo	0	2,18	0	4,98	0	150,15
Junio	0	409,67	0	396,15	0	1020,88
Julio	0	1825,92	0	1752,70	0	2800,21
Agosto	0	2294,69	0	2144,73	0	3154,02
Septiembre	0	507,10	0	564,61	0	1182,55
Octubre	896,92	0	812,90	0	795,89	0
Noviembre	3356,21	0	2829,60	0	2681,67	0
Diciembre	5090,32	0	4260,63	0	4076,61	0
<b>TOT (anual)</b>	<b>26233,70</b>	<b>5039,55</b>	<b>22002,44</b>	<b>4863,16</b>	<b>20754,19</b>	<b>8307,80</b>
<b>Superficie acondicionada (m<sup>2</sup>)</b>	<b>672,35</b>	<b>672,35</b>	<b>672,35</b>	<b>672,35</b>	<b>672,35</b>	<b>672,35</b>
<b>Valor unitario de demanda (KWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>39,02</b>	<b>7,50</b>	<b>32,72</b>	<b>7,23</b>	<b>30,87</b>	<b>12,36</b>
<b>Valor unitario de demanda conjunta (KWh/m<sup>2</sup>)</b>	<b>46,52</b>		<b>39,95</b>		<b>43,23</b>	

**Tabla 10.** Resultados del cálculo de la demanda energética en los diversos sistemas constructivos utilizados para diversas opciones de tratamiento material de la fachada sur del edificio.

**Valoración de la herramienta de simulación energética aplicada en la etapa de proyecto ejecutivo.** A lo largo del proceso de proyecto alternativo se pudo constatar que Vasari no proporciona datos cuantitativos sobre algunas prestaciones del edificio y que Ecotect tiene limitaciones en el método del cálculo térmico, mientras que DesignBuilder dispone de la interfaz de usuario más completa para EnergyPlus, uno de los motores de cálculo más precisos basado en el método de simulación dinámica HB (*Heat Balance Method*). Sin embargo, DesignBuilder, no proporciona la flexibilidad necesaria para introducir cambios en el modelo energético del edificio, y el cálculo requiere de mucho más tiempo que las otras herramientas. Así, debido a que DesignBuilder requiere información detallada del modelo, no se ha utilizado en las fases iniciales del proceso.

Por medio de las simulaciones realizadas a lo largo del proceso de proyecto se pusieron en duda algunas decisiones tomadas en el proyecto original. Sin embargo, para poder afirmar que una propuesta alternativa es más eficaz que la construida, hay que demostrar que los datos obtenidos de una simulación son fiables. Para realizar una simulación, de hecho, se asume un cierto comportamiento del usuario (horarios de ocupación, patrón de consumo, etc.) que puede no coincidir con la realidad. Para paliar esta deficiencia, y poder calibrar la simulación, se compararon los datos de simulación con los datos obtenidos de la monitorización del edificio en uso.

### **4.2.3 Comparación de datos calculados y monitorizados del edificio en uso**

Durante un periodo de tres años, el grupo CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería) monitorizó viviendas de los dos tipos (R y L) con el objetivo de verificar la eficiencia de las instalaciones de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS), y controlar el consumo eléctrico. Los datos de monitorización proporcionados por CIMNE fueron analizados con el fin de examinar la influencia del muro Trombe en la demanda energética del edificio y el comportamiento térmico de los dos tipos de viviendas. De este modo se podría confirmar la coherencia de los datos de la simulación energética y las principales conclusiones obtenidas a través de ellos.

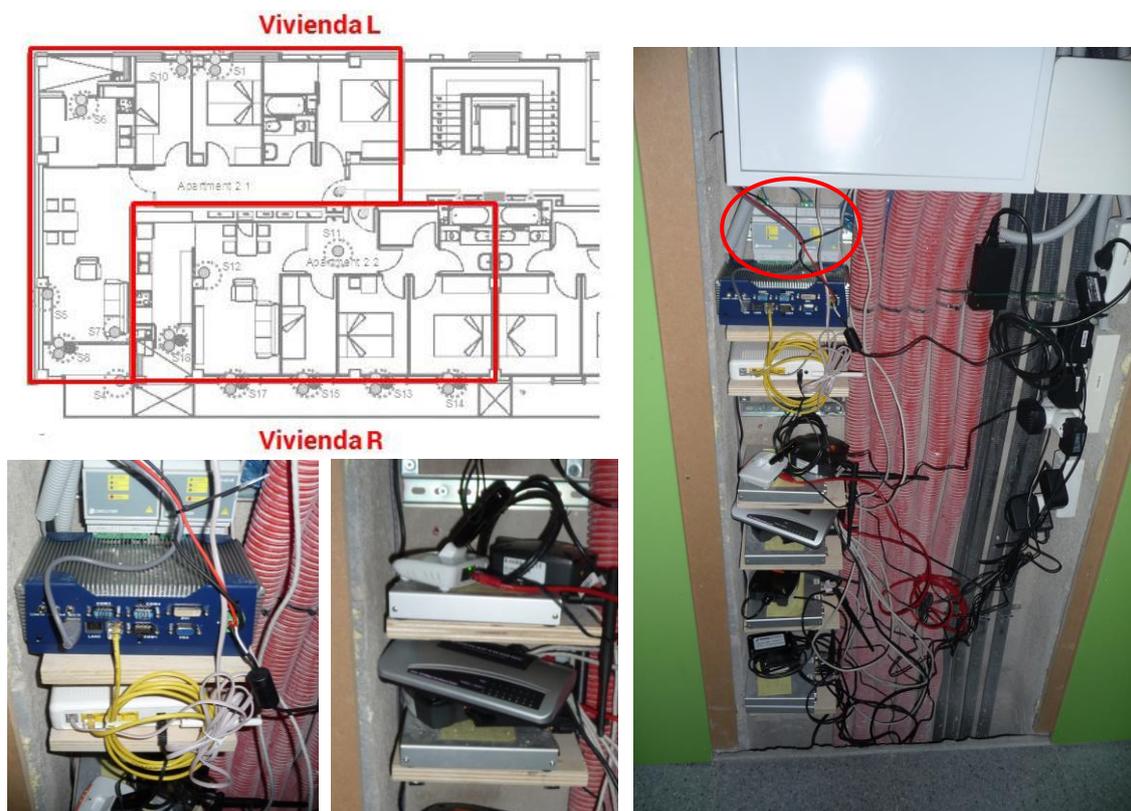
#### **4.2.3.1 Adquisición de datos: equipos de medición y registro**

CIMNE instaló dispositivos de medición en dos viviendas de la segunda planta del edificio para el registro de valores instantáneos a cada hora del día de temperaturas internas, consumo eléctrico, caudal de agua (calefacción y agua caliente sanitaria) (Figura 34). Los dispositivos que se instalaron en el comedor y en una habitación son los siguientes:

- analizadores de redes eléctricas para medir la potencia y energía activa consumida por los equipos, iluminación y enchufes;
- caudalímetros (calefacción, agua caliente sanitaria y aporte de solar térmica) y sondas de temperaturas de impulsión y retorno del circuito;
- sensores de temperaturas ambientales (*data logger*) en el comedor y en una habitación.

Para los fines de este estudio, se consideraron los datos de la temperatura ambiental interior (MEDID\_AN1, MEDID\_AN2), caudal de agua para la calefacción

(CNT\_PULS1) y temperaturas de impulsión y retorno del circuito de calefacción (MEDID\_AN4, MEDID\_AN3) (Tabla 11). Mediante ecuaciones se calculó la energía térmica útil consumida por la calefacción (Tabla 12).<sup>16</sup>



**Figura 34.** Disposición de los sensores de medición en las dos viviendas de tipo L y R. Dispositivos de medición: analizadores de redes eléctricas para circuitos monofásicos; pinzas para la medición del consumo de equipos, enchufes e iluminación; termóstato y sensor de temperatura ambiental. Fuente: Fidela Frutos y Josep Maria Sanmartin.

<sup>16</sup> Calculo de energía térmica útil consumida en calefacción:  $Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T = (V \cdot \rho) \cdot C_e \cdot \Delta T$   
 $Q = [CNT\_PULS1(1) \cdot 1(Kg/l)] \cdot 4,18 (J/g \cdot K) \cdot [(MEDID\_AN4 - MEDID\_AN3)(^{\circ}C)] =$   
 $= [CNT\_PULS1(1) \cdot 1000 (g/l)] \cdot 4,18 (J/g \cdot K) \cdot [(MEDID\_AN4 - MEDID\_AN3) (k)] =$   
 $= CNT\_PULS1 \cdot 1000 \cdot (MEDID\_AN4 - MEDID\_AN3) \cdot 4,18 (J) =$   
 $= CNT\_PULS1 \cdot 1000 \cdot (MEDID\_AN4 - MEDID\_AN3) \cdot 4,18 (Ws) =$   
 $= CNT\_PULS1 \cdot 1000 \cdot (MEDID\_AN4 - MEDID\_AN3) \cdot 4,18 \cdot (1/1000) \cdot (1/3600)(kWh) =$   
 $= CNT\_PULS1 \cdot 1000 \cdot (MEDID\_AN4 - MEDID\_AN3) \cdot 4,18 \cdot (1/1000) \cdot (1/3600)(kWh) =$   
 $= CNT\_PULS1 \cdot (MEDID\_AN4 - MEDID\_AN3) \cdot 4,18 \cdot (1/3600) (kWh) =$   
 $= CNT\_PULS1 \cdot (MEDID\_AN4 - MEDID\_AN3) \cdot 4,18 \cdot (1/900) \cdot 0,25 (kWh)$

CONSUMO ELÉCTRICO (kWh)			CAUDAL AGUA (l)	
<b>CNT_ENERGA1</b> Energía activa consumida en iluminación	<b>CNT_ENERGA2</b> Energía activa consumida en enchufes	<b>CNT_ENERGA3</b> Energía activa consumida en equipos	<b>CNT_PULS1</b> Caudal de agua de calefacción (1sec=1litro)	<b>CNT_PULS2</b> Caudal de agua de ACS (1 sec=1litro)
<b>MEDID_P1</b> Potencia activa consumida en iluminación	<b>MEDID_P2</b> Potencia activa consumida en enchufes	<b>MEDID_P3</b> Potencia activa consumida en equipos		
TEMPERATURAS (°C)				
<b>MEDID_AN1</b> Tª ambiente comedor	<b>MEDID_AN2</b> Tª ambiente habitación			
<b>MEDID_AN3</b> Tª retorno calefacción	<b>MEDID_AN4</b> Tª impulsión calefacción	<b>MEDID_AN5</b> Tª ACS antes de la caldera	<b>MEDID_AN6</b> Tª ACS solar antes de la caldera	<b>MEDID_AN7</b> Tª ACS después de la caldera

**Tabla 11.** Dispositivos de medición implantados en las dos viviendas.

OPERACIONES	
Energía consumida por la calefacción (kWh)	$(MA4-MA3) \times CNT\_PULS1 \times 4,18 \times (1/900) \times 0,25$
Energía consumida por ACS (kWh)	$(MA7-MA6) \times CNT\_PULS2 \times 4,18 \times (1/900) \times 0,25$
Aporte de energía solar al ACS (kWh)	$(MA6-MA5) \times CNT\_PULS2 \times 4,18 \times (1/900) \times 0,25$

**Tabla 12.** Operaciones de cálculo de la energía consumida.

#### 4.2.3.2 Estudio y análisis de los datos monitorizados

Con los datos monitorizados de temperatura ambiental interior y consumos de calefacción, se llevaron a cabo los siguientes análisis:

- a) verificación de la influencia del muro Trombe en la demanda energética del edificio;
- b) verificación del comportamiento térmico de los dos tipos de vivienda (R y L).

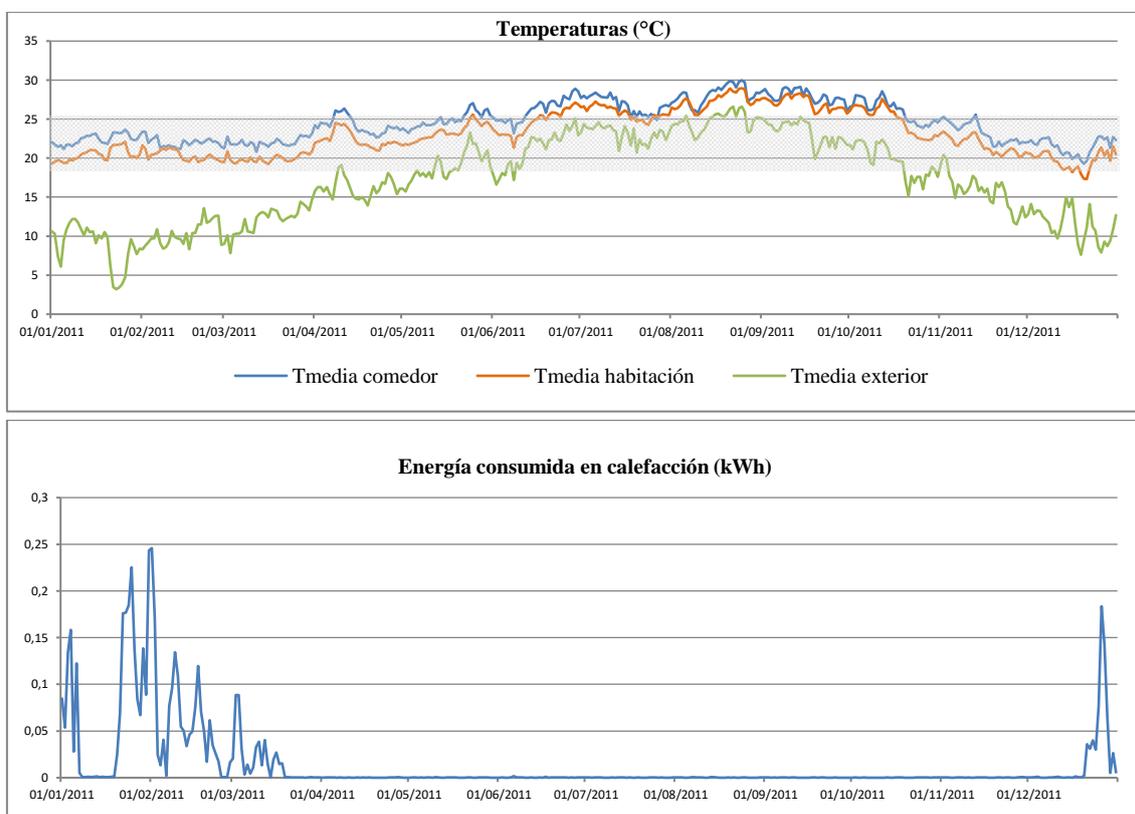
En ambos análisis se comparó la temperatura ambiental interior de las viviendas con la temperatura exterior. Por ello, se recuperaron los valores históricos de la temperatura media diaria de Barcelona.<sup>17</sup> Para identificar las condiciones en las que fue necesario el aporte del sistema de calefacción, se analizó la energía térmica útil consumida por el uso de la calefacción.

##### *a) Verificación de la influencia del muro Trombe en la demanda energética*

Para verificar la influencia del muro Trombe en la demanda energética del edificio, se analizaron los datos de medición que fueron recogidos por CIMNE a lo largo de tres años en una de las dos viviendas monitorizadas. Se optó por estudiar el comportamiento de la vivienda de tipo R, en la que se había instalado el sistema de muro Trombe en su fachada sur, tanto en el comedor como en una habitación. Del análisis de los datos de medición se extrajo el perfil de temperatura media interior de la vivienda y se comparó con el perfil de la temperatura media exterior (Figura 35, Figura 36 y **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El gráfico de temperaturas se comparó a su vez con el gráfico de energía consumida por el uso de la calefacción, para saber en qué momento la temperatura interior de la vivienda cambiaba por el aporte del sistema de calefacción.

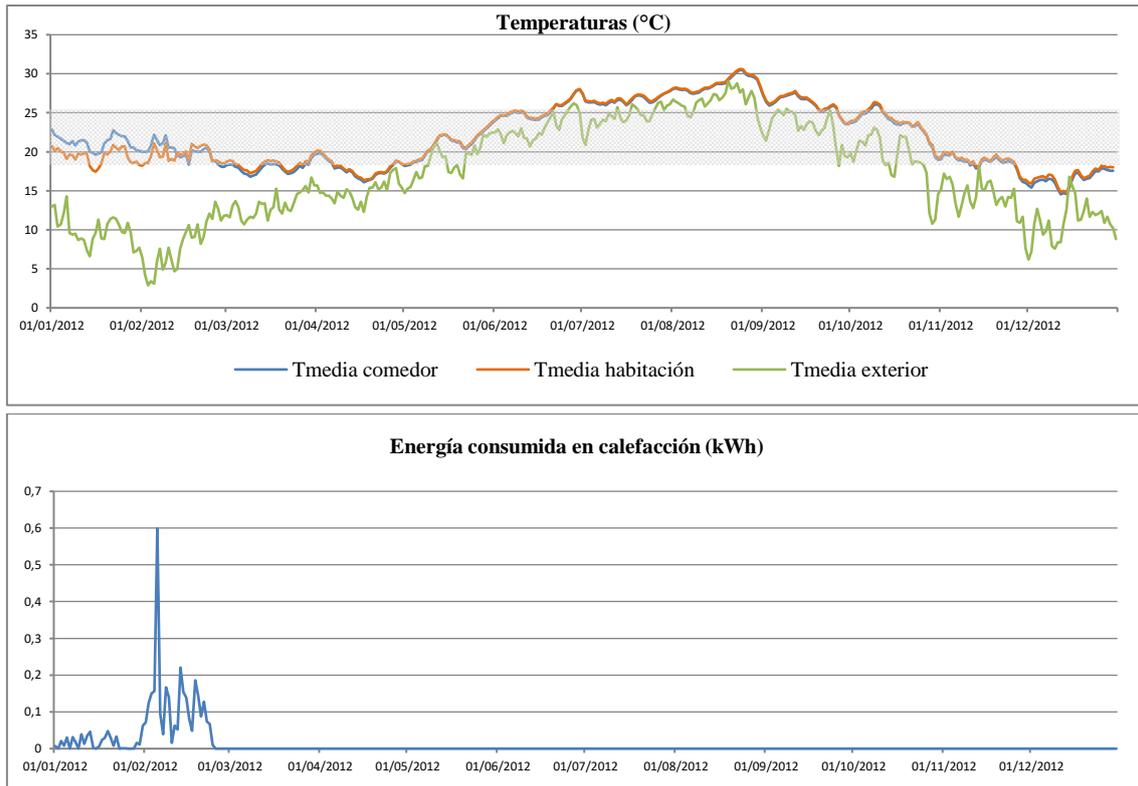
<sup>17</sup> Datos de la estación meteorológica LEBL 81810 (Latitud: 41.28, Longitud: 2.06, Altitud: 4), extrapolados del repositorio de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Los gráficos extraídos de los datos de medición muestran que las temperaturas interiores de las viviendas son más estables y no siguen las continuas fluctuaciones de la temperatura exterior. Durante los meses invernales, gracias a la inercia del muro Trombe, el perfil de la temperatura interna se mantiene constante entre 5 y 8 °C por encima de la temperatura exterior, ayudando así a reducir el consumo en calefacción. De hecho, solo se ha recurrido al sistema de calefacción durante los días en los que se han registrado un descenso sustancial en las temperaturas medias diaria. Por otro lado, de los mismos gráficos se puede deducir que durante los meses de verano la inercia del muro Trombe causa un sobrecalentamiento de la vivienda. Durante este periodo (junio, julio y agosto), la temperatura interna ambiental de la vivienda resulta superior a la temperatura media exterior, por lo que la temperatura interior sobrepasa sistemáticamente la zona de confort (26 °C).<sup>18</sup> De este estudio se puede concluir que el muro Trombe ayuda a reducir la demanda de calefacción, pero no contribuye a reducir, o incluso llega a incrementar, la demanda de refrigeración.

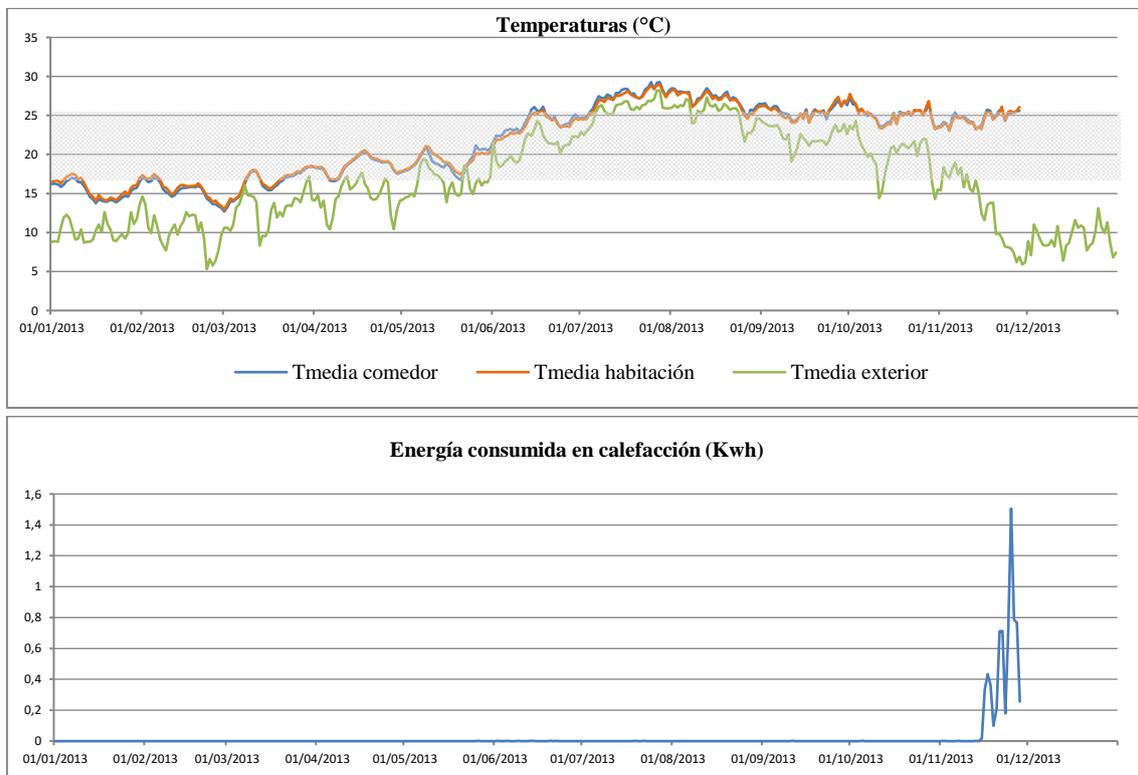


**Figura 35.** Año 2011, vivienda de tipo R. Gráfico comparativo de las temperaturas medias interior y exterior (°C), en color gris la franja de confort térmico (18-26°C). Gráfico de energía consumida en calefacción (kWh). Fuente: Gráficos de elaboración propia obtenidos a partir del análisis de los datos proporcionados por CIMNE.

<sup>18</sup> En este caso, los datos de monitorización no ofrecen información sobre los patrones de uso: no sabemos si los efectos negativos del muro Trombe derivan de sus características o del mal uso del usuario (por ejemplo, apertura y cierre de las compuertas interiores en invierno y verano).



**Figura 36.** Año 2012, vivienda de tipo R. Gráfico comparativo de las temperaturas medias interior y exterior (°C), en color gris la franja de confort térmico (18-26°C). Gráfico de energía consumida en calefacción (kWh). Fuente: Gráficos de elaboración propia obtenidos a partir del análisis de los datos proporcionados por CIMNE.

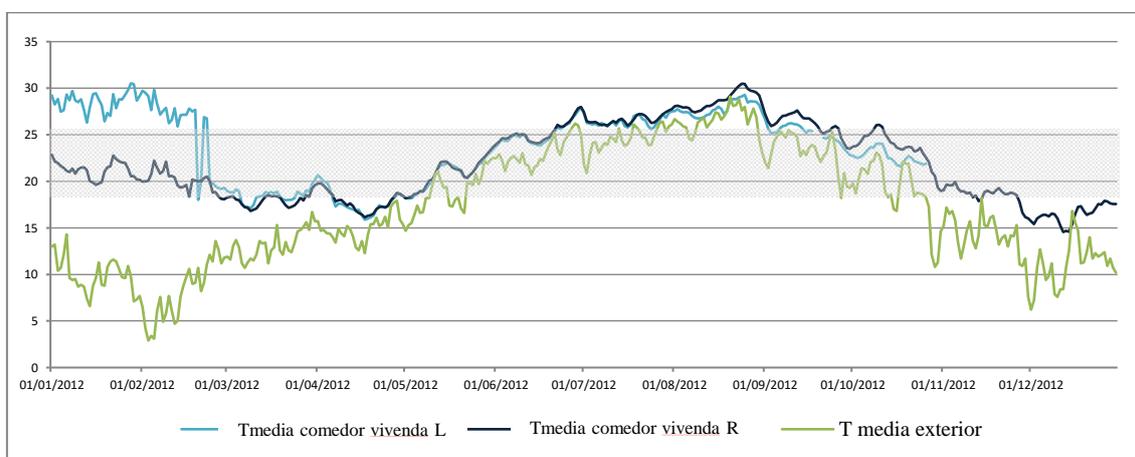


**Figura 37.** Año 2013, vivienda de tipo R. Gráfico comparativo de las temperaturas medias interior y exterior (°C), en color gris la franja de confort térmico (18-26°C). Gráfico de energía consumida en

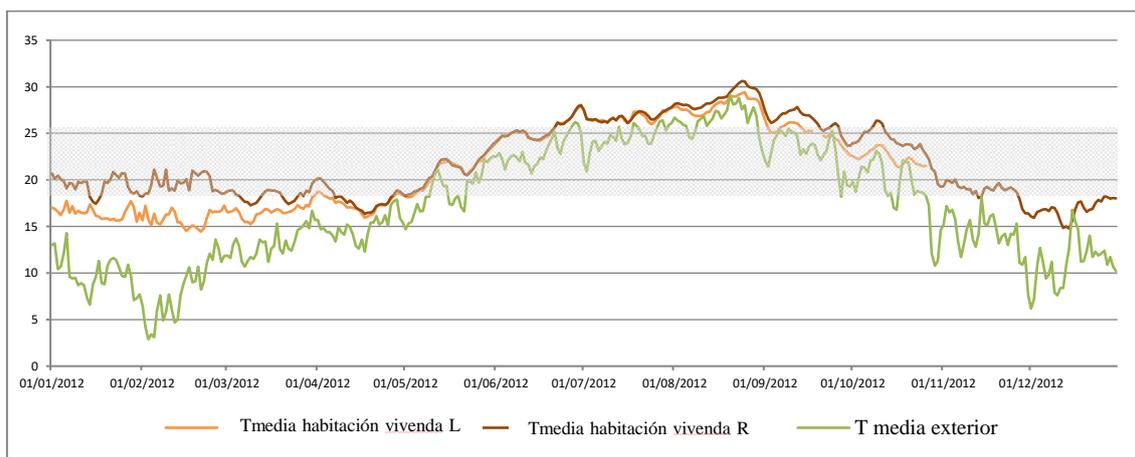
calefacción (kWh). Fuente: Gráficos de elaboración propia obtenidos a partir del análisis de los datos proporcionados por CIMNE.

**b) Verificación del comportamiento térmico de los dos tipos de vivienda**

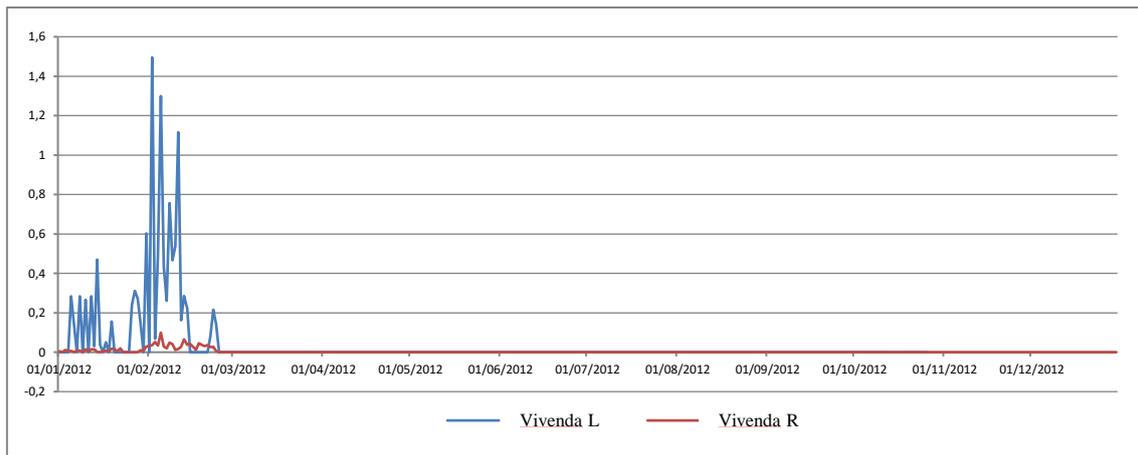
Las dos viviendas (tipos R y L) se caracterizan por tener una distribución diferente de sus espacios y la orientación. La vivienda tipo L está orientada parcialmente al sur: el comedor está orientado a sureste, y tiene instalado el muro Trombe solo en la pared este, mientras que la habitación está orientada al norte y cierra con un muro tradicional bien aislado; la vivienda tipo R cuenta con el comedor y la habitación orientados a sur, ambos con muro Trombe. Para analizar el comportamiento térmico de las dos viviendas, se compararon los perfiles de la temperatura media interior del comedor y la habitación, así como los respectivos consumos de calefacción (Figura 38, Figura 39 y Figura 40) a lo largo del año 2012.



**Figura 38.** Año 2012: gráfico comparativo del perfil de temperatura del comedor de la vivienda de tipo L y R. En color gris la franja de confort térmico (18-26°C). Fuente: Gráfico de elaboración propia obtenidos a partir del análisis de los datos proporcionados por CIMNE.



**Figura 39.** Año 2012: gráfico comparativo del perfil de temperatura de la habitación de la vivienda de tipo L y R. En color gris la franja de confort térmico (18-26°C). Fuente: Gráfico de elaboración propia obtenidos a partir del análisis de los datos proporcionados por CIMNE.

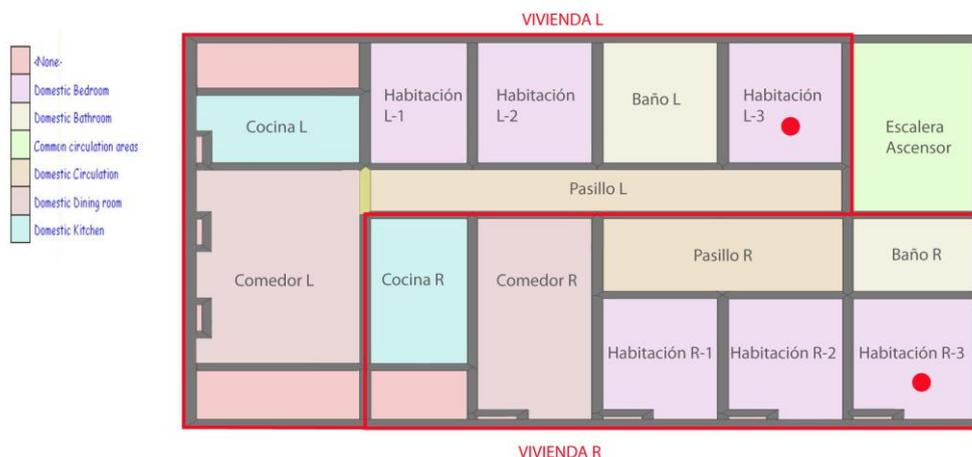


**Figura 40.** Año 2012: gráfico comparativo del perfil de energía útil consumida en calefacción de la vivienda de tipo L y R. Fuente: Gráfico de elaboración propia obtenidos a partir del análisis de los datos proporcionados por CIMNE.

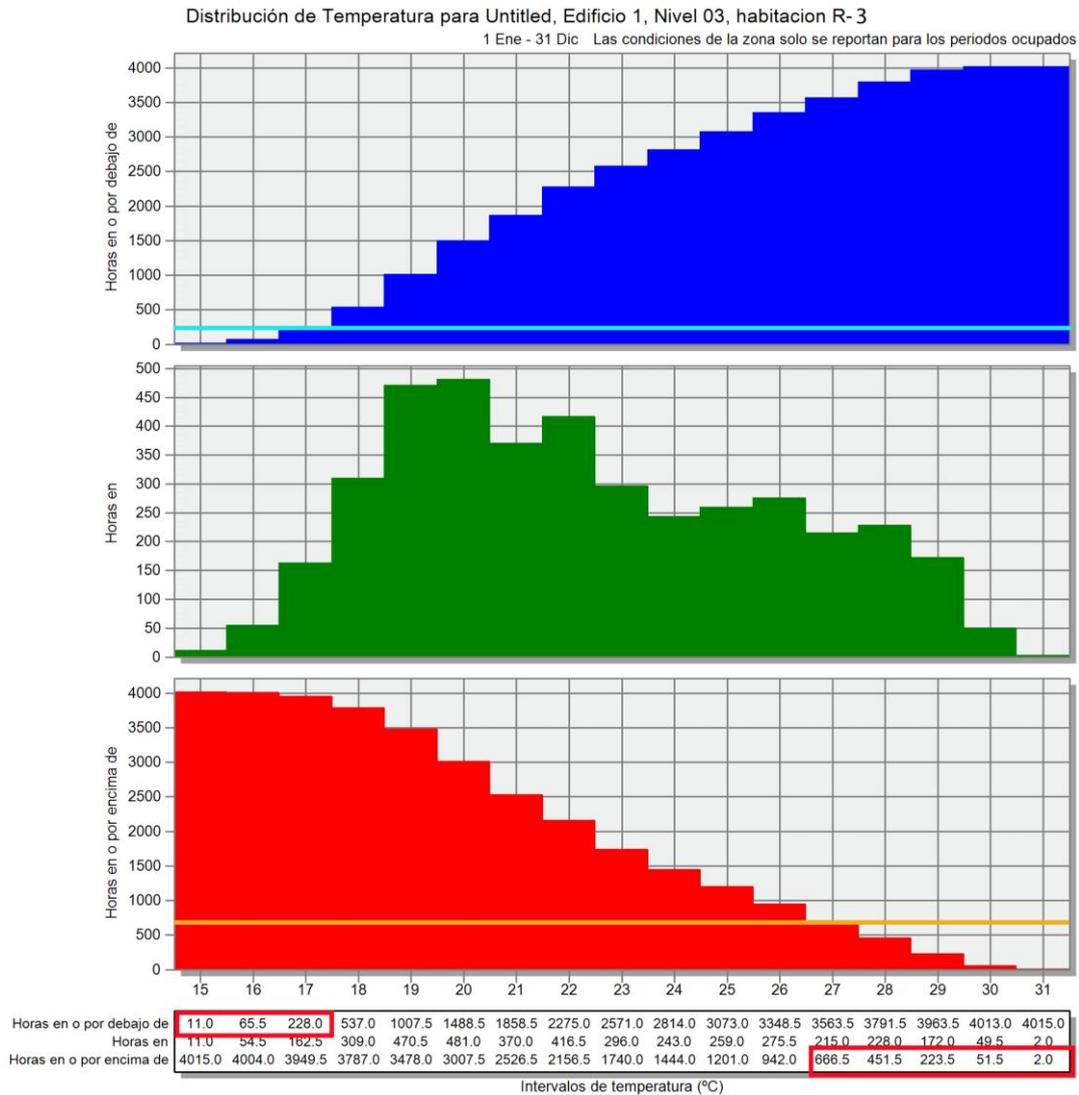
Comparando los perfiles de temperatura que se obtienen de los datos medidos en las dos viviendas, se puede llegar a la conclusión de que ambas tienen un comportamiento muy similar verano, aunque en la vivienda de tipo R aumenta el riesgo de sobrecalentamiento, probablemente debido a la mayor superficie de la envolvente expuesta a sur. Sin embargo, hay que señalar una diferencia positiva en el comportamiento de la vivienda de tipo R que durante los meses invernales consume menos energía en la calefacción que la del tipo L. El alto consumo de la vivienda L se debe principalmente al mal uso de sus habitantes, que han mantenido la temperatura interior por encima de los 30 °C en el comedor. Este dato es significativo, ya que indica que los usuarios de la vivienda L necesitan consumir más para alcanzar el mismo nivel de confort, probablemente debido a la orientación y distribución de la vivienda. De hecho, se puede notar que, pese a un mayor consumo en calefacción, en la habitación de la vivienda L la temperatura resulta más baja que en la vivienda de tipo R, es decir que la vivienda L no se calienta con uniformidad y necesita más aporte de calor para alcanzar el mismo nivel de confort térmico. La diferencia de orientación y distribución, por tanto, es la principal razón del distinto comportamiento energético de las dos viviendas.

#### 4.2.3.3 Validación de los datos de simulación

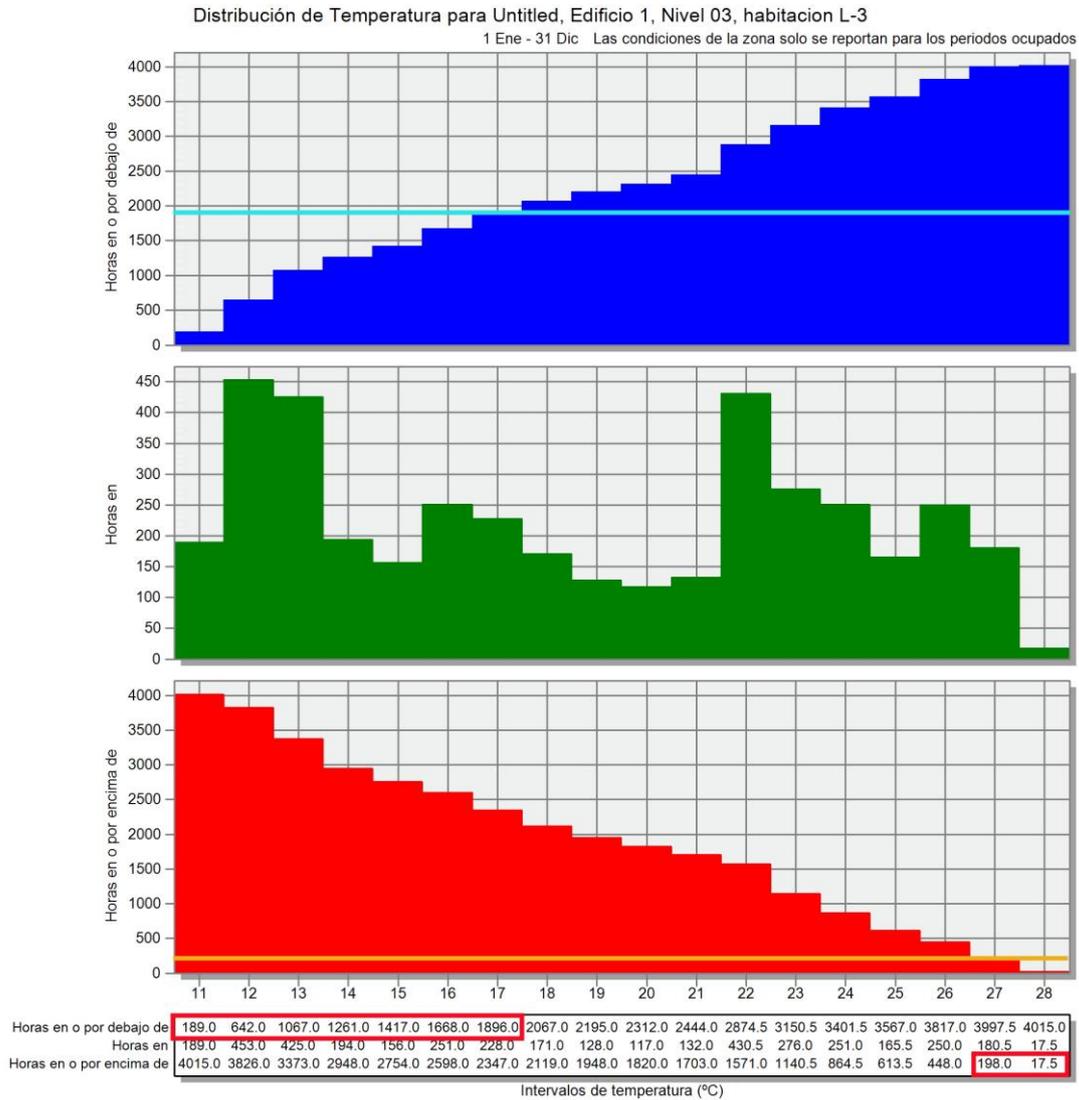
Los datos obtenidos de la monitorización del edificio confirman los resultados de la simulación energética realizada durante la última fase del proceso de proyecto reproducido en el caso de estudio, al mismo tiempo que avalan las principales conclusiones a las que se había llegado. De hecho, los resultados de la simulación realizada con DesignBuilder mostraban que los dos tipos de vivienda del edificio (L y R) tienen un reparto no uniforme de los consumos en calefacción (Figura 41): la simulación energética realizada en una habitación de la vivienda R dio cuenta de que las horas por debajo de la zona de confort representan un 5% de las horas ocupadas durante el año, mientras que las horas por encima de la misma suponen un 16% (Figura 42); y de la simulación energética realizada en una habitación de la vivienda L se concluyó que las horas por debajo de la zona de confort representan un 47% de las horas ocupadas durante el año, mientras que las horas por encima de la misma suponen un 4% (Figura 43).



**Figura 41.** Modelo energético de la vivienda L y R con indicadas las habitaciones analizadas (DesignBuilder). Fuente: Elaboración propia.

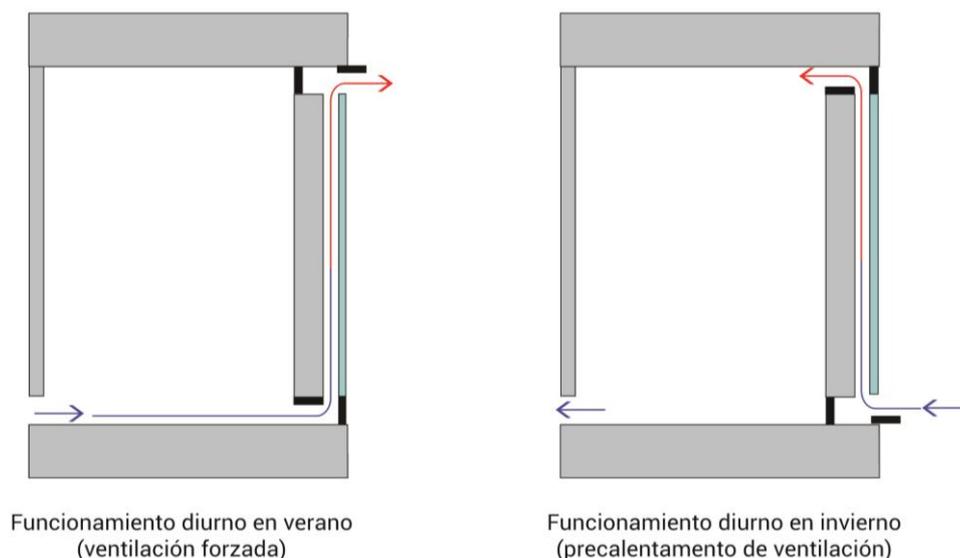


**Figura 42.** Gráfico de distribución de la temperatura operativa, calculado con DesignBuilder en la habitación R3, en la que se ha instalado el muro Trombe. Cuantificación de horas en las que la temperatura operativa está por debajo de los 18°C en invierno ( $228/4015=5\%$ ) y por arriba de los 26 °C en verano ( $666,5/4015=16\%$ ). En el centro del gráfico se muestran las horas en las que la temperatura operativa está en la zona de confort (18-26 °C).



**Figura 43.** Gráfico de distribución de la temperatura operativa, calculado con DesignBuilder en la habitación L4, donde no se ha instalado el muro Trombe. Cuantificación de horas en las que la temperatura operativa está por debajo de los 18°C en invierno ( $1896/4015=5\%$ ) y por arriba de los 26 °C en verano ( $198/4015=16\%$ ). En el centro del gráfico se muestran las horas en las que la temperatura operativa está en la zona de confort (18-26 °C).

Los resultados de la simulación indicaron que en la habitación R3 (vivienda R) las horas por encima de la zona de confort superan a las horas por debajo de la zona de confort. Esto significa que el muro Trombe ha influido positivamente en la demanda de calefacción, pero ha empeorado la demanda de refrigeración. Puede concluirse por tanto que, en una localidad de clima mediterráneo, el rendimiento de este sistema pasivo es óptimo en invierno, pero desventajoso en verano.<sup>19</sup> Después de este diagnóstico realizado por medio de los datos de monitorización, en el proyecto alternativo se propuso como medida de mejora del edificio existente (*retrofitting measure*) la instalación de un sistema de aire acondicionado o la inclusión de unas compuertas en el panel exterior del muro Trombe para conseguir un muro parietodinámico/chimenea solar, un sistema que permite aprovechar la corriente convectiva creada por el cristal colocado delante de la fachada para succionar aire caliente del interior de la vivienda (efecto chimenea) (Figura 44).<sup>20</sup> De esta forma se aprovecharía la energía solar en invierno para calentar la vivienda (muro Trombe) y en verano para realizar una ventilación forzada (muro parietodinámico).



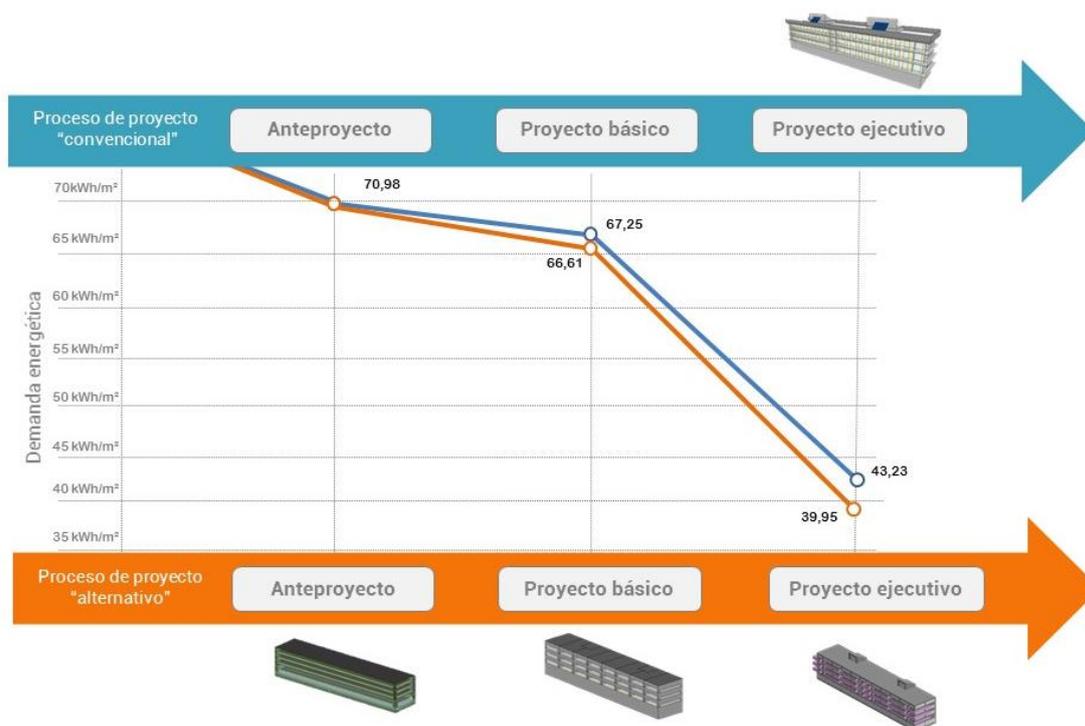
**Figura 44.** Funcionamiento del muro parietodinámico. En verano es un sistema de ventilación forzada, en invierno precalienta el aire de ventilación. Fuente: Gráficos de elaboración propia.

<sup>19</sup> A esta misma conclusión llegaron Francesca Stazi, Alessio Mastrucci y Costanzo di Perna, quienes midieron las prestaciones en muros tipo invernadero monitorizando edificios residenciales con diferentes grados de aislamiento térmico. Este estudio se concluyó que el comportamiento del muro Trombe en edificios residenciales en clima mediterráneo es óptimo en invierno, pero en verano puede producir sobrecalentamiento (Stazi, Mastrucci, & Di Perna, 2012).

<sup>20</sup> En el Documento Básico Ahorro de Energía (DB-HE) del Código Técnico de la Edificación (CTE) se define el muro parietodinámico o chimenea solar en estos términos: “Cerramiento que aprovecha la energía solar para el precalentamiento del aire exterior de ventilación. Generalmente está formado por una hoja interior de fábrica, una cámara de aire y una hoja exterior acristalada o metálica que absorbe la radiación solar. La circulación del aire puede ser natural (termosifón) o forzada” (Ministerio de la Vivienda, 2006, pág. 24).

### 4.3 Comparación de los resultados de los dos procesos de proyecto

Si se compara el proceso de proyecto convencional con el proceso alternativo propuesto pueden extraerse algunas conclusiones. En el proyecto original, las decisiones fueron tomadas exclusivamente en base al conocimiento y la experiencia de los arquitectos, y la simulación energética se usó únicamente para verificar que la propuesta definitiva cumpliera con los requisitos de las prestaciones. Por el contrario, en el proceso alternativo aplicado en este trabajo de investigación empleó la simulación energética, además del conocimiento del arquitecto, para valorar etapa por etapa distintas alternativas al proyecto original. Durante la primera etapa del proceso de proyecto, las propuestas –construida y alternativa – resultaron ser muy similares. Las diferencias empezaron a surgir a partir de la etapa de proyecto básico, cuando las decisiones proyectuales afectan a un mayor número de componentes del sub-sistema edificio (Figura 45). De la comparación de los resultados finales obtenidos en ambos procesos puede concluirse que una distribución distinta de la vivienda y una solución constructiva diferente para la fachada sur del edificio, permitirían reducir el valor de la demanda energética.

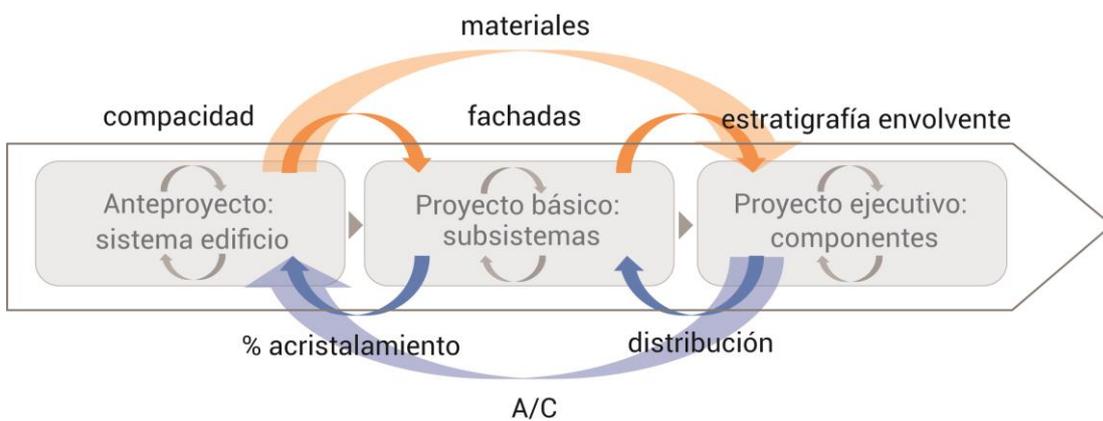


**Figura 45.** Comparación del proyecto convencional con el proyecto alternativo en base a los valores de demanda energética conjunta (calefacción y refrigeración). Los valores de demanda energética de las diversas propuestas, incluso aquellas empleadas en el proyecto construido, se han obtenido por medio de las simulaciones realizada durante el proceso de proyecto reproducido en el caso de estudio. Fuente: Gráfico de elaboración propia.

Los resultados de esta comparación indican que no se precisan herramientas de simulación energética en todas las fases del proceso de proyecto. El conocimiento y la experiencia del arquitecto fueron suficientes para tomar algunas decisiones básicas iniciales, como la compacidad, la orientación y algunas consideraciones generales sobre el tratamiento de la fachada (% acristalamiento). En la etapa de proyecto básico se

tomaron decisiones que no influyeron de manera significativa en la demanda energética del edificio, como la distribución de la vivienda, por lo que no se aprecia una diferencia sustancial en las alternativas propuestas con respecto al proyecto realizado. Aun así, la simulación permitió demostrar que una variante del proyecto original garantizaba un reparto más equitativo del consumo en las diferentes viviendas. Asimismo, la simulación permitió optimizar el diseño de la fachada en función del comportamiento térmico del edificio, y reconsiderar algunas decisiones tomadas en la etapa inicial. Pero, pese a los resultados de la simulación, se tuvieron que tener en cuenta otros factores a la hora de definir la fachada y la distribución del edificio, como la estética o las costumbres de la comunidad local. Por ello, la distribución y diseño de fachada en el proyecto alternativo acabó siendo similar a la del edificio construido.

A medida que avanza el proceso de proyecto las decisiones se tornan más complejas. Por ello, no todas las decisiones encaminadas a mejorar la eficiencia energética del edificio se pueden tomar de manera intuitiva. Elegir los componentes y materiales se vuelve una tarea complicada a causa de la interacción dinámica de todos estos elementos que definen el edificio. Esto explica por qué en la etapa de proyecto ejecutivo se acentuó la divergencia entre los dos procesos, convencional y alternativo basado en DBP. Mediante la simulación se pudo constatar que en las condiciones climáticas de la zona donde se ubica el edificio, la solución técnica elegida en el proceso convencional (muro Trombe) no era la más adecuada, y que un muro bien aislado reducía la demanda energética del edificio. Así, tomando decisiones paso a paso en base a información cada vez más específica y detallada sobre el rendimiento del edificio, se reconsideraron decisiones tomadas en las fases anteriores, llegando a cuestionarse algunas de las decisiones tomadas en el proyecto convencional sobre la base de la experiencia personal de los arquitectos (Figura 46).



**Figura 46.** Progresión iterativa del proceso de toma de decisiones. Fuente: Gráfico de elaboración propia.

No obstante, y a pesar de que el proceso de proyecto convencional dio lugar a un edificio con una demanda de calefacción inferior al valor de referencia ( $43 \text{ kWh/m}^2$ ), los proyectistas se limitaron a proponer una solución técnica (muro Trombe) que, según su experiencia personal, garantizaba un resultado óptimo. Es decir, no se plantearon aplicar otras posibles soluciones. De hecho, los arquitectos usaron el mismo sistema constructivo

en proyectos anteriores, dando por hecho su eficacia. Y es probable que vuelvan a emplear la misma solución en proyectos futuros. Los resultados de la simulación, sin embargo, pusieron en duda estas decisiones basadas en experiencias previas. Por medio de la simulación se pudo verificar que el muro Trombe produce el aumento de la demanda de refrigeración hasta el punto de hacer necesario un sistema mecánico de refrigeración, lo que implicaría un mayor consumo energético.

En el proceso de proyecto reproducido en el caso de estudio la simulación permitió reconsiderar decisiones tomadas de manera apriorística (por ejemplo, el porcentaje de acristalamiento y la distribución de las viviendas) pero también verificar, etapa por etapa, si las decisiones tomadas permitían el cumplimiento de los objetivos propuestos. Para cada propuesta, los datos cuantitativos de la demanda energética del edificio se compararon con un valor de referencia. El valor de referencia de la demanda energética fue proporcionado por el promotor del proyecto, pero en un caso más general cabe plantearse: ¿Con qué criterios se determinan las prestaciones energéticas que ha de cumplir el edificio? Asimismo, en el proyecto reproducido en el caso de estudio se pudo tener acceso a datos de monitorización para verificar la fiabilidad de los datos de simulación, y así contrastar el proyecto con el edificio, algo que no hubiese sido posible en el proyecto original. Los datos de simulación se compararon con los datos medidos del edificio en uso (determinación del *performance gap*), de manera que se pudieron corroborar las decisiones tomadas en base a estos datos. Cabe preguntarse, por tanto, en el caso del proyecto de un edificio nuevo: ¿Cómo se validan los datos de simulación?

El sistema de información energética SEÍS, desarrollado por el grupo de investigación ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle en el marco del proyecto RÉPENER, puede ayudar a responder a estas preguntas. En cada etapa del proceso de proyecto, SEÍS permite acceder a información sobre edificios eficientes y valores de referencia (*benchmarks*) de eficiencia energética, que son útiles tanto para verificar el nivel de rendimiento de una propuesta, así como para comprobar si los datos de datos de simulación son creíbles.

## 4.5 Aplicación de SEÍS en el proceso de proyecto

Los servicios que facilita SEÍS están orientados a diferentes tipos de usuarios, como un equipo técnico de redacción de proyectos, un gestor de instalaciones, un propietario o un consultor energético (Figura 47).<sup>21</sup>

The screenshot shows the SEÍS website interface. At the top left is the SEÍS logo with the tagline "A Semantic Energy Information System to integrate building energy data". To the right is the logo for "laSalle ARQ Universidad Ramon Llull". A navigation bar contains links for HOME, DATA SOURCES, LINKED DATA, GLOSSARY, PREVIEW, TEAM, and a "Bring your data" button. The main content area features a text block about the R&D project REPENER, followed by four blue boxes representing user profiles: Design Team, Facilities Manager, Building Owner, and Energy Consultant. Each box lists specific services or projects. Below these is a text block explaining the four types of energy information services and a call to action for public administration, architectural or engineering firms, and energy service companies. At the bottom, there is a footer with project information and logos for the Spanish Government and the Ministry of Economy and Competitiveness.

**Figura 47.** SEÍS: interfaces orientados a diferentes tipos de usuarios. Fuente: <http://www.seis-system.org/>. © ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle.

El servicio de SEÍS para un consultor energético permite al usuario introducir datos de simulación en cualquier etapa del proceso de proyecto para luego compararlos con los datos de la monitorización de edificios similares a la propuesta, por ejemplo, con el mismo clima y programa de uso (Figura 48). De esta comparación pueden extraerse valores de referencia de eficiencia energética a medida para el proyecto (*energy performance benchmarks*), e indicaciones específicas para alcanzarlos.

Los datos de simulación energética obtenidos durante las primeras etapas del proyecto se introdujeron en SEÍS. Los datos de la propuesta elegida en esta etapa del

<sup>21</sup> Una descripción más detallada del sistema SEÍS puede encontrarse en el artículo “SEÍS: A semantic-based system for integrating buildings’ energy data” (Madrado, Massetti, Sicilia, Wadel, & Ianni, 2015).

proceso, y sus respectivos valores de rendimiento obtenidos por medio de Ecotect fueron introducidos en las cinco categorías predefinidas por el sistema: datos de proyecto (fase o etapa del ciclo de vida del edificio, utilización principal del edificio, superficie acondicionada del edificio, fecha de introducción de los datos); propiedades del edificio (compacidad, orientación, valor medio de transmitancia de la envolvente); datos climáticos (zona climática y características geográficas de la ubicación de proyecto); datos operativos (horario de ocupación y zona de confort); y datos de las prestaciones (confort y demanda energética) (Figura 49). De esta manera, una propuesta que en la etapa de proyecto básico tenía la mejor demanda energética pudo compararse con otros proyectos energéticamente eficientes contenidos en el sistema.

The image shows a screenshot of the SEIS (Semantic Energy Information System) website. At the top left is the SEIS logo with the tagline "A Semantic Energy Information System to integrate distributed building energy data". At the top right is the logo for "laSalle ARQ" with the tagline "Architectural Research Unit". Below the logos is a navigation bar with links: HOME, DATA SOURCES, LINKED DATA, GLOSSARY, PREVIEW, TEAM, and a highlighted "Bring your data" button. Below the navigation bar are four blue boxes representing user roles: Design Team, Facilities Manager, Building Owner, and Energy Consultant. The Energy Consultant box is highlighted with an orange border. Below this is a detailed view of the Energy Consultant role, which includes a description and three service options: "Upload building calculation/simulation", "Examples of Energy Efficient Building", and "Energy Performance Benchmarking".

**SEIS**  
A Semantic Energy Information System to integrate distributed building energy data

laSalle ARQ  
Architectural Research Unit

HOME DATA SOURCES LINKED DATA GLOSSARY PREVIEW TEAM **Bring your data**

**Design Team**  
Project of a new building  
Project of building retrofit  
Feasibility study  
Energy certification

**Facilities Manager**  
Benchmarking  
Building operation  
Research

**Building Owner**  
Building retrofit  
Building maintenance  
Benchmarking

**Energy Consultant**  
Energy and comfort modelling  
Energy and comfort monitoring

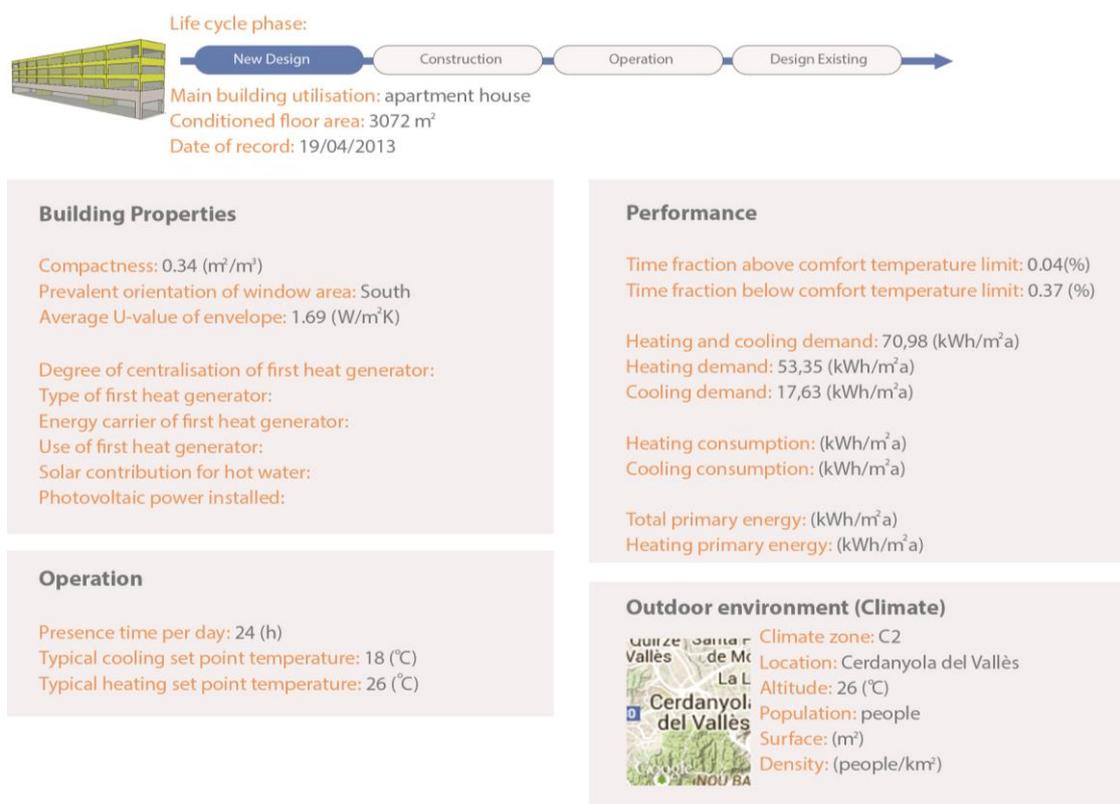
**Energy Consultant**  
You have selected the profile of an ENERGY CONSULTANT. You might be an energy expert working at the design stage. As energy expert, you participate in the refinement of energy performance objectives, propose strategies and detailed solutions, and inform the design team about the energy performance of the design solution supported by energy simulation software. The information system can assist you with three services.

**Upload building calculation/simulation**  
With this service you can upload the results of an energy simulation of the building, describing the building properties, outdoor environment, operation and performance. The data you provide will adhere to the energy model vocabulary, ensuring the compatibility with the existing data.

**Examples of Energy Efficient Building**  
This service is used to rank the simulated building previously uploaded with regard to the other buildings stored in the system.

**Energy Performance Benchmarking**  
This service is used to benchmark the simulated building previously uploaded with regard to the other buildings stored in the system.

**Figura 48.** SEIS: servicios para un consultor energético. Fuente: <http://www.seis-system.org/>. © ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle.

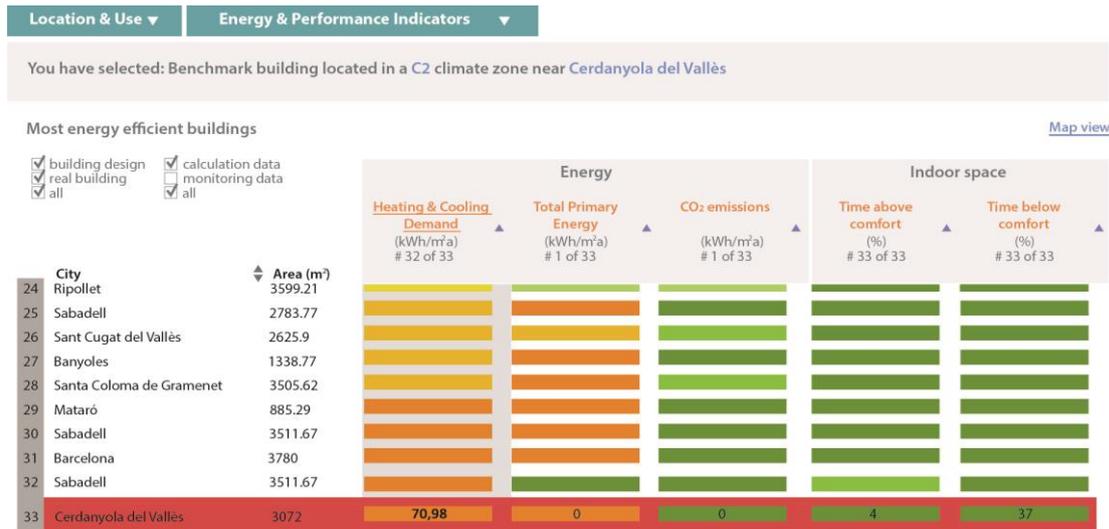


**Figura 49.** SEÍs: introducción de los datos de simulación. Fuente: <http://www.seis-system.org/>. © ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle.

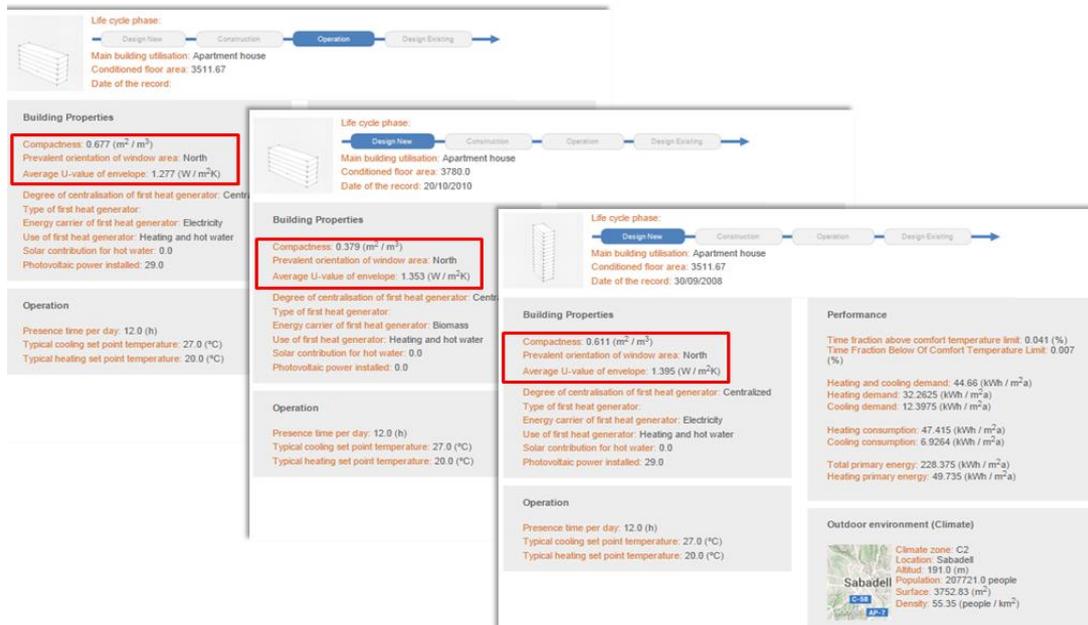
Por medio del servicio “Ejemplos de edificios energéticamente eficientes”, SEÍs clasificó la propuesta en una lista de edificios energéticamente eficientes disponibles en el sistema con características similares (zona climática y programa), en base a unos indicadores energéticos (demanda de calefacción y refrigeración, energía primaria total, emisiones de CO<sub>2</sub>, confort, etc.). Considerada la demanda energética como el factor de comparación, la propuesta, cuya demanda energética era de 70,98 kWh/m<sup>2</sup>, se clasificó en la última posición de la lista de edificios energéticamente eficientes disponibles en el sistema, siendo el valor mínimo para la demanda 44,66 kWh/m<sup>2</sup> (Figura 50). A continuación, se examinaron las características de los otros proyectos en la lista (Figura 51), extrapolando información útil para mejorar las prestaciones energéticas de la propuesta. Respecto a la propuesta (transmitancia media de la envolvente 1,69 W/m<sup>2</sup>k y compacidad 0,34 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>), los edificios eficientes recogidos en el sistema presentaban una compacidad mayor (0,37-0,67 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) y una orientación más desfavorable (norte), pero también un valor inferior de la transmitancia media de la envolvente (1,27-1,39 kW/m<sup>2</sup>k). Estas indicaciones acerca de la relación entre las características de otros edificios y su rendimiento permitieron tener un mejor conocimiento sobre el proyecto y tomar las decisiones pertinentes.

En la etapa de proyecto ejecutivo, de hecho, se mejoró el comportamiento térmico de la envolvente cambiando el valor de transmitancia de los diversos componentes y diferenciando el tratamiento de la fachada sur con el muro de Trombe (valor medio de transmitancia de la envolvente 1,50 W/m<sup>2</sup>k), con lo que se obtuvo un valor de demanda que situó a la nueva propuesta dentro de la lista de edificios eficientes (demanda

energética de calefacción y refrigeración 43,23 kWh/m<sup>2</sup>). La comparación con los edificios eficientes guardados en el sistema determinó que la propuesta podía mejorarse aún más reduciendo el valor de transmitancia de la envolvente, es decir, que el sistema constructivo empleado no era el óptimo. En realidad, como se ha mostrado anteriormente, el muro Trombe influye negativamente en la demanda de energía para refrigeración. Todas estas indicaciones permitieron tomar decisiones proyectuales más acertadas desde las primeras etapas de proyecto y ahorrar tiempo y recursos en la realización de simulaciones, evitando materiales o sistemas constructivos que no resultan convenientes para mejorar la eficiencia energética del edificio.



**Figura 50.** SEÍŚ: Ejemplos de edificios energéticamente eficientes. La tabla muestra la posición del edificio introducido en el sistema dentro de la lista de edificios energéticamente eficientes. Fuente: <http://www.seis-system.org/>. © ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle.



**Figura 51.** SEÍŚ: Características de algunos edificios energéticamente eficientes disponibles en el sistema: edificio en posición 32 (Sabadell, demanda energética 44,66 kWh/m<sup>2</sup>), edificio en posición 31 (Barcelona, demanda energética 42,96 kWh/m<sup>2</sup>); edificio en posición 30 (Sabadell, demanda energética 40,95 kWh/m<sup>2</sup>). Fuente: <http://www.seis-system.org/>. © ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle.

Por medio del servicio de “Benchmarking de Eficiencia Energética”, SEÍS realizó una comparación de la propuesta con valores de referencia (*benchmarks*) de eficiencia energética, los cuales se obtuvieron a partir de los datos de edificios disponibles en el sistema que tienen características similares al proyecto (zona climática y programa). Así, no se comparó la propuesta con datos estadísticos, sino con datos específicos de un tipo de edificio, asimilable al proyecto. Como resultado se obtuvo un cuadro informativo donde los valores de prestaciones de la propuesta se situaron en el rango de los valores de referencia de edificios eficientes, y de todos los edificios disponibles en el sistema.<sup>22</sup> Para ambos grupos (edificios eficientes y todos los edificios), se muestran los valores de máximo, mínimo y la media de los diversos indicadores de las prestaciones energéticas (demanda de calefacción y refrigeración, confort térmico, etc.). La demanda de refrigeración y calefacción de la propuesta (indicada en la figura en amarillo) estaba fuera del rango de valores de los edificios eficientes, pero dentro de los valores mínimos de los edificios registrados en el sistema (Figura 52). Esta información permitió definir las prestaciones, no de forma apriorística o a partir de normativas, sino a partir del conocimiento del funcionamiento real de los edificios. Aunque la propuesta resultó ser la mejor entre las generadas en el proyecto alternativo, la comparación de sus prestaciones con los valores de referencia de otros proyectos muestra los valores que cada indicador tendría que tener para que el edificio pudiera considerarse energéticamente eficiente.

Adicionalmente, los valores de referencia de eficiencia energética obtenidos de SEÍS son útiles para comprobar si los resultados de la simulación son fiables. Los valores de demanda se situaron en el rango de valores de los edificios registrados en el sistema, lo cual confirma que son valores realistas. Al contrario, los datos sobre el confort térmico obtenidos de la simulación realizada con Ecotect (valores por debajo de la zona de confort) no estaban comprendidos en el rango de valores de los edificios registrados. Esto sugiere que algunas suposiciones que se hicieron para realizar la simulación (por ejemplo, el horario de ocupación del edificio) no fueron realistas, por lo que los datos obtenidos no se ajustaban al funcionamiento real del edificio en uso. Pero estas discordancias pueden tener también otra lectura: podría sugerir que la herramienta utilizada no es lo suficientemente precisa para realizar este cálculo. De hecho, los resultados de la simulación térmica con Ecotect no se ajustan a la realidad debido a la falta de precisión del método de cálculo.

---

<sup>22</sup> El subconjunto de edificios eficientes se determina de la siguiente manera: todos los edificios disponibles en el repositorio se clasifican de acuerdo a los valores ponderados de diferentes indicadores de rendimiento, el 30% superior de la clasificación se considera como un conjunto de edificios energéticamente eficientes.

Benchmarks



**Figura 52.** SEIS: *Benchmarking* de eficiencia energética. Comparación del rendimiento del edificio con el rendimiento de todos los edificios registrados en el sistema en base a diversos indicadores (confort, demanda, consumo, emisiones de CO<sub>2</sub>, etc.). Fuente: <http://www.seis-system.org/>. © ARC Ingeniería y Arquitectura La Salle.

En definitiva, mediante la comparación de los datos de simulación generados en el proceso alternativo de proyecto y los datos de otros edificios en su fase de uso, se pudieron plantear unas metas específicas para alcanzar un nivel óptimo de rendimiento, así como validar los resultados de la simulación. El sistema de información SEIS, por tanto, es en una herramienta que permite ampliar las capacidades del DBP.

## 4.6 Conclusiones

En este capítulo se ha mostrado que la metodología del diseño basado en prestaciones puede contribuir a crear edificios más eficientes desde el punto de vista energético. Sin embargo, esta metodología conlleva un proceso de toma de decisiones iterativo que requiere el uso de diversas herramientas de simulación energética para cuantificar los efectos de algunas decisiones proyectuales y confirmar si un proyecto –en alguna de sus fases de desarrollo– cumple con determinados valores de prestaciones. Una de las claves para resolver este problema ha sido entender el edificio como un sistema compuesto de subsistemas y componentes, para así poder aplicar herramientas de simulación energética adecuadas al nivel de información que se tiene del sistema/proyecto en cada fase de su desarrollo. Por medio de esta estrategia, los resultados de la simulación producidos en cada etapa se pudieron comparar a unos indicadores energéticos, lo que llevó a cuestionar

algunas las decisiones tomadas en el proyecto convencional sobre la base de la experiencia personal de los arquitectos.

A partir de comparar los resultados del proceso de proyecto convencional con los obtenidos siguiendo la metodología del DBP, se puede concluir que no es necesario emplear herramientas de simulación energética en todas las fases del proyecto, ya que la experiencia del arquitecto puede ser suficiente para tomar algunas decisiones básicas respecto al comportamiento energético del futuro edificio. También se ha constatado que la simulación se torna esencial para decidir sobre aspectos técnicos del edificio, como por ejemplo materiales y sistemas constructivos. De todas maneras, las decisiones proyectuales no se han tomado únicamente para cumplir un criterio específico de eficiencia energética, sino que han surgido del compromiso con otros criterios de naturaleza cualitativa, por ejemplo, criterios estéticos o socio-culturales. En el proyecto convencional que ha llevado a la realización del edificio, se tomaron ciertas decisiones sobre la organización espacial para respetar las costumbres de la comunidad local (por ejemplo, prescindir de la pasarela de acceso exterior); otras decisiones que fueron tomadas por los arquitectos en base a su experiencia, como el uso del muro Trombe, pueden ser discutibles, ya que en ciertas condiciones supone una disminución sustancial del rendimiento global del edificio respecto a otras soluciones posibles.

Por medio del caso de estudio se ha podido constatar que es importante elegir herramientas de simulación energética que se adecúen al nivel información disponible en cada fase del proyecto, y que puedan proporcionar la información que se necesita para tomar una determinada decisión. De hecho, se ha comprobado que el grado de precisión de cálculo de la herramienta es fundamental para obtener la información que se necesita para tomar una decisión; incluso cuando la información facilitada a varias herramientas sea la misma, los resultados pueden ser distintos. Esto reafirma aún más la posición que se ha tomado a lo largo de todo el caso de estudio, es decir, aceptar que los resultados de simulación no son indiscutibles, ya que dependen de muchos factores, uno de los cuales es la información a partir de la cual se realiza la simulación. Por ejemplo, para realizar una simulación se hacen hipótesis sobre el comportamiento del usuario (horarios de ocupación, patrón de consumo, etc.) que puede no coincidir con la realidad. Por tanto, es importante verificar la consistencia de los resultados de la simulación, especialmente cuando una decisión importante se basa únicamente en ellos.

En el caso de estudio, se ha mostrado la utilidad de los sistemas de información energética para superar ciertos límites de la simulación, y también para abordar un aspecto clave del DBP, que es la definición de los objetivos de un proyecto en base a información fehaciente sobre el comportamiento real de los edificios. Con sistemas de información energética que almacenan información sobre edificios en uso, como el sistema SEÍS, se pueden establecer los criterios que ha de cumplir un proyecto a partir de los valores de las prestaciones de edificios que han demostrado ser energéticamente eficientes. SEÍS ha permitido obtener *benchmarks* para definir los objetivos que había de cumplir el proyecto evitando así de recurrir a otras fuentes, como estadísticas o informes técnicos. Asimismo, estos *benchmarks* han sido útiles para verificar la fiabilidad de los resultados de la simulación. En definitiva, por medio del caso de estudio se ha confirmado que el uso estratégico de herramientas de simulación conjuntamente con la información

proporcionada por el sistema SEÍS, puede contribuir a que el DBP sea una herramienta eficaz para el proyecto de edificios energéticamente eficientes.

### **Bibliografía**

- Attia, S., Beltrán, L., De Herde, A., & Hensen, J. (2009). "Architect Friendly": a Comparison of Ten Different Building Performance Simulation Tools. *11th IBPSA Building Simulation Conference* (págs. 204-211). Glasgow: IBPSA.
- Attia, S., Hensen, J., Beltrán, J., & De Herde, L. (2011). Selection Criteria for Building Performance Simulation Tools: contrasting architects' and engineers' needs. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(3), 155-169.
- CIBSE. (1999). *Guide A: Environmental Design*. Chartered Institution of Building Services Engineers. London: The Yale Press.
- Crawley, D. (2005). *Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs*. Washington DC: US Department of Energy.
- Cross, N. (2006). *Designerly Ways of Knowing*. London: Springer.
- DOE. (05 de Enero de 2013). *U.S. Department of Energy*. Obtenido de Building Energy Software Tools:  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/doe\\_sponsored.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/doe_sponsored.cfm)
- Frutos, F., & Sanmartin, J. M. (2012). Cap a una arquitectura més sostenible. En M. Gausa, *Cap a un habitat(ge) sostenible* (págs. 157-160). Barcelona: Consell Assessor per al Desenvolupament Sostenible de Catalunya (CADS).
- Madrazo, L., Massetti, M., Sicilia, A., Wadel, G., & Ianni, M. (2015). SEÍS: A semantic-based system for integrating buildings' energy data. *Informes de la Construcción*, 67(537).
- Martí, X., Pedrals, N., & Reol, N. (2005). *Model of Assessment on Energy Efficiency of each Urban Design and Microclimate Improvements*. Basel: Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient.
- Ministerio de la Vivienda. (2006). *Documento Básico Ahorro de Energía (DB-HE) - Código Técnico de la Edificación (CTE)*. Madrid.
- Stazi, F., Mastrucci, A., & Di Perna, C. (2012). Trombe wall management in summer conditions. An experimental study. *Solar Energy*, 86(9), 2839–2851.
- Weytjens, L., Attia, S., Verbeeck, G., & de Herde, A. (2012). A comparative study of the "architect-friendliness" of six building performance simulation tools. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2(3), 237-244.
- Weytjens, L., Verdonck, E., & Verbeeck, G. (2009). Classification and Use of Design Tools: The Roles of Tools in the Architectural Design Process. *Design principles and practice: an International Journal*, 3(1), 289-301.



Capítulo 5

# **CONCLUSIONES**



## 5.1 Conclusión

El interés actual por la sostenibilidad y por la reducción en el consumo de energía ha llevado a considerar el diseño basado en prestaciones (DBP) como una metodología útil para el proyecto de edificios energéticamente eficientes. Según esta metodología, que surgió en el ámbito de la ingeniería, la forma de un edificio se derivaría del análisis de sus prestaciones. Uno de los objetivos de este trabajo ha sido seguir el recorrido que ha llevado a esta metodología a considerarse, a día de hoy, una solución a la necesidad de proyectar edificios que cumplan con las funcionalidades previstas.

El primer paso en esta investigación fue indagar en la genealogía del DBP. En el primer capítulo se han descrito sus orígenes en el ámbito militar y en las disciplinas que surgieron tras el advenimiento del ordenador, como la cibernética. A partir del análisis de sus inicios, se han identificado las características fundamentales del proceso de diseño basado en el DBP, a saber: la cuantificación de los objetivos que se quieren alcanzar (requisitos de prestaciones), la formulación y medición de los efectos de propuestas de diseño por medio de herramientas de cálculo o simulación, y la evaluación de un diseño para verificar si cumple con los requisitos preestablecidos. En este proceso, la evaluación de una propuesta de diseño se basa en la comparación entre las prestaciones simuladas/calculadas en la fase de proyecto y las prestaciones que el edificio construido y en uso ha de cumplir. Así, mientras el diseño convencional entiende la evaluación como el juicio derivado de la experiencia de un diseñador, el DBP entiende la evaluación como un proceso sistemático basado en datos e información contrastada. Básicamente, el DBP busca hacer explícitas las razones por las que se elige una opción u otra para conseguir objetivos igualmente explícitos. A lo largo de este primer capítulo, se ha constatado que el DBP demostró ser una metodología eficaz para cierto tipo de diseños, especialmente en los campos de la ingeniería aeroespacial y de la automoción, contribuyendo a reducir errores en la toma de decisiones, y a acelerar la innovación tecnológica.

A continuación, en el segundo capítulo, se ha escrutado el camino que ha llevado al DBP a la arquitectura. En la primera parte del capítulo se ha analizado la relación entre la noción de *performance* que provenía de la cibernética y el debate sobre la función en la tradición arquitectónica precedente. La adopción por parte de la arquitectura de modos de pensamiento ajenos a ella no fue un fenómeno singular o aislado, sino más bien una característica de la edad moderna. Así, algunos conceptos de la teoría arquitectónica surgidos en el siglo XIX, como el de función, se tomaron de la biología. En esa época, el concepto de función permitía a la arquitectura superar una estética basada en los valores de la época clásica (orden, proporción, tipo) y homologar su corpus teórico con el de las disciplinas científicas más avanzadas. Más adelante, durante la segunda mitad del siglo XX, el concepto de *performance* nacido en la cibernética tomó el lugar de la función que había llegado de la biología. El mecanismo que permitió el traspaso de principios e ideas de un ámbito a otro, de las ciencias a la arquitectura, fue la analogía, es decir el establecimiento de una relación de semejanza entre ámbitos de conocimiento distintos. El recurso a la analogía con la ciencia por parte de la arquitectura es un fenómeno característico de la edad moderna, puesto que épocas anteriores la distinción entre una y otra no llegó a plantearse: la arquitectura ya se consideraba ciencia, de acuerdo con la

noción de ciencia vigente en cada época. Los motivos de este acercamiento de la arquitectura a la ciencia obedecen a su necesidad de asentarse sobre fundamentos teóricos acordes con la visión del mundo predominante en una determinada época; visión que en la época moderna ha estado forjada principalmente por las ciencias experimentales. Así, se ha podido concluir que la arquitectura evoluciona como un saber interdisciplinar más que como una disciplina autónoma, pues se alimenta de las aportaciones de otros campos del conocimiento dominantes en un determinado momento histórico, para construir con ellas su propia doctrina.

La cibernética propició un espacio de encuentro entre la arquitectura y la ingeniería (DBP): desde la perspectiva de la cibernética, un edificio pasaba a ser un producto tecnológico, es decir un artefacto con unos objetivos a cumplir. La fascinación por los métodos de diseño hizo creer que la forma del edificio podía derivarse del análisis exhaustivo de unos requisitos funcionales. Sin embargo, al entusiasmo inicial por los métodos de diseño siguió el abismo de la desilusión. La arquitectura tenía su propio recorrido histórico, su propio discurso interno, y no podía convertirse en una rama de una nueva ciencia; las obras de arquitectura son también productos culturales con una dimensión simbólica que no se puede soslayar. Las cualidades espaciales, la integración con el entorno, las consideraciones formales y estéticas, son aspectos consustanciales a una obra de arquitectura que no son fácilmente cuantificables y, por tanto, difíciles de evaluar en los términos que plantea el DBP. Como reacción a la posibilidad de convertir un edificio en un producto tecnológico más, los arquitectos posmodernos enfatizaron el valor artístico de la arquitectura, el edificio como portador de significados. Así, a lo largo de la segunda mitad del siglo XX se confrontaron dos maneras de entender el funcionamiento de un edificio que recordaban a la contraposición entre la función y la forma que se dio en el siglo anterior: por un lado, la que enfatizaba la efectividad en el cumplimiento de unos objetivos (*performance* tecnológica), por el otro, la que ponía el foco en la capacidad para transmitir un mensaje (*performance* cultural). El dilema que se planteaba a la arquitectura era elegir entre una visión ingenieril, carente de aspiraciones estéticas, o una visión artística, que priorizaba los significados sobre las consideraciones funcionales. Lo cierto es, sin embargo, que existía la convicción de que estas dos visiones no podían coexistir.

Posteriormente se ha podido constatar que las interrelaciones entre la arquitectura y las ciencias han estado marcadas por la necesidad de la arquitectura de responder a los desafíos que plantea la economía global, la sostenibilidad, y la implantación de las tecnologías de la información y comunicación. El entorno que hoy nos rodea ya no se limita a lo físico y tangible, sino que abarca también aspectos inmateriales (información, economía, cultura). La propia arquitectura ha devenido un fenómeno complejo, un territorio propicio para la síntesis de dos manifestaciones aparentemente opuestas: una que se basa en los fenómenos cuantificables, tales como el comportamiento energético, estructural o térmico, y otra abstracta y no cuantificable, derivada de efectos y sensaciones. El concepto de *performance*, tal como lo entendemos hoy, opera en ambos planos: en el plano subjetivo de la producción de emociones y en el plano objetivo del cumplimiento de criterios técnicos. Este nuevo significado de la *performance*, por tanto,

implica que un edificio deba entenderse como una totalidad, que abarca tanto los aspectos cuantitativos como los cualitativos.

Desde el punto de vista del proyecto de arquitectura, esta visión holística representa un cambio sustancial ya que, para evaluar un edificio, por ejemplo, sus prestaciones técnicas, no es suficiente con el conocimiento individual del arquitecto. Para proyectar un edificio desde una perspectiva holística se requiere la colaboración entre arquitectos e ingenieros, con el fin de superar la dualidad estética/técnica; la primera, a cargo de los arquitectos y la segunda, de los ingenieros. En este contexto, el DBP puede entenderse como un método para crear edificios capaces de cumplir con unos requisitos predefinidos, y también para explorar posibilidades formales en base a la información sobre el rendimiento del edificio. Esta revisión del papel del DBP en la arquitectura coincide con la necesidad de disponer de herramientas adecuadas para apoyar las decisiones en el proceso de proyecto. En el tercer capítulo se han recopilado una serie de proyectos experimentales que utilizan herramientas digitales para optimizar las prestaciones energéticas, térmicas y estructurales siguiendo algunos de los principios del DBP. Los proyectos descritos contemplan el programa arquitectónico desde un punto de vista holístico, y tienen en cuenta tanto aspectos cuantitativos (consumo, resistencia, confort lumínico y térmico), como cualitativos (vistas, privacidad, y estética). Del análisis de los sistemas prototípicos desarrollados en estos proyectos se ha concluido que los métodos y herramientas que emplean soslayan la dimensión temporal del desarrollo de un proyecto en sus diferentes fases (anteproyecto, proyecto básico y proyecto de ejecución) abordando desde el inicio toda su complejidad. El desarrollo de un proyecto por fases es, tal vez, la constatación de las limitaciones cognitivas de la mente del diseñador, que necesita avanzar desde una visión esquemática a otra cada vez más detallada del edificio. Aquí, el problema para la aplicación del DBP en un proceso estructurado en fases es la discontinuidad entre ellas. Las decisiones tomadas en una etapa de desarrollo determinan cómo será el proyecto en las siguientes y, en sentido contrario, la evaluación de las prestaciones en una etapa ulterior puede llevar a cuestionar las que se tomaron en fases previas. En otras palabras, el proceso de proyecto no es lineal, sino que avanza hacia atrás y hacia delante. El DBP, sin embargo, conlleva un proceso de toma de decisiones que se aplica a cada una de las etapas de desarrollo del proyecto considerada aisladamente, teniendo en cuenta el grado de definición del proyecto y empleando las herramientas disponibles. Las dificultades que plantea la integración del DBP en el proyecto estructurado como secuencias cíclicas se ha abordado a través del caso de estudio, en el que se ha mostrado una estrategia proyectual para aplicar la metodología del DBP en el proyecto de edificios energéticamente eficientes.

En el caso de estudio se ha reproducido el proceso de proyecto de un edificio de viviendas ya construido aplicando los principios del DBP, con el fin de comparar sus resultados con los obtenidos en el proyecto original que fue llevado a cabo de forma convencional. Para ello, el edificio –en cada una de sus fases de desarrollo– se ha entendido como un sistema organizado jerárquicamente, compuesto de subsistemas y componentes. En cada fase del proyecto se compararon los valores de rendimiento de diversas alternativas en base a unos indicadores energéticos para decidir entre una u otra. Asimismo, a partir de la información generada en las fases más avanzadas, se

reconsideraron decisiones tomadas de manera apriorística en fases anteriores. Este proceso ha permitido crear alternativas al proyecto original capaces de mejorar las prestaciones energéticas del edificio construido, que cumplen con los estándares más altos de eficiencia energética. Sin embargo, las dificultades para la implementación del DBP en el proyecto de edificios energéticamente eficientes no se limitan a la integración de múltiples herramientas de simulación en las diferentes fases de proyecto. Además, ha sido necesario cuantificar los requisitos de las prestaciones a partir de los valores obtenidos de edificios que han demostrado ser energéticamente eficientes, y se ha tenido que verificar la fiabilidad de los resultados de las simulaciones. Para ello, se ha utilizado el sistema de información energética SEÍS que ofrece la posibilidad de extrapolar valores de referencia (*benchmarks*) adaptados a un proyecto para cuantificar los objetivos y verificar la consistencia de los resultados de la simulación. De esta forma se ha podido concluir que el uso estratégico de herramientas de simulación energética, junto con la información facilitada por el sistema SEÍS, pueden contribuir a mejorar la eficacia del DBP para proyectar edificios energéticamente más eficientes.

En la realización de proyectos alternativos volvió a surgir el dilema entre los aspectos cualitativos y cuantitativos. Así, por ejemplo, la ventana es un elemento regulador de la temperatura interior del edificio, pero al mismo tiempo determina la composición de una fachada o abre a una vista; la sensación de confort no solo depende de la humedad y la temperatura, también de los materiales, es decir de la percepción visual, y la envolvente dota de identidad a un edificio, además de influir en la demanda energética. Por tanto, cada elemento o conjunto de componentes de un edificio puede considerarse desde puntos de vista antagónicos: desde el funcionamiento físico, y desde la percepción sensorial. La cuestión que se plantea en este punto es la negociación entre criterios de naturaleza diversa: técnicos y funcionales, subjetivos y estéticos. Mientras que algunos aspectos del edificio pueden cuantificarse (iluminación, acústica, temperatura, humedad, durabilidad de los materiales, cantidad y distribución de la superficie), otros son más intangibles (estética, percepción visual, identidad y sentido de pertenencia). Ante una decisión estratégica puede que prevalezcan criterios cualitativos o cuantitativos. Pero, en general, los aspectos estéticos de un edificio no deberían ser atendidos una vez resueltos los problemas más pragmáticos, y viceversa. Por ello, en el caso de estudio se equipararon ambos criterios, técnicos y estéticos, ya que no sirve de mucho que un edificio de viviendas cumpla con los indicadores energéticos si luego no es capaz de mejorar la calidad de vida de las personas facilitándoles lugares confortables no solo desde el punto de vista térmico, sino también con respecto a la percepción sensorial. Así, para la negociación entre los criterios estéticos y técnicos se tuvieron en cuenta los criterios del usuario, tanto su apreciación del espacio (tamaño, composición), como sus necesidades de confort térmico. De esta manera, el usuario se situó, idealmente, en el centro del proceso de toma de decisiones. Básicamente, por medio de este caso de estudio se ha mostrado que el juicio crítico del arquitecto y la evaluación de las prestaciones de un edificio pueden y deben complementarse en el proceso de proyectar un edificio energéticamente eficiente.

La arquitectura actual se desarrolla en un entorno, normativo y cultural, que demanda evidencias acerca de la reducción del consumo energético y el impacto

ambiental de los edificios. En este sentido, se ha postulado que el DBP puede ser una respuesta adecuada a la necesidad de demostrar el cumplimiento de unas prestaciones establecidas en la normativa, por ejemplo. Sin embargo, este interés en la cuantificación conlleva el riesgo de que métodos de evaluación centrados en aspectos específicos del edificio (por ejemplo, el comportamiento energético) prevalezcan respecto a planteamientos basados en una valoración del conjunto del proyecto, según una visión holística que tenga en cuenta el juicio arquitectónico, la evaluación objetiva de las prestaciones y la participación del usuario (Figura 1). El buen funcionamiento de un edificio no se limita a reducir el consumo de recursos naturales, o cumplir con las condiciones de demanda energética. De hecho, no siempre un espacio que funciona bien en términos energéticos es también un espacio confortable, desde el punto de vista de la apreciación sensorial del espacio. Con este fin, sería conveniente que las instituciones académicas contribuyesen a formar arquitectos capaces de conjugar estética y creatividad con aspectos socio-culturales, utilizando al mismo tiempo de forma eficaz las tecnologías disponibles para asegurar la funcionalidad de los edificios. Finalmente, no hay que olvidar que la cantidad de energía consumida en un edificio no depende solo de sus características formales y espaciales, o del clima, sino de los hábitos o estilos de vida del usuario en un entorno socioeconómico y cultural determinado. Por tanto, es importante tener en cuenta al usuario en el proceso de toma de decisiones durante la fase de proyecto, y conseguir su participación activa en el uso y mantenimiento del edificio.



**Figura 1.** La necesidad de mejorar la relación entre la crítica arquitectónica y la evaluación de prestaciones en la educación del arquitecto. Fuente: Grafico de elaboración propia.

## 5.2 Limitaciones de la investigación

En esta sección se resumen las limitaciones que se hicieron patentes durante el progreso de la investigación, especialmente en la fase experimental:

- **Caducidad de las herramientas de simulación.** El caso de estudio se ha centrado en la aplicación de herramientas de simulación energética. Debido a su interoperabilidad, se han usado herramientas de simulación comerciales, en lugar de herramientas homologadas (LIDER, CALENER). Sin embargo, el ámbito de la simulación energética está en continuo desarrollo. Por tanto, cabe esperar que algunas de las herramientas usadas en este trabajo hayan caído en desuso (por ejemplo, Autodesk Vasari se ha integrado en Autodesk Revit). Esto no le quita validez al trabajo realizado, ya que lo que se plantea es una estrategia proyectual no estrictamente vinculada a una u otra herramienta.
- **Delimitación del análisis comparativo entre el diseño convencional y el diseño que implementa la metodología de diseño basado en prestaciones.** Uno de los problemas que plantea la aplicación del DBP es el incremento de los costes y del tiempo que se requiere para aplicar herramientas de simulación en el proceso de proyecto. En el caso de estudio se propone una estrategia para paliar las consecuencias negativas del uso de diversas herramientas de simulación energética a lo largo del proyecto. La estrategia se ha basado en la utilización de un único modelo BIM que pueda ser analizado por diversas herramientas de simulación energética (BEM). Sin embargo, los beneficios de utilizar un único modelo en términos de reducción de tiempo y costes no se han demostrado cuantitativamente. Un estudio de este tipo podría dar lugar a otras investigaciones.
- **Alcance de la comparación entre los datos de simulación y los datos extrapolados de la monitorización del edificio.** La comparación entre los datos calculados por medio de herramientas de simulación energéticas durante el proceso de proyecto y los datos extraídos de la monitorización del edificio ha permitido verificar la fiabilidad de los datos de simulación. Sin embargo, debido a que no se han reproducido las mismas condiciones en el cálculo con el modelo y la toma de datos en la realidad (mismo periodo de tiempo, mismos puntos de toma/cálculo de datos), no se ha podido calibrar la precisión del modelo energético realizado con DesignBuilder (ajuste del margen de error). De todas formas, este no era un objetivo del caso de estudio.
- **Delimitación del análisis de los datos de monitorización.** Se obtuvieron los valores instantáneos de temperatura interior, consumo de gas y electricidad registrados a cada hora del día en dos apartamentos del edificio, pero no se tuvo en cuenta la temperatura exterior. Para comparar la temperatura ambiental de las viviendas con la temperatura exterior, se tuvieron que recuperar los valores históricos de la temperatura media diaria en Barcelona facilitados por el repositorio de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), con los que se pudo

realizar un análisis comparativo de temperaturas medias diarias, en lugar de las medidas cada hora.

### 5.3 Líneas futuras

El trabajo realizado en esta tesis da paso a futuras investigaciones sobre la aplicación del diseño basado en prestaciones en la arquitectura en diversos ámbitos:

- **Implementación del diseño basado en prestaciones en la arquitectura.** Los datos reales sobre las prestaciones de edificios (monitorización), como asimismo datos masivos (*big data*), están cada vez más disponibles. Una línea futura de investigación podría centrarse en ampliar el estudio realizado en esta tesis para comprender los efectos de la integración de la monitorización de edificios extendida a toda una ciudad. El uso de técnicas para observar, analizar e interpretar en tiempo real datos masivos de monitorización para extrapolar perfiles de comportamiento del usuario (patrones de consumo, uso, ocupación, hábitos cotidianos y gustos), ayudaría a detectar deficiencias y oportunidades, y responder o anticiparse a las acciones del usuario.
- **Generalización del diseño basado en prestaciones en la arquitectura.** La decisión de llevar a cabo un único caso de estudio fue apropiada para dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas en esta tesis, pero no permite generalizar los resultados. La organización de talleres en ámbitos académicos podría ser una ocasión para aplicar el diseño basado en prestaciones como metodología de trabajo con fines experimentales. Durante la implementación de la metodología por parte de los participantes en los talleres se observaría cómo llevan a la práctica diferentes estrategias, para luego extraer nuevas conclusiones. El entorno de la experimentación, la recogida de datos, documentos compartidos y procesos, se realizaría con el apoyo de las TIC.
- **Enseñanza del diseño basado en prestaciones en la arquitectura.** La creciente preocupación por la eficiencia energética de los edificios plantea nuevos escenarios profesionales y demanda cambios en el ejercicio de la profesión. El estudio sobre el diseño basado en prestaciones realizado en esta tesis constituye un primer paso en la definición de objetivos y procedimientos a aplicar en el proyecto de edificios eficientes, así como sobre el uso de tecnologías, herramientas y conocimientos durante el proyecto (aprendizaje y uso de herramientas de simulación como instrumento de diseño; entender el proceso de diseño como parte del ciclo de vida del edificio, etc.). El siguiente paso sería integrar el conocimiento alcanzado por medio de esta tesis en un programa académico.



Esta Tesis Doctoral ha sido defendida el día \_\_\_\_ d \_\_\_\_\_ de 201\_\_

En el Centro \_\_\_\_\_

de la Universidad Ramon Llull, ante el Tribunal formado por los Doctores y Doctoras

abajo firmantes, habiendo obtenido la calificación:

Presidente/a

\_\_\_\_\_

Vocal

\_\_\_\_\_

Vocal \*

\_\_\_\_\_

Vocal \*

\_\_\_\_\_

Secretario/a

\_\_\_\_\_

Doctorando/a

\_\_\_\_\_

(\*): Sólo en el caso de tener un tribunal de 5 miembros

