



UCAM
UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado en Urbanismo

Energía, entropía, arquitectura
Criterios matéricos para la optimización de la
demanda energética de edificios

Casos de estudio: la arquitectura residencial de Bonet Castellana en La Manga

Autor:

Pedro Antonio Díaz Guirado

Directores:

Dr. D. Juan Roldán Ruiz

Dra. Dña. María del Carmen Carazo Díaz

Dr. D. Antonio David Prieto Merino

Murcia, marzo de 2017



UCAM
UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado en Urbanismo

Energía, entropía, arquitectura
Criterios matéricos para la optimización de la
demanda energética de edificios

Casos de estudio: la arquitectura residencial de Bonet Castellana en La Manga

Autor:

Pedro Antonio Díaz Guirado

Directores:

Dr. D. Juan Roldán Ruiz

Dra. Dña. María del Carmen Carazo Díaz

Dr. D. Antonio David Prieto Merino

Murcia, marzo de 2017



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Doctor D. Juan Roldán Ruiz, la Doctora Dña. María del Carmen Carazo Díaz y el Doctor D. Antonio David Prieto Merino, como directores de la Tesis Doctoral titulada *“Energía, entropía, arquitectura: criterios matéricos para la optimización de la demanda energética de edificios. Casos de estudio: la arquitectura residencial de Bonet Castellana en La Manga”* realizada por D. Pedro Antonio Díaz Guirado en el Departamento de Ciencias Politécnicas, **autorizan su presentación a trámite** dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento a los Reales Decretos 99/2011, 1393/2007, 56/2005 y 778/98, en Murcia a 7 de marzo de 2017.

Dr. D. Juan Roldán Ruiz Dr. Dña. María del Carmen Carazo Díaz Dr. D. Antonio David Prieto Merino

UCAM



EIDUCAM
Escuela Internacional
de Doctorado

Energía, entropía, arquitectura.
Criterios matéricos para la optimización de la demanda energética de edificios.
Casos de estudio: la arquitectura residencial de Bonet Castellana en La Manga

RESUMEN

Los arquitectos del Movimiento Moderno sentaron las bases de la arquitectura del siglo XX. Utilizaron nuevas técnicas y materiales para una nueva arquitectura. La novedad de sus planteamientos teóricos requería soluciones innovadoras, apoyadas en tecnología que posibilitara el desarrollo de sus propuestas. En sus inicios mostraron, aparentemente, una irrelevancia en la relación con el lugar. Sin embargo, las consideraciones energéticas han estado presentes entre las inquietudes y planteamientos de los arquitectos más destacados del Movimiento Moderno, proponiendo, en algunos casos, soluciones válidas para un buen comportamiento energético y adaptadas al clima.

Ha pasado ya casi un siglo y los retos de la arquitectura evolucionan. El arquitecto actual necesita herramientas proyectuales precisas que incorporar al proceso de diseño, para abordar los retos medioambientales a los que nos enfrentamos, en el marco de una crisis energética mundial: soluciones que deben ser planteadas con perspectiva global, desde una visión holística de la Arquitectura.

Esta investigación propone realizar un estudio que evalúe la influencia de parámetros relacionados con la construcción y materialidad de los edificios -que denominaremos matéricos- en la demanda energética de los edificios, para poder extraer criterios heurísticos de diseño arquitectónico de alta eficiencia energética.

Para ello, seleccionamos y documentamos un conjunto de edificios entre la arquitectura residencial que el arquitecto de la tercera generación del Movimiento Moderno, Antonio Bonet Castellana, proyectó en los años 60 en la costa murciana.

Estos edificios nos servirán como base para generar más de 80.000 modelos digitales que evaluaremos mediante simulación energética. Aplicaremos una metodología inductiva de estudio de casos. El análisis estadístico de los datos obtenidos nos permitirá conocer el comportamiento de los edificios originales y extraer criterios de optimización energética para aplicar al proceso proyectual, que nos aporte, además, una nueva visión de nuestro patrimonio arquitectónico.

Palabras clave: Arquitectura, Energía, Entropía, Movimiento Moderno, Bonet Castellana, Eficiencia, Análisis de Sensibilidad, Criterios Heurísticos

Energy, Entropy, Architecture
Material Criteria for Building Energy Demand Optimization.
Case Studies: Residential Architecture of Bonet Castellana in La Manga

ABSTRACT

The architects of the Modern Movement set the standards of the 20th century architecture. They used new techniques and materials for a new architecture. The novelty of their theoretical statements required innovative solutions based on technology that would enable the realisation of their proposals. Initially, they showed an apparent disengagement towards the setting. However, the most prominent architects of the Modern Movement never overlooked energy; and occasionally suggested efficient solutions for an efficient and climate-focused energy management.

Almost one century later, the challenges of architecture have evolved. The architect of today needs to bring adequate projective tools into the design process to face the environmental challenges that abound in the framework of a global energy crisis. Such solutions must be adopted by applying a holistic vision of Architecture .

This investigation proposes to evaluate the influence of the parameters related to the construction and materiality of buildings -which we will call "*matéricos*" in their energy demand in order to acquire heuristic rules about highly efficient, energy-bound architectural design.

In this regard, we have identified and documented a selection of residential architecture buildings among those which Antonio Bonet Castellana, member of the third generation of the Modern Movement, displayed on the coast of Murcia during the 60's.

These buildings will be our basis to create over 80.000 digital models which will be evaluated through energy simulations. In our case study, we will apply an inductive methodology . The statistical analysis of the data obtained will lead us to an understanding of the behaviour of the original buildings, as well as to extract details concerning energy optimisation to be applied to the projective process. In addition, this will provide us with a brand new notion of our architectural heritage.

Keywords: Architecture, Energy, Entropy, Modern Movement, Bonet Castellana, Efficiency, Sensitivity Analysis, Heuristic Rules

AGRADECIMIENTOS

Consejos, ayuda, ánimo y aliento, son la energía necesaria para abordar una meta personal como es el doctorado. Apoyo y dedicación: tiempo que mis compañeros, amigos y familiares me han regalado siempre y más durante toda esta investigación. La complejidad de compatibilizar trabajo, familia y amigos, hace que la comprensión y el ánimo de los que tienes cerca sea imprescindible. Quisiera agradecer a todos los que habéis participado conmigo en la culminación de esta tesis doctoral, especialmente:

A mi director, el doctor Juan Roldán, por su saber, su experiencia investigadora y su rigor científico, que han resultado imprescindibles en el desarrollo de esta tesis doctoral.

A a mis codirectores, la doctora Carmen Carazo y el doctor David Prieto, y a todo el departamento Big Data de la UCAM, por poner a mi disposición su saber y los medios de la Universidad.

A Antonio Ros, informático del Colegio Oficial de Arquitectos de Murcia, compañero de trabajo y figura clave para el desarrollo de nuestra aplicación APE₃. Su talento ha sido imprescindible.

A mi esposa Iris Tomás, por su apoyo, esfuerzo y dedicación.

A mi amigo y compañero Ángel Allepuz, por compartir su vasto saber arquitectónico durante este proceso que hemos emprendido juntos.

A mi jefe de área y compañero, José Antonio Sánchez, por su confianza y apoyo incondicional que me han aportado el impulso que necesitaba.

A mis compañeros del claustro, a Gema Ramírez por su ayuda y experiencia, a Juan Gómez, director de mi Trabajo Fin de Máster, que fue el inicio de mi actividad investigadora, y a todos los que me habéis apoyado y animado en este largo y enriquecedor proceso.

A mis compañeros del CAT y al COAMU por su ayuda y disposición.

A mi amigo Manolo, por todo el tiempo que le debo.

A mi amigo y traductor personal, Jordi.

A mis padres y hermanos, que siempre están conmigo.

Gracias a todos.

a la memoria de mi padrino Antonio

a mi mujer, Iris y a mis hijas, Iris y Cloe

ÍNDICE

I. CUERPO INTRODUCTORIO	21
1.1. INTRODUCCIÓN.....	23
1.2. HIPÓTESIS.....	25
1.3. OBJETIVOS.....	26
1.4. METODOLOGÍA.....	27
II. ESTADO DEL ARTE	29
2.1. OBJETIVO 2020. EDIFICIOS DE CONSUMO ENERGÉTICO CASI NULO	31
2.2. ANTECEDENTES. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	41
2.2.1. Investigaciones científicas sobre energía y arquitectura en España.....	41
2.2.2. Estudio energético de edificios. Simulación informática.....	43
2.2.3. La incertidumbre en los resultados de la simulación.....	52
2.2.4. La investigación sobre optimización energética.....	54
2.2.5. Estrategias arquitectónicas de diseño bioclimático.....	66
2.3. HABITACIÓN, HABITAR, HABITABILIDAD.....	75
2.3.3. Habitación.....	75
2.3.4. Habitar.....	80
2.3.5. Habitabilidad.....	83
2.4. ARQUITECTURA Y ENERGÍA.....	97
2.5. LA TERCERA GENERACIÓN DE ARQUITECTOS DEL MOVIMIENTO MODERNO EN ESPAÑA.....	111
2.6. ANTONIO BONET CASTELLANA.....	119

III. PLAN DE INVESTIGACIÓN	125
3.1. INTRODUCCIÓN AL PLAN DE INVESTIGACIÓN Y ALCANCE ...	127
3.2. PARÁMETROS MATÉRICOS SELECCIONADOS QUE INFLUYEN EN LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LOS EDIFICIOS.....	133
3.2.1. Clima y entorno.....	139
3.2.2. Condición matéricas del edificio	141
3.3. CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN	166
3.4. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA DE ANÁLISIS PARAMÉTRICO APE ₃	173
3.5. PROCEDIMIENTO.....	177
3.5.1. Procedimiento aplicado a la investigación.....	178
3.5.2. Proceso de análisis de los resultados	186
3.6. SELECCIÓN DE LA MUESTRA.....	189
3.6.1. Criterios de selección.....	189
3.6.2. Fuentes.....	190
3.6.3. Edificios seleccionados como modelo.....	193
3.7. EDIFICIO 1. CONJUNTO DE VIVIENDAS MARALET	199
3.7.1. Antecedentes.....	199
3.7.2. Definición gráfica	201
3.7.3. Definición constructiva	209
3.7.4. Estudio del caso. Metodología de obtención de datos aplicada	210
3.8. EDIFICIO 2. CONJUNTO HEXAGONAL. TORRE	215
3.8.1. Antecedentes.....	215
3.8.2. Definición gráfica	219
3.8.3. Definición constructiva	227
3.8.4. Estudio del caso. Procedimiento de obtención de datos aplicada..	233

3.9. EDIFICIO 3. CONJUNTO HEXAGONAL. BASAMENTO	239
3.9.1. Antecedentes.....	239
3.9.2. Definición gráfica	243
3.9.3. Definición constructiva	243
3.9.4. Estudio del caso. Procedimiento de obtención de datos aplicada ..	250
3.10. EDIFICIO 4. EDIFICIO ESCALONADO “BABILONIA”	255
3.10.1. Antecedentes.....	255
3.10.2. Definición gráfica	259
3.10.3. Definición constructiva	261
3.10.4. Estudio del caso. Metodología de obtención de datos aplicada ...	263
IV. RESULTADOS	279
4.1. RESULTADOS MODELO 1. CONJUNTO MARALET	281
4.1.1. Resultados del edificio original	281
4.1.2. Rangos sensibles uniparamétricos	284
4.1.3. Resultados de los muestreos	290
4.2. RESULTADOS MODELO 2 EDIFICIO HEXAGONAL TORRE ...	309
4.2.1. Resultados del edificio original	309
4.2.2. Rangos sensibles uniparamétricos	313
4.2.3. Resultados de los muestreos	319
4.3. RESULTADOS MODELO 3. EDIFICIO HEXAGONAL BASAMENTO.....	335
4.3.1. Resultados del edificio original	335
4.3.2. Rangos sensibles uniparamétricos	339
4.3.3. Resultados de los muestreos	344
4.4 RESULTADOS MODELO 4 EDIFICIO ESCALONADO “BABILONIA”	363
4.4.1. Resultados del edificio original	363
4.4.2. Rangos sensibles uniparamétricos	366
4.4.3. Resultados de los muestreos	373

4.5. OPTIMIZACIÓN	389
4.5.1. Optimización Edificio 1, viviendas Maralet.....	390
4.5.2. Optimización Edificio 2, Hexagonal Torre.....	396
4.5.3. Optimización edificio 3, Hexagonal basamento.....	400
4.5.4. Optimización edificio 4, Edificio Escalonado Babilonia.....	404
V. DISCUSIÓN	411
5.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS POR PARÁMETROS	416
5.2. DISCUSIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS	428
VI. CONCLUSIONES	431
6.1. CONCLUSIONES.....	431
6.1.1. Comportamiento energético de los edificios analizados.....	433
6.1.2. Influencia de los parámetros matéricos en calefacción.....	434
6.1.3. Influencia de los parámetros matéricos en refrigeración.....	436
6.1.4. Influencia de los parámetros matéricos en un ciclo anual.....	437
6.2. SÍNTESIS	439
BIBLIOGRAFÍA	441
BIBLIOGRAFÍA DE INTERÉS Y CONSULTADA	443
ÍNDICE ALFABÉTICO DE LA BIBLIOGRAFÍA	453

TOMO II. ANEJOS

INTRODUCCIÓN	7
A1. GRÁFICOS	9
A.1.1. Gráficos del Modelo 1.....	13
A.1.2. Gráficos del Modelo 2.....	37
A.1.3. Gráficos del Modelo 3.....	61
A.1.4. Gráficos del Modelo 4.....	85
A2. LISTADOS	109
A.2.1. Listados del Modelo 1.....	111
A.2.1.1. Test uniparamétrico.....	113
A.2.1.2. Muestreo sensible.....	118
A.2.1.3. Muestreo uniforme.....	197
A.2.2 Listados del Modelo 2.....	275
A.2.2.1. Test uniparamétrico.....	277
A.2.2.2. Muestreo sensible.....	283
A.2.2.3. Muestreo uniforme.....	374
A.2.3. Listados del Modelo 3.....	453
A.2.3.1. Test uniparamétrico.....	455
A.2.3.2. Muestreo sensible.....	460
A.2.3.3. Muestreo uniforme.....	532
A.2.4. Listados del Modelo 4.....	611
A.2.4.1. Test uniparamétrico.....	613
A.2.4.2. Muestreo sensible.....	619
A.2.4.3. Muestreo uniforme.....	694

I. CUERPO INTRODUCTORIO

I. CUERPO INTRODUCTORIO

1.1. INTRODUCCIÓN

Los arquitectos del Movimiento Moderno sentaron las bases de la arquitectura del siglo XX. Utilizaron nuevas técnicas y materiales para una nueva arquitectura. La novedad de sus planteamientos teóricos requería soluciones innovadoras, apoyadas en tecnología que posibilitara el desarrollo de sus propuestas.

En sus inicios, esta arquitectura mostró, aparentemente, una irrelevancia en la relación con el lugar. Sin embargo, las consideraciones térmicas y energéticas han estado presentes entre las inquietudes y planteamientos de los arquitectos más destacados del Movimiento Moderno, proponiendo, en algunos casos, soluciones válidas para un buen comportamiento energético y adaptadas al clima.

Josep María Montaner, en su libro *La modernidad superada*, dice que la cultura organicista de Frank Lloyd Wright y las aportaciones de los arquitectos nórdicos, encabezados por Alvar Aalto, fueron las que “introdujeron con fuerza definitiva la relación de la arquitectura con el lugar” (Montaner, 2011). De hecho, ya en 1930, el III CIAM incorporó los conocimientos técnicos del soleamiento a la arquitectura y el urbanismo.

La arquitectura del Movimiento Moderno es objeto de un debate que, en la mayor parte de las ocasiones, la sitúa en una mala posición en aspectos constructivos o energéticos: prejuicios que la tachan de haber sido planteada “en contra” del usuario, “contra” su confort, generando una arquitectura fría y formalmente dura. Son los denominados “estilemas” del Movimiento Moderno, usados contra éste como prueba “irrefutable de su aberrante formalismo”, a pesar de no ser característica exclusiva de esta arquitectura (Maldonado, 1990).

Maldonado habla de características como la cubierta plana, la preferencia por el revestimiento continuo blanco y el hormigón visto en fachada, volúmenes puros, planta libre y flexible referida a mallas ortogonales y la separación clara entre materiales distintos, con un claro rechazo a la ornamentación.¹

1. Maldonado enumera los estilemas del Movimiento Moderno: “techo plano, preferencia por el enfoscado blanco, por el hormigón visto y por los volúmenes fundamentales (cubo, pirámide,

Los maestros de la denominada “segunda generación” del Movimiento Moderno, como Josep Lluís Sert, Lucio Costa, Marcel Breuer, Alfred Roth, Philip Johnson, Max Bill o Alvar Aalto, plantearon con claridad una crítica a la arquitectura de factura racionalista y a la estética maquinista.

Ha pasado ya casi un siglo y los retos de la arquitectura evolucionan. El arquitecto actual necesita herramientas proyectuales precisas que incorporar al proceso de diseño, para abordar los retos medioambientales a los que nos enfrentamos, en el marco de una crisis energética mundial: soluciones que deben ser planteadas con perspectiva global, desde una visión holística de la Arquitectura.

Los edificios, cuya utilización representa una gran parte del consumo energético mundial, deberán evolucionar del gasto a la optimización energética, llegando incluso a ser generadores en vez de consumidores de energía. Sin embargo, en el camino hacia esta arquitectura, no todo serán soluciones nuevas. También es imprescindible mirar atrás y aprender del pasado. Es posible extraer de planteamientos arquitectónicos recientes y pasados, soluciones válidas para el futuro.

Hemos aprendido de la arquitectura vernácula las soluciones arraigadas al clima y las hemos aplicado para transformar territorios, ciudades y edificios: orientación, soleamiento, posición frente a vientos dominantes, inercia térmica o sistemas constructivos, por ejemplo, específicos para cada lugar.

La investigación sobre arquitectura y energía puede abordar una revisión crítica de los planteamientos que han guiado a los arquitectos de hoy para proyectar la arquitectura del mañana.

Esta investigación pretende aportar una visión que englobe técnica y diseño en la arquitectura, analizando el modo de optimizar el uso de la energía desde la materialidad, como una parte más un edificio entendido como sistema termodinámico, que alberga procesos pero él mismo es también un proceso que demanda la presencia de energía (Fernández-Galiano, 1991)

cilindro, esfera), planta libre y flexible habitualmente referida a una malla modular ortogonal, evidenciación de la estructura en las fachadas y a veces también en el interior, separación neta entre los diferentes materiales empleados, rechazo de la ornamentación, asimetría en la configuración de la planta y las fachadas...etc”

Debemos revisar la arquitectura del pasado que, aun planteada en otro marco histórico, social y económico, pueden aportarnos soluciones válidas para el futuro.

Un primer paso, por tanto, es investigar la influencia de la tecnología constructiva como parte del diseño de un edificio. Nos proponemos evaluar el comportamiento energético de nuevos modelos de edificios basados en diseños de la arquitectura moderna en España.

Arquitectos de la tercera generación del Movimiento Moderno, como Jorn Utzon, Eduardo Reidy, Eero Saarinen, Kenzo Tange, Georges Candilis o los españoles José Antonio Coderch o Antonio Bonet Castellana, que iniciaron su actividad en la posguerra -allá por los años 50-, se distanciaron definitivamente de los inicios del Movimiento Moderno y volcaron su interés en la adecuación al entorno natural, las condiciones locales, el clima y el medio ambiente. Se acercaron a la arquitectura vernácula tomando una definitiva y clara conciencia por el lugar.

Este interés nos lleva a buscar, entre la obra de esta generación de arquitectos, los edificios que nos sirvan como modelo para iniciar esta investigación.

1.2. HIPÓTESIS

La técnica constructiva, que determina la materialidad de los edificios, es influyente en su comportamiento energético, pero son pocos los datos que nos ayudan a cuantificar y conocer hasta qué punto es determinante. Podemos establecer el límite de esta técnica en una fase inicial para el desarrollo de un proyecto de arquitectura. Hay parámetros más determinantes que otros y, además, su influencia varía según la época del año considerada.

El prejuicio que tacha la arquitectura del Movimiento Moderno de ineficiente, desde el punto de vista energético, debe ser discutido y estudiado, motivo por el que planteamos esta investigación. Partimos de edificios del arquitecto Antonio Bonet Castellana, representativos del Movimiento Moderno en España, que nos servirán como modelos para analizar los parámetros que más influyen en la demanda energética. El interés y conocimiento mostrados en su arquitectura y sus textos publicados nos indica que los aspectos energéticos fueron considerados en el desarrollo de sus propuestas. Estudiaremos si su comportamiento energético puede ser adecuado para la época del año para la que fueron diseñados.

Las propuestas que definen esta arquitectura del Movimiento Moderno incorporan soluciones, relacionadas con la eficiencia energética, válidas para extraer criterios heurísticos a incorporar a la producción de arquitectura.

La hipótesis en la que se basa este trabajo es la siguiente: la materialidad de los edificios es determinante en su comportamiento energético. La influencia de los parámetros que la definen depende del periodo del año analizado, siendo oportuno determinarla y cuantificarla para poder así establecer criterios que nos ayuden a proyectar edificios de máxima eficiencia energética para afrontar los retos medioambientales a los que nos enfrentamos.

1.3. OBJETIVOS

Todo ello conduce a los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Establecer criterios heurísticos de optimización matérica de la demanda energética, para proyectar edificios con la máxima eficiencia, en la zona climática mediterránea.

Objetivos específicos

- 1- Documentar, gráfica y constructivamente, los edificios seleccionados para la investigación, del arquitecto Antonio Bonet Castellana en la costa murciana.
- 2- Evaluar la demanda energética de los edificios seleccionados.
- 3- Aportar un procedimiento y desarrollar una herramienta informática para el análisis paramétrico de la demanda energética de los edificios.
- 4- Con lo anterior, determinar la influencia de parámetros matéricos en la demanda energética, para extraer criterios heurísticos de diseño de edificios de máxima eficiencia energética.

1.4. METODOLOGÍA

Santiago Ramón y Cajal considera tres operaciones sucesivas en toda investigación científica, a saber: observación y experimentación, suposición o hipótesis y comprobación (Ramón y Cajal, 2005).

En esta investigación, planteamos una metodología inductiva mediante un estudio de casos.

El inductivo es el un método científico que obtiene conclusiones generales a partir de premisas particulares, adquiridos a través de la observación. Fue el filósofo inglés del siglo XVI, Francis Bacon, quien le dio mayor protagonismo frente al método deductivo, para facilitar un instrumento de análisis de las experiencias mediante la recopilación de datos basados en casos concretos, para la inducción posterior de características o propiedades comunes, de lo particular a lo general.

El estudio de casos enfatiza los aspectos cualitativos y empíricos, como punto de partida. Debe estar basado en un número grande de observaciones y no lleva a certezas absolutas.

El estudio de casos es *“una estrategia de investigación dirigida a comprender las dinámicas presentes en contextos singulares”*, (Eisenhardt, 1989) pudiendo ser el estudio de un único caso o de varios casos, combinando distintos métodos para la recogida de evidencias cualitativas y/o cuantitativas, con el fin de describir, verificar o generar una teoría (Martínez Carazo, 2006).

Utilizar el método de estudio de casos supone aceptar un cierto grado de incertidumbre, pero es una herramienta válida para la investigación en el ámbito de la arquitectura, en búsqueda de criterios experimentales o heurísticos.

La Real Academia Española de la Lengua indica que un método heurístico es la *“manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc.”* No es posible proceder por prueba-error a partir de cálculos iterativos sucesivos, resultantes de la variación de los parámetros que intervienen en el comportamiento energético, ya que sería altamente improbable acertar; el procedimiento sería eterno ya que son muchas las variables y las combinaciones posibles.

Se puede establecer un símil con el cálculo de estructuras, donde es muy útil manejar reglas heurísticas para su diseño y dimensionado, en base al conocimiento racional de la influencia de las variables que entran en juego: cargas, luces, usos o tipos estructurales. De este modo se evitan infinidad de cálculos infructuosos y disparatados, resultado de una disposición inadecuada y de la selección de un tipo estructural incorrecto. En la práctica y en la literatura científica está consagrado con el nombre de *predimensionado*, *precálculo*, o *números gordos*, que son aceptados incluso por la normativa.

Un método heurístico, frente al deductivo, establece probabilidades de éxito admitiendo que no es infalible: su aplicación no garantiza el acierto. Se plantea cuando una búsqueda exhaustiva es impracticable. Puede mejorar el proceso de encontrar una solución satisfactoria.

Estableciendo reglas heurísticas apoyadas en los análisis de sensibilidad energética los arquitectos diseñarán conociendo las mejores alternativas posibles que con mayor probabilidad garantizan una optimización eficiencia energética del edificio (Dongjun et al., 2014)

Generaremos miles de casos a partir de la variación de cada edificio seleccionado, considerado como modelo. Estableceremos un procedimiento de obtención de datos y análisis de resultados para conseguir los objetivos propuestos. Buscamos la combinación de los parámetros que definen la materialidad de un edificio, para optimizar su demanda energética.

Analizaremos la sensibilidad que muestra el edificio a la variación de cada parámetro descrito.

El procedimiento aplicado a esta investigación, que desarrolla la metodología inductiva planteada, se desarrolla en el apartado 3.5 del plan de investigación.

II. ESTADO DEL ARTE

II. ESTADO DEL ARTE

2.1. OBJETIVO 2020. EDIFICIOS DE CONSUMO ENERGÉTICO CASI NULO

La arquitectura europea se dirige hacia unos objetivos de máxima eficiencia en el uso de la energía, enmarcados en una crisis ambiental global.

La Unión Europea concentra sus actividades de innovación e investigación en un Programa Marco denominado Horizonte 2020, donde aborda retos sociales, promueve el liderazgo industrial y busca el refuerzo de la excelencia de su base científica. Uno de los grandes objetivos de este programa es la lucha contra el cambio climático (Ministerio de Economía y Competitividad, 2015)¹.

Por este motivo, España y los demás miembros de la Unión Europea adquirieron unos compromisos para promover el desarrollo sostenible dentro del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que entró en vigor el 21 de marzo de 1994. Su objetivo era fomentar la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional, el uso de energías renovables y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero² (Naciones Unidas, 1998).

En noviembre de 2015 una nueva conferencia de las Naciones Unidas en París vuelve a tratar sobre el cambio climático, que ocupa un lugar prioritario en las agendas de la gran mayoría de las naciones del mundo³. El problema, lejos de solucionarse, sigue en aumento. La Organización Meteorológica Mundial, en el boletín de 9 de noviembre de 2015, indica que la concentración de CO₂ en la atmósfera ha batido un nuevo récord en 2014. Señala que *“entre 1990 y 2014 el forzamiento radiativo⁴ –que tiene un efecto de calentamiento del clima– experimentó un*

1 El objetivo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20%, ahorrar el 20% del consumo de energía mediante una mayor eficiencia energética y promover las energías renovables hasta el 20% para mantener el aumento de la temperatura global de la tierra por debajo de 2°C.

2 Los seis gases de efecto invernadero (GEI) que origina la actividad humana, contemplados en el anexo A del protocolo de Kyoto son: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFC), perfluorcarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

3 Conference des Nations Unies sur les changements climatiques COP21. CMP11.

4 El forzamiento radiativo es el flujo de energía radiante en la atmósfera debido a la absorción de radiación infrarroja terrestre por las moléculas constitutivas de los gases de efecto invernadero. Altera el balance de energía en la superficie de la tierra.

incremento del 36% a causa de los gases de efecto invernadero de larga duración, tales como el dióxido de carbono, el metano o el óxido nitroso, resultantes de las actividades industriales, agrícolas y domésticas” (Organización Meteorológica Mundial, 2015).

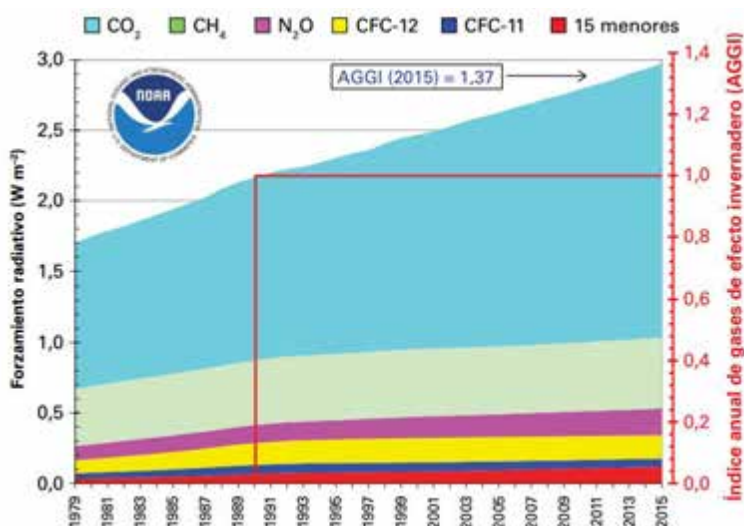


Figura 2.1.1. Forzamiento radiativo de la atmósfera debido a los Gases de Efecto Invernadero (GEI) de larga duración, respecto de 1750, y actualización de 2015 del índice anual de gases de efecto invernadero de la *National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA* (Organización Meteorológica Mundial, 2016)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Abundancia mundial en 2015	400,0±0,1 ppm	1845±2 ppb	328,0±0,1 ppb
Abundancia en 2015 respecto de 1750 ^a	144%	256%	121%
Aumento absoluto de 2014 a 2015	2,3 ppm	11 ppb	1,0 ppb
Aumento relativo de 2014 a 2015	0,58%	0,60%	0,31%
Promedio del aumento absoluto anual durante los últimos 10 años	2,08 ppm año ⁻¹	6,0 ppb año ⁻¹	0,89 ppb año ⁻¹

^a En el supuesto de que la fracción molar preindustrial fuera de 278 ppm para el CO₂, de 722 ppb para el CH₄ y de 270 ppb para el N₂O. Para los análisis se usaron los números de estaciones siguientes: 125 para el CO₂, 123 para el CH₄ y 33 para el N₂O.

Figura 2.1.2. Promedio mundial anual de las abundancias en superficie (2015) y tendencias de los principales GEI medidos por la red mundial de vigilancia de los GEI de la *Vigilancia Atmosférica Global, VAG*, de la Organización Meteorológica Mundial. Las unidades son fracciones molares de aire seco, y las incertidumbres tienen un límite de confianza del 68% (Organización Meteorológica Mundial, 2016).

La primera gran crisis energética de los años 70, con origen en las subidas del precio del petróleo de 1973, 74 y 79, provocó que los arquitectos, como parte de un sector clave en el consumo energético mundial, miraran hacia la termodinámica y se preocuparan por el control del gasto energético en los edificios. La actual crisis ambiental está obligando a los arquitectos de este siglo a volver a ocuparse de la energía en los edificios y de las cuestiones medioambientales para responder a los nuevos retos que se presentan, aprendiendo del pasado y familiarizándose con las herramientas contemporáneas (Fernández-Galiano, 2015).

La primera crisis energética generó nuevas exigencias normativas en España para los edificios con aparición de la primera Norma Básica de Edificación que se ocupa de la energía: la NBE-CT-79 (Presidencia del Gobierno de España, 1979). La actual crisis, ya en el marco de la Unión Europea, ha provocado una evolución normativa que exige nuevas prestaciones y requisitos a la arquitectura, relacionadas con el ahorro y el uso eficiente de la energía para luchar contra el cambio climático.

Esta preocupación es global: no solo moviliza a los estados sino que ha modificado las preocupaciones de la sociedad: según el barómetro de cultura ecológica de Metroscopia, el 82% de los españoles piensa que los efectos del calentamiento global no son una cuestión de futuro y según datos de una encuesta del Pew Research Center⁵, el cambio climático ya es el principal motivo de preocupación de la sociedad mundial (Toharia, 2015).

El Papa Francisco ha publicado su encíclica "*Laudato Si, sobre el cuidado de la casa común*", conocida como la encíclica verde, donde enlaza lo ecológico con lo social, pidiendo cambios profundos en los estilos de vida, los modelos de producción y consumo y las estructuras de poder. Afirma que la Tierra "*parece convertirse cada vez más en un inmenso depósito de porquería*" y llama a "*limitar al máximo el uso de recursos no renovables, moderar el consumo, maximizar la eficiencia del aprovechamiento, reutilizar y reciclar*" (Franciscus I, 2015).

A raíz de los compromisos de Kioto de 1997, la Unión Europea redacta una serie de directivas encaminadas a dar cumplimiento a los objetivos de la convención, apoyadas en el artículo 3 del Tratado, que prescribe la protección del medio ambiente en pro de un desarrollo sostenible (Unión Europea, 2010).

⁵ En un artículo publicado el 14 de julio de 2015 por Pew Research Center, donde señalan el terrorismo del Daesh como el mayor peligro (Carle, 2015)

La Directiva 93/76/CE del Consejo, de 13 de septiembre de 1993, relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de eficacia⁶ energética (SAVE) exige a los estados miembros instaurar y aplicar programas de rendimiento energético en el sector de los edificios e informar de su aplicación.

Los sectores de las economías nacionales implicados en el consumo energético son, a grandes rasgos, agricultura, industria, servicios, transporte y edificios. En lo que a nuestro campo de trabajo respecta, el paisaje -la escala territorial-, la ciudad -urbanismo- y la arquitectura adquieren gran relevancia en lo que a implicaciones energéticas se refiere. Territorio, ciudad y arquitectura.

En el año 2003, cuando ya la Unión Europea y los quince estados que la componían habían depositado en la sede de las Naciones Unidas sus respectivos instrumentos de ratificación del Protocolo de Kioto, se publica la Directiva 2002/91/CE del Parlamento europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios.

Esta directiva plantea tres objetivos fundamentales (Unión Europea, 2003):

- Endurecimiento progresivo de la reglamentación sobre calidad térmica de los edificios de nueva planta.
- Promoción de edificios de nueva planta con alta eficiencia energética.
- Identificación de medidas de mejora de la eficiencia energética en edificios existentes dentro de un contexto de viabilidad técnica y económica.

A su vez, se expone la importancia del sector de la vivienda y de los edificios en general, en el consumo final de energía de la Unión Europea, ya que supone más de un 40%. Este consumo tiene una tendencia de expansión, por lo que se prevé una gran incidencia del sector en el consumo energético a largo plazo.

Destacamos los siguientes aspectos que contempla la directiva en sus consideraciones iniciales, por la relación e interés con esta investigación (Unión Europea, 2003):

- Las medidas para mejorar la eficiencia energética deben considerar el clima local y ser compatibles con el resto de prestaciones que debe cumplir un edificio:

⁶ Nótese que aún no se emplea el término eficiencia

“Las medidas para fomentar la mejora de la eficiencia energética de los edificios deben tener en cuenta las condiciones climáticas y las particularidades locales, así como el entorno ambiental interior y la relación coste-eficacia. Dichas medidas no deben contravenir otros requisitos esenciales aplicables a los edificios, tales como la accesibilidad, la prudencia y la utilización a que se destine el edificio.”

- Relevancia del diseño del edificio, las instalaciones térmicas y las energías renovables. Destacamos la intención del “no solo el aislamiento térmico”, que potencia al resto de factores:

“La eficiencia energética de los edificios debe ser calculado con una metodología, que podrá ser diferente a escala regional, que comprenda no solo el aislamiento térmico sino también otros factores que desempeñan un papel cada vez más importante, tales como las instalaciones de calefacción y aire acondicionado, la utilización de fuentes de energía renovables y el diseño del edificio.”

- Importancia del sector y de las exigencias adaptadas al clima local:

“Los edificios tienen una gran incidencia en el consumo de energía a largo plazo, por lo que todos los edificios nuevos deberían cumplir unos requisitos mínimos de eficiencia energética adaptados a las condiciones climáticas locales.”

España traspone la directiva en tres grandes reglamentaciones relacionada con los objetivos planteados:

- RD 314/2006 Código Técnico de la edificación CTE, con el documento básico de ahorro de energía, DB HE.
- RD 47/2007 Certificación energética de edificios nuevos.
- RD 1027/2007 Reglamento de Instalaciones Térmicas de edificios (RITE).

Constituye el inicio de una reglamentación que deberá ser revisada progresivamente hasta el 2020 al menos cada cinco años⁷. Actualmente el primero de ellos está en su tercera revisión⁸, tras la realizada en el año 2013.

Tras la Directiva de 2002 se aprueban otras dos directivas relacionadas con la eficiencia energética en los años 2010 y 2012. Cada una es traspuesta en España, generando planes nacionales para alcanzar los objetivos propuestos.

⁷ Artículo 4. Requisitos de eficiencia energética, punto 1 de la Directiva 2002/91/CE

⁸ En diciembre de 2016 se publica el Documento de bases para la actualización del Documento Básico DB-HE (Ministerio de Fomento, 2016)

La Directiva 2010/31/UE, de 19 de mayo, relativa a la eficiencia energética de los edificios (*refundición*), vuelve a indicar que el 40% del consumo total de energía en la Unión Europea corresponde a los edificios, ya que utilizan un alto porcentaje de la energía total consumida en Europa.

Gran parte de las medidas necesarias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero plantean la necesidad de reducir el consumo de energía de los edificios, mejorando su eficiencia y la potenciación del uso de energía procedente de fuentes renovables (Unión Europea, 2010).

Destacamos los siguientes puntos relacionados con esta investigación:

- Objetivos para el año 2020, siendo vinculante para los estados miembros, el aumento de eficiencia energética en un 20% para ese año.
- Define los “edificios de consumo de energía casi nulo”, en el texto en inglés “*near zero energy building*”⁹, y da un plazo a los estados miembros para que los edificios nuevos sean así: el 31 de diciembre de 2020 para todos los edificios y 31 de diciembre de 2018 para los edificios nuevos que estén ocupados y sean propiedad de autoridades públicas¹⁰.
- Desarrolla la aplicación de las medidas de mejora de eficiencia energética a los edificios existentes.

La aprobación de la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética tiene por objeto crear un nuevo marco común para fomentar la eficiencia energética dentro de la Unión, estableciendo medidas orientadas a conseguir los objetivos antes citados para el año 2020 (Unión Europea, 2012).

España continúa la evolución de su normativa: una revisión del DB HE en el año 2013, con un aumento de las exigencias, un nuevo decreto, el RD 235/2013 de certificación energética de edificios aplicable a los edificios existentes y una nueva revisión del Reglamento de Instalaciones Térmicas-RITE.

Para cumplir con los objetivos de estas directivas europeas, España ha

⁹ El *near zero energy building*, en castellano, *edificio de consumo de energía casi nulo*, está definido por la Comisión Europea como: “Edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, [...]. La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno”

¹⁰ Artículo 9 de la Directiva 2010/31/CE

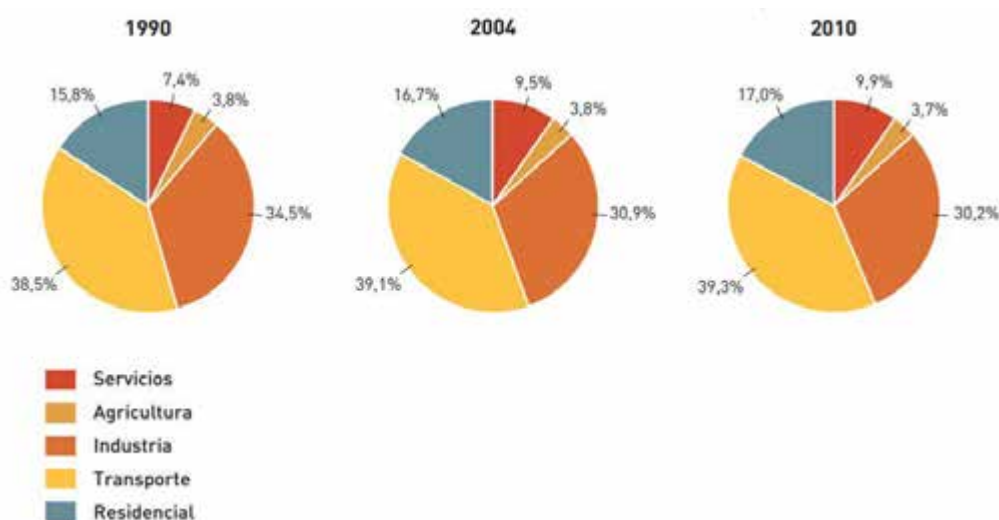


Figura 2.1.3. Evolución de la estructura sectorial de la demanda de energía final en España. Fuente MITYC / IDAE (España, 2011)

aprobado sucesivos planes nacionales de ahorro, eficiencia energética y fomento de las energías renovables¹¹ así como programas de ayudas para la rehabilitación energética de edificios existentes, ya que a España le toca reducir su consumo energético total un 26,4% en 2020.

El sector de edificación tiene un enorme potencial de ahorro energético en España, con un objetivo marcado de 87,1 ktep/año¹² –un 15% de los 571 ktep/año previsto como ahorro global para todos los sectores- (España, 2014).

El *Plan de Energías Renovables 2011-2020* busca cumplir con los objetivos de reducción del uso de la energía en todos los sectores, detallando la parte relacionada con el sector edificación y equipamiento en el capítulo 9 (España, 2011).

El *Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2014-2020* indica que el consumo de energía final del sector en España representa el 30,8% del consumo de energía final nacional para usos energéticos¹³ (25 534 ktep en 2012), siendo el 18,6% correspondiente a edificios de uso residencial y el 12,1% a edificios destinados a servicios (España, 2014).

11 Estrategia de ahorro y eficiencia energética 2004-2012, PAEE 2011-2020, PER 2011-2020, PNAEE 2014-2020)

12 Una ktep son mil toneladas equivalentes de petróleo (tep)

13 El plan considera los servicios que tienen un mayor peso sobre el consumo energético en el Sector Edificios: las instalaciones térmicas de calefacción, climatización, ventilación y producción de agua caliente sanitaria, iluminación interior, así como el resto de equipamiento habitual en función de los sectores de actividad (electrodomésticos, frío comercial e industrial, ofimática, etc.)

La consecución de estos objetivos en el sector de los edificios requiere de dos líneas de actuación: por un lado, la mejora del parque edificado y por otro, el aumento de las exigencias normativas a los edificios nuevos.

Respecto a los edificios existentes, las ayudas públicas destinadas a la rehabilitación energética de los edificios –como el Programa PAREER-CRECE– plantean cuatro tipos de actuaciones: dos relativas a la mejora de la eficiencia energética (tipo 1, mejora de la envolvente térmica y tipo 2, mejora de las instalaciones térmicas y de iluminación) y dos relativas a la sustitución de energías convencionales por energías renovables (tipo 3, sustitución de energía convencional por biomasa en las instalaciones térmicas y tipo 4, sustitución de energía convencional por energía geotérmica en las instalaciones térmicas).

En el año 2013, al publicarse el Real Decreto 235/2013 *de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios*, España traspone la exigencia de que los edificios sean de consumo energético casi nulo en los plazos que indica la directiva europea. Es un paso previo a una arquitectura autosuficiente de muy bajo consumo de energía procedente de fuentes no renovables y por lo tanto de mínimas emisiones de gases de efecto invernadero con miras, incluso, a que los edificios generen energía en vez de consumirla.

La normativa española surgida como consecuencia de todo lo anterior plantea las exigencias de eficiencia energética para los edificios, limitando tanto la energía que necesita el edificio para mantener las condiciones de confort, lo que denominaremos demanda energética, como el consumo de energía no renovable del edificio –la que provoca emisiones de GEI–.

La cuantificación de lo que denominamos eficiencia energética de los edificios se convierte en una cuestión esencial.

La Directiva 2010/31/UE la define “*eficiencia energética del edificio*” como la cantidad de energía calculada o medida que se necesita para satisfacer la demanda de energía asociada a un uso normal del edificio que incluirá, entre otras cosas, la energía consumida en la calefacción, la refrigeración, la ventilación, el calentamiento del agua y la iluminación”.

La definición de la Directiva 2012/27/UE parece más acertada: “*relación entre la producción de un rendimiento, servicio, bien o energía, y el gasto de energía*”, queda

claro que la cuantificación de demandas y consumos energéticos en los edificios es necesaria para la evaluación de estos conceptos.

En diciembre de 2016 se publica el *Documento de bases para la actualización del Documento Básico DB-HE* (Ministerio de Fomento, 2016), donde se plantea la revisión de las exigencias reglamentarias para los edificios con el objetivo de reducción de consumo energético, en la línea de lo establecido en el artículo 9 de la Directiva 2010/31/UE, relativo a los edificios de consumo de energía casi nulo. Es ya el planteamiento de la segunda revisión del documento básico.

En consecuencia, la arquitectura se enfrenta a grandes retos relacionados con el uso de energía: las instalaciones y servicios deben buscar el máximo rendimiento, las fuentes de energía no renovables deben sustituirse por energías limpias, los criterios de eficiencia energética deben ser un eje fundamental del diseño arquitectónico teniendo en cuenta el lugar donde se ubica el edificio y todo esto sin descuidar el resto de prestaciones que un edificio debe aportar al habitante.

La energía en el sector residencial en España

El Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético -IDAE- desarrolló durante los años 2011 y 2012 el estudio *SPAHOUSEC*, con el objetivo de conocer y analizar el consumo energético de más de 17 millones de hogares en España. El informe incluye el análisis de los datos por usos y fuentes de energía, así como las características del equipamiento por tipos de vivienda y organizado por zonas climáticas. Los principales resultados son los siguientes (IDAE, 2011).

El consumo energético, a nivel nacional y en la zona climática mediterránea, es el siguiente:

TABLA 2.1.1. CONSUMO ENERGÉTICO A NIVEL NACIONAL Y EN LA ZONA CLIMÁTICA MEDITERRÁNEA. FUENTE: PROYECTO SECH-SPANHOUSEC, (IDAE, 2011)

Servicio	España (%)	Z. Climática Mediterránea (%)
Calefacción	47,00	40,9
Agua Caliente Sanitaria	18,9	19,9
Cocina	7,4	7,1
Refrigeración	0,8	1,1
Iluminación	4,1	5,7
Electrodomésticos	21,7	25,6

La mayoría de los hogares dispone de algún sistema de calefacción, agua caliente sanitaria y electrodomésticos de cocina. Los sistemas de refrigeración tienen menor presencia, lo que explica el bajo porcentaje de éste en el consumo energético. El 49% de los hogares dispone de algún sistema de refrigeración, básicamente individual. La instalación es mayor en las zonas cálidas (66,7%) y muy baja en las frías, que apenas alcanza el uno por ciento de los hogares.

TABLA 2.1.2. PORCENTAJE DE VIVIENDAS CON INSTALACIÓN DE LOS SERVICIOS INDICADOS POR ZONAS CLIMÁTICAS. FUENTE PROYECTO SECH-SPANHOUSEC (IDAE, 2011)

Servicio	Atlántico N. (%)	Continental (%)	Mediterránea (%)
Calefacción	92,8	95,1	86,2
Agua Caliente Sanitaria	99,9	99,7	99,9
Cocina	100	100	100
Refrigeración	1,1	39,3	66,7
Iluminación	100	100	100

De este consumo, la electricidad es la fuente de energía mayoritaria, con un 35,1%, seguido del gas natural (24,9%), derivados del petróleo (22,1%), energías renovables (17,1%) y carbón (0,1%).

El 11,2% de los hogares (otras fuentes del IDAE hablan del 15%) disponen de algún tipo de energía renovable, siendo mayoritario en viviendas unifamiliares (22%) frente a vivienda colectiva (6%). Con la entrada en vigor del CTE y la exigencia de utilización de energía solar térmica para el agua caliente sanitaria es de esperar un aumento de este porcentaje.

En edificios existentes, la rehabilitación energética puede suponer un ahorro significativo, aunque hay distintas investigaciones que afirman que no siempre será así, pues existen desviaciones importantes entre el comportamiento energético esperado y el real, sobre todo en edificios situados en áreas climáticas cálidas. Si el edificio carece de prestaciones de confort no existe relación directa entre el consumo energético previsto en una simulación y el real. (Sendra, et al., 2013).

El gasto medio anual por hogar es de 990€. Problemas relacionados con la sostenibilidad social -con lo que denominamos pobreza energética-, hacen que muchos hogares no puedan hacer frente al gasto que provoca el mantenimiento de las condiciones de bienestar en sus viviendas. La arquitectura debe afrontar su solución como uno de los grandes retos de nuestro siglo.

2.2. ANTECEDENTES. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Procedemos a realizar una revisión bibliográfica para conocer las investigaciones científicas que se han realizado sobre la cuestión planteada. La exigencia normativa de proyectar edificios de consumo energético casi nulo implica la necesidad de avanzar en el conocimiento de arquitectura y energía: optimización energética de edificios, predicción a través de simulación informática o metodologías y procedimientos de análisis de datos.

2.2.1. Investigaciones científicas sobre energía y arquitectura en España

Los arquitectos Luis Fernández-Galiano y Francisco Javier Neila González, con sus tesis doctorales *Termodinámica y construcción* (Fernández Galiano, 1983), y con *El diseño de la vivienda como elemento de control energético*, (Neila González, 1984), leídas ambas en la Universidad Politécnica de Madrid, iniciaron el camino de la investigación doctoral en España sobre arquitectura y energía en la década de los 80, tras la gran crisis energética mundial de los 70.

El Dr. Neila González planteó el análisis de los edificios en la búsqueda de la reducción de su consumo energético, optimizando el diseño arquitectónico, sin modificar el grado de confort ni aumentar el coste del edificio. Analiza los parámetros que inciden en la forma global del edificio y en su construcción, considerando su comportamiento estacional (Neila González, 1984).

Tras la publicación de su tesis, el catedrático ha realizado una prolija labor investigadora que ha sido ampliamente publicada. El Instituto Juan de Herrera publicó destacados títulos como *Condiciones de diseño higrotérmico*, *El soleamiento del edificio* (2000), *La acumulación de energías renovables* (2000), *La conservación de energía y el cálculo de necesidades* (2001) o *Estrategias bioclimáticas para condiciones de verano* (2001)¹, y suyos son libros de gran relevancia en el campo de la arquitectura como *“Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible”* (Neila González, 2004)

Es autor de más de cincuenta publicaciones donde trata aspectos relacionados con la arquitectura bioclimática, el acondicionamiento, la energía, el soleamiento o la sostenibilidad, aportando estrategias de diseño energético optimizado de edificios. Dedicaremos el apartado 2.2.5 a la exposición de esta cuestión.

¹ Disponibles en la web del Instituto Juan de Herrera (E.T.S. Arquitectura Madrid, s.f.)

Luis Fernández-Galiano, en su tesis doctoral, se propuso analizar los flujos energéticos de la edificación para dotar de herramientas científicas al proceso de diseño (Fernández-Galiano, 2015), planteamiento tan vigente hoy como en la época de su publicación.

Las tesis doctorales publicadas en España² desde el año 1981 hasta la actualidad, relacionadas con la investigación son 58.³

La gran mayoría de las tesis doctorales han sido desarrolladas en departamentos de ingeniería, siendo mucho menor las realizadas en departamentos de arquitectura. En los últimos años esta tendencia está cambiando.

Se advierte un aumento en el interés del tema en los últimos años, donde se acumulan la mayor parte de las investigaciones doctorales, debido no solo al aumento del número de tesis leídas en España, sino también a la relevancia del asunto a nivel mundial. Entre éstas, se trata el tema de la simulación energética de edificios y aspectos relacionados con consumo y demanda energética (fig. 2.2.1).

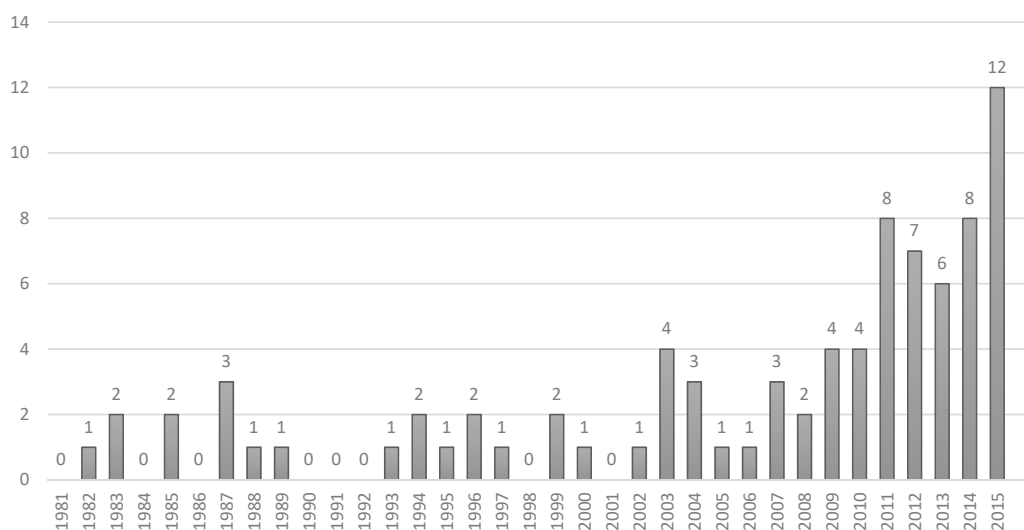


Figura 2.2.1. Número de tesis doctorales relacionadas con arquitectura y energía leídas en España entre 1981 y 2015. Fuente: elaboración propia con datos de la base de datos de tesis doctorales TESEO, del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (<https://www.educacion.gob.es/teseo/irGestionarConsulta.do>)

² En el registro de TESEO- del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte- hay 204 586 tesis registradas entre los cursos 81-82 y 2015-16, siendo 96 930 las registradas en los últimos diez años.

³ Datos obtenidos de la web TESEO hasta el 26/7/2016, con títulos relacionados con eficiencia, energía, arquitectura, edificios, optimización, demanda, consumo, rehabilitación, envolvente, simulación y termodinámica.

Si ampliamos el campo a temas relacionados con el diseño y la arquitectura bioclimática, sostenible o arquitectura y clima aparecen más investigaciones, hasta un número en torno a la centena.

Queda constatado el creciente interés de los últimos años.

Sobre el tema específico de la simulación de edificios y la optimización energética no encontramos muchas investigaciones predoctorales pero si multitud de artículos científicos.

Son once las tesis publicadas específicamente sobre simulación energética de edificios, la mayor parte de ellas en los últimos años. Sobre optimización séis, y monitorización únicamente hemos encontrado una.

Son relevantes las investigaciones publicadas en artículos científicos que plantean la relación entre simulación y datos reales obtenidos con mediciones in situ. Un ejemplo es el desarrollado por los investigadores del Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción de la Universidad de Sevilla⁴.

El análisis de sensibilidad energética de edificios como metodología es tratado en dos tesis doctorales, entre las que destacamos la del Dr. Massimo Palme, publicada en 2010 en la Universidad Politécnica de Cataluña.

2.2.2. Estudio energético de edificios. Simulación informática

Las simulaciones energéticas son modelos de cálculo deterministas que evalúan el comportamiento energético de un edificio con medios informáticos. Si repetimos un proceso de cálculo, el resultado será el mismo y por tanto es predecible. La naturaleza no es predecible y mucho menos el ser humano en su comportamiento: muchos estudios sobre el tema concluyen que el uso del edificio por parte de sus ocupantes puede producir diferencias de consumo energético de hasta el 100%. Estudios Holandeses demostraron que viviendas idénticas tenían consumos muy distintos en función del uso que hacían las familias (ATECYR, 2008).

Un edificio no responde a un modelo producido en serie: es complicado realizar dos edificios iguales ya que son múltiples los parámetros que influyen en su diseño y, aun siendo idénticos en diseño y construcción, las condiciones climáticas

4 <http://www.iucc.us.es/index.php/en/> Persona de contacto J.J. Sendra.

exteriores varían en función de su ubicación. No es habitual la investigación y la producción de arquitectura mediante el estudio de prototipos construidos debido a su alto coste y a la gran incertidumbre que genera el uso del edificio que cada habitante hace de él.

Tras la irrupción de la informática, los procedimientos de evaluación de prototipos y modelos a escala, con poco desarrollo previo, desaparece del proceso proyectual, quedando enmarcados exclusivamente en el ámbito de la investigación científica y universitaria.

Hay experiencias muy interesantes en los años 60, como la de los arquitectos húngaros Victor y Aladar Olgyay, que desarrollaron en el laboratorio de arquitectura de Princeton el *Thermohelidon*, primer intento de conceptualizar el clima como un sistema de entrada y salida de datos predecible (fig. 2.2.2) (Barber, 2014).

Los hermanos Olgyay exploraron métodos que buscaban ajustar el proceso de diseño arquitectónico para mejorar la relación entre el edificio y su entorno climático. Fueron profesores en el MIT en Princeton y sus dos libros *Solar control an shading devices*, publicado en 1957 y *Design with climate: a bioclimatic approach to architectural regionalism*⁵, publicado en 1963 (Olgyay, 2002), formaron parte de los planes de estudios de las escuelas de arquitecturas de todo el mundo (fig. 2.2.3).



Figura 2.2.2. Los inventores del Thermoheliodon, Aladar y Victor Olgyay, probando un modelo de una vivienda. Fuente: Collier's magazine, junio de 1956 (Barber, 2014)

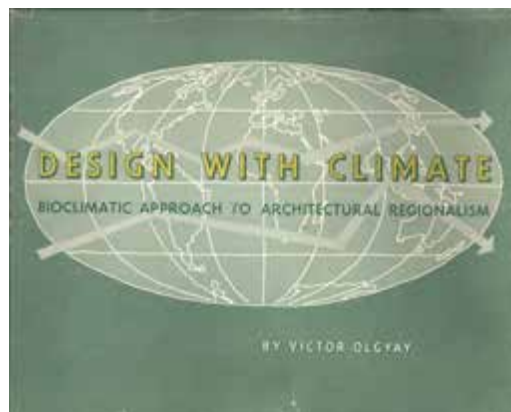


Figura 2.2.3. Portada del libro de Victor Olgyay, publicado en Princeton en 1963

Otra vía de estudio del comportamiento energético de los edificios es el análisis de ejemplos construidos y en uso. Obtenemos datos reales de comportamiento energético con mediciones in situ obtenidas mediante monitorización del edificio.

Son relevantes las investigaciones que lleva a cabo en España el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas del Ministerio de Economía y Competitividad, CIEMAT. Destacamos las dos sublíneas de investigación sobre eficiencia energética, denominadas *“evaluación energética experimental de componentes constructivos y edificios”* y *“análisis energético en entornos urbanos”*, enmarcados en el grupo de energías renovables. La primera plantea la incorporación de evaluaciones basadas en campañas experimentales en búsqueda de información complementaria a la aportada por los estudios basados en simulaciones (CIEMAT, 2016).

Existen experiencias de diseño urbano y toma de datos a escala de ciudad en el barrio zaragozano del Valdespartera, en una investigación llevada a cabo por el Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza (AA.VV., 2010).

El arquitecto Fernando de Retes Aparicio proyectó y construyó el Centro de Agroecología y Medio Ambiente, CEAMA, en Bullas (Murcia), que fue galardonado con el Premio Regional de Arquitectura en el año 2009. El autor indica que *“es un proyecto abierto para la investigación arquitectónica en el campo de los valores medioambientales y paisajísticos, no solo en su propuesta y ejecución, sino en el seguimiento de los resultados obtenidos. Para ello se está realizando un proyecto de monitorización de los datos de confort obtenidos, que podrán conocerse online en su página web”* (de Retes Aparicio, 2009), (fig. 2.2.4 y 2.4.5).

En la actualidad, la auditoría energética (regulada en España por el Real Decreto 56/2016 que traspone la Directiva 2012/27/UE) es un procedimiento sistemático destinado a obtener conocimientos adecuados del perfil de consumo de energía existente en un edificio y para determinar y cuantificar las posibilidades de ahorro de energía a un coste eficiente (España, 2016).

Mediante esta auditoría se analiza el comportamiento energético del edificio para buscar alternativas de mejora y optimización del uso de la energía. Es un campo de trabajo e investigación muy interesante para evaluar el comportamiento de un edificio concreto y aportar las medidas de mejora.

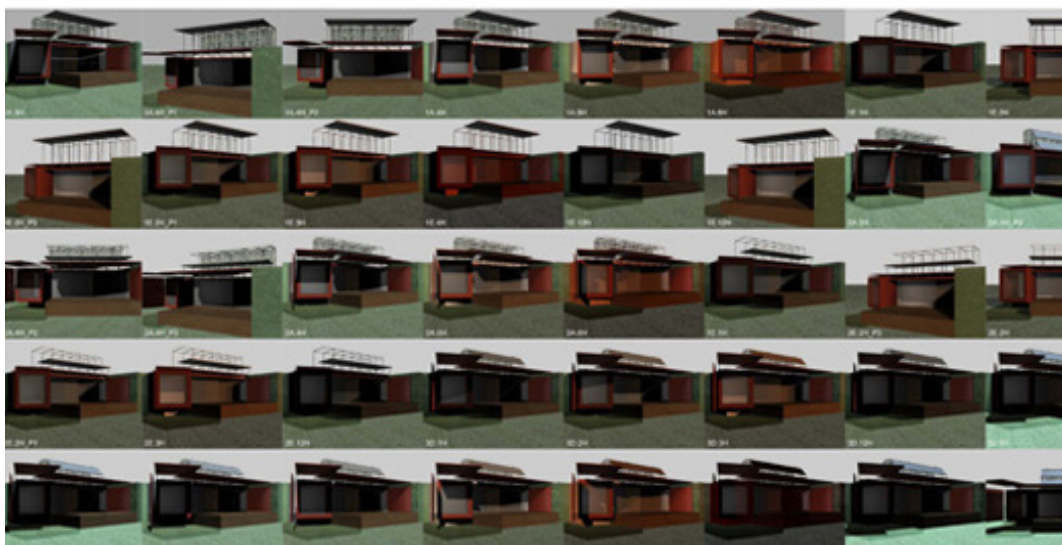


Figura 2.2.4. Estudios de soleamiento del Centro de Agroecología y Medio Ambiente de Bullas, 2007. Arquitecto: F. de Retes Aparicio. Fuente: web del estudio de arquitectura Retes Arquitectos http://retesarquitectos.org/obra/Agroecologia_3.html



Figura 2.2.5. Centro de Agroecología y Medio Ambiente de Bullas, 2007. Arquitecto Fernando de Retes Aparicio. Foto Damián Guirado Escámez, diciembre de 2016.

Las aplicaciones informáticas de simulación energética de edificios están plenamente implantadas e incorporadas al proceso proyectual, tanto en obra nueva como en intervenciones de rehabilitación en edificios existentes.

Las normativas europeas y las españolas incorporan exigencias a los edificios que limitan tanto la demanda como el consumo energético. La verificación se debe realizar mediante simulación dinámica térmica con aplicaciones informáticas y se debe justificar en fase de proyecto.

La simulación energética consiste en predecir cronológicamente el comportamiento de un objeto físico con medios informáticos. Se suele denominar "*discrete time simulation*" o "*simulación en tiempo discreto*" y es la forma en la que la mayoría de programas de simulación de edificios actuales trabajan. Su objetivo es, por consiguiente, conocer durante un periodo de tiempo dado una determinada característica energética o de regulación de un sistema (ATECYR, 2008).

Existen distintos métodos de simulación energética. La que se impone como procedimiento actual es la simulación dinámica, frente a la estática o a los procedimientos simplificados (García Casals, 2006). La simulación dinámica del comportamiento térmico de edificios es una técnica que predice los cambios en las condiciones térmicas internas hora a hora, durante un periodo de hasta un año. La técnica predice variables para cada zona o local tales como la temperatura, la temperatura radiante, el número de renovaciones de aire a la hora, la demanda energética y otras variables de interés, a partir de los datos climáticos de la localidad en base horaria (Universidad de La Rioja. Dpto. Ingeniería Mecánica, 2016)

El desarrollo de la simulación energética de edificios posibilitará la calificación energética empírica de las edificaciones según describe la Directiva Europea sobre Eficiencia Energética de Edificaciones 2010/31/EU, para lo que se ha creado el Annex 58 -Acuerdo de implementación sobre conservación de la energía en los edificios y servicios comunitarios (ECBCS) de la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency, s.f.).

En el plano internacional, en Canadá se desarrolla la bienal sobre simulación de edificios, *Canada's Building Simulation Conference -eSim-*. La novena edición tuvo lugar en la MC Master University of Hamilton, del 3 al 6 de mayo de 2016 (IBPSA-Canada's Biennial Conference, 2016).

El interés del campo de la arquitectura no se centra únicamente en el cumplimiento de normativas sino que busca la optimización en el uso de los recursos: estas herramientas informáticas se emplean para optimizar el comportamiento energético de los edificios de un modo predictivo y en fase de diseño.

Según Enríquez Miranda (2013), un edificio es un sistema termodinámico abierto y no adiabático que intercambia masa y energía con su entorno. El autor organiza los principales procesos físicos que contribuyen a la definición del estado térmico del edificio en:

- Conducción del calor a través de los elementos sólidos.
- Intercambios de radiación de onda larga entre las superficies interiores, y entre las superficies exteriores y el entorno.
- Transmisión y Absorción de la radiación solar.
- Transferencia de calor convectiva en las interfases aire-superficie.
- Transferencia de calor convectiva por transporte de masas de aire entre las diferentes zonas de un edificio, y entre cada zona y el entorno que lo rodea.

Un modelo digital (modelo-D) de un edificio es una formulación matemática que permite el cálculo de las magnitudes energéticas de interés a partir de aproximaciones numéricas de los fenómenos físicos involucrados (Enríquez Miranda, 2013)

El autor clasifica los modelos digitales de los edificios atendiendo a la hipótesis de comportamiento temporal de la edificación, entre los que estudian los fenómenos de manera estacionaria y dinámica. En función de la cantidad de ecuaciones que se implementan en su formulación matemática se dicen modelos de alto y bajo orden. Si se construyen en función de datos experimentales son empíricos o teóricos si se desarrollan a partir de principios físicos.

En la actualidad, existen múltiples aplicaciones informáticas de simulación dinámica para la evaluación energética de edificios.

El Departamento de Energía estadounidense ofrece programas como el DOE-2, desarrollado por la Universidad de Strathclyde, que fue el resultado de un desarrollo iniciado en 1970. BLAST, o *Building Loads Analysis and System Thermodynamics*, fue desarrollado por el *National Institute of Standards and Technology* -NIST- de Estados Unidos.

También es norteamericano el TRNSYS -*Transient Simulation of Systems* (TRNSYS, 1975), por la Universidad de Wisconsin-Madison.

DOE-2 y BLAST se unieron en un nuevo programa, llamado EnergyPlus, con gran implantación en todo el mundo.

En la siguiente figura se expone la evolución temporal de los métodos de simulación energética (fig. 2.2.6).

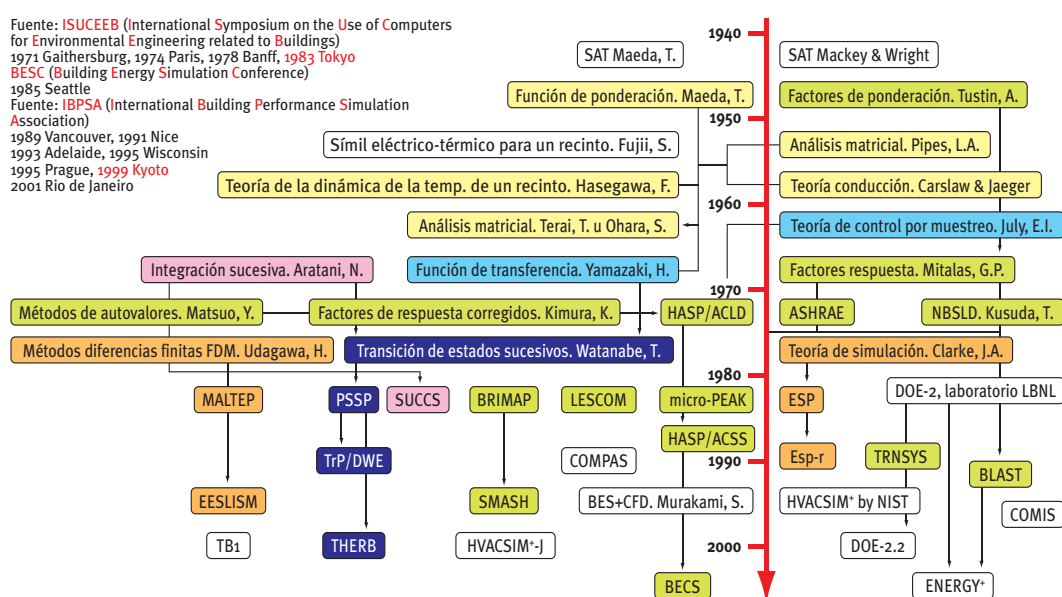


Figura 2.2.6. Esquema temporal de ejemplos de métodos, autores y programas. (ATECYR, 2008)

Europa no dispone de una organización que desarrolle este tipo de aplicaciones. Los estados miembro de la UE han desarrollado de forma autónoma diversos programas, como el BSIM, de Dinamarca (Instituto Danés para la investigación en edificios), el ESP-r, de Inglaterra (Universidad de Strathclyde, Glasgow) o el IDA-ICE, de Suecia.

En España, el programa de simulación energética del Ministerio de Fomento y del IDAE es la *Herramienta Unificada LIDER-CALENER -HULC-⁶*, que incluye la unificación en una sola plataforma de los programas generales oficiales empleados hasta el año 2013 para la evaluación de la demanda energética y del consumo energético (LIDER y CALENER).

6 Disponible en <http://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener>

La herramienta se ha ido adaptando a la evolución normativa desde su aparición. Ha sido desarrollada por el grupo Termotecnia de la Universidad de Sevilla⁷.

También hay empresas privadas que producen programas comerciales, que introducen de forma sencilla el modelo-D del edificio en programas norteamericanos de código abierto (como EnergyPlus), como el IISIBAT, del Instituto para la edificación francés CSTB que utiliza TRNSYS, o el Design-Builder inglés, que genera ficheros *idf* de intercambio (ATECYR, 2008). En España Cype Ingenieros ha desarrollado una herramienta que conecta con EnergyPlus y a su vez calcula demandas energéticas en base a la norma UNE-EN 12831:2003 *Sistemas de calefacción en edificios. Método para el cálculo de la carga térmica de diseño* ⁸.

Disponemos de programas de código abierto como OpenStudio⁹, desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EEUU (NREL). Actúa de interfaz gráfico para EnergyPlus y facilita la tarea del modelizado.

Según el departamento de Energía de Estados Unidos -DOE-, el número de motores de simulación energética existentes utilizados en el proceso de diseño es cada vez mayor.

Las herramientas van posibilitando cada vez más su utilización en el proceso proyectual del edificio. De las 413 herramientas que aparecen en la web del DOE en 2012, únicamente 18 trabajan con la optimización energética (figura 2.2.7). También se aprecia que su desarrollo está en aumento (Attia et al. 2015).

7 Herramienta de la Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo del Ministerio de Fomento y por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, IDAE, y ha sido realizada por el Grupo de Termotecnia de la Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía, AICIA, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, con la colaboración de la Unidad de Calidad en la Construcción del Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, IETCC (CSIC).

El equipo de trabajo:

- Grupo de Termotecnia: Servando Álvarez Domínguez; José Luis Molina Félix; José Manuel Salmerón Lissén; Rafael Salmerón Lissén; Manuela Gordillo Bellido; Raúl García Blanco; Miguel Puig García; Juan Francisco Coronel Toro (ESTO2)

- Grupo de Ingeniería Térmica de la Universidad de Cádiz (UCA): Francisco José Sanchez de la Flor; Álvaro Ruiz Pardo; José Sánchez Ramos; Ismael Rodríguez Maestre (ESTO2)

8 En la fecha de consulta (14/1/2017), AENOR indica que esta norma UNE será anulada por PNE-prEN 12831-1 *Sistemas de calefacción y refrigeración por agua en los edificios. Método para el cálculo de la carga térmica de diseño. Parte 1: Carga térmica de los locales*

9 Disponible en <https://www.openstudio.net/>

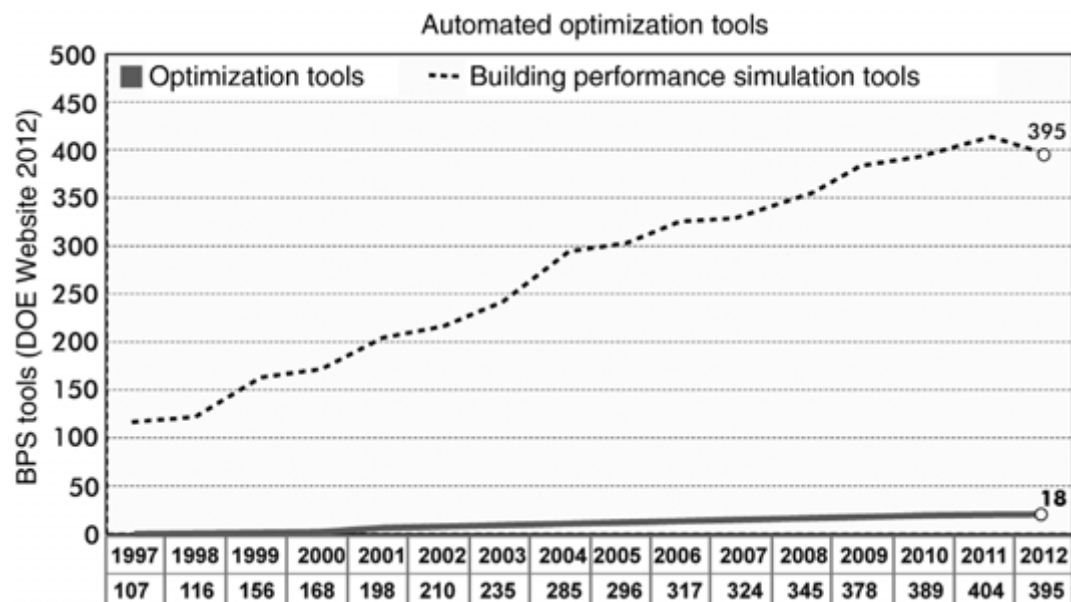


Figura 2.2.7. Evolución del número de herramientas de simulación energética y de optimización energética (Attia et. al., 2015)

Simulación y monitorización de edificios construidos son las herramientas utilizadas actualmente en la investigación.

Sirva como ejemplo la tesis doctoral del arquitecto Requena Ruiz (2011), que plantea el estudio de la obra de Le Corbusier desde una visión histórica y técnica. Su metodología incluye tanto la simulación informática como la monitorización de los edificios seleccionados. Para la simulación, utiliza dos programas: Designbuilder, que utiliza el motor de cálculo EnergyPlus, y Autodesk Ecotect Analysis.

En los artículos científicos de ámbito nacional se utilizan los distintos programas informáticos disponibles para el desarrollo de las investigaciones, predominando los que utilizan la herramienta del Ministerio de Fomento -HULC- y los que trabajan con *EnergyPlus*, a través de software de modelizado como *DesignBuilder*¹⁰.

10 Distribuidor oficial en España Aurea consulting. web: <https://designbuilder.co.uk/>

2.2.3. La incertidumbre en los resultados de la simulación

Dado el alto número de parámetros que intervienen en el comportamiento energético de un edificio, existe una gran incertidumbre en el resultado ante la variación de los mismos. La predicción de un buen comportamiento es clave en la toma de decisiones en un proceso proyectual.

Según describe Kim (2013, citado por Bucking et al., 2014) existen distintas áreas de incertidumbre en la investigación de simulación de edificios: (i) incertidumbre estadística, usando datos históricos, como temperatura exterior, radiación solar...etc., (ii) incertidumbre causada por discrepancias en el modelo y el edificio construido, (iii) errores de medida como propiedades térmicas de los materiales, (iv) incertidumbre estadística, cuando no existen datos históricos, como los hábitos de los usuarios, ocupación, horarios...etc

Uno de los artículos más citados de la revista *Journal of Building Performance Simulation* trata la incertidumbre y la relaciona con la simulación energética: es "*Uncertainty and sensitivity decomposition of building energy models*" (Eisenhower, et al., 2012).

En publicaciones nacionales, como la revista del CESIC Informes de la Construcción, encontramos múltiples artículos relacionados con la cuestión. El primer premio de la publicación en 2015 es el artículo titulado "*Hacia una calibración de modelos energéticos: Caso de estudio del parque residencial español en clima mediterráneo*", de Teresa Blázquez, R. Suárez y J.J. Sendra. Los autores inciden en la necesidad de relacionar directamente la mejora de la eficiencia energética de los edificios construidos y el confort con el conocimiento de su comportamiento energético real. Concluye que es imprescindible la monitorización bajo condiciones de ocupación real para conocer el comportamiento energético y ambiental de los edificios. Los autores abogan por calibrar los modelos digitales para aproximar los resultados de simulación a las condiciones reales y así poder predecir y optimizar el potencial de mejora en la rehabilitación (Blázquez, et al., 2015).

En los proyectos de rehabilitación de edificios, así como en los de obra nueva, utilizamos la simulación para predecir datos referentes al uso de la energía, como la iluminación natural o artificial, la demanda y el consumo energético que permiten evaluar la reducción que se producirá tras la intervención.

Blázquez, et al. (2015) describen la gran incertidumbre existente debida al alto número de parámetros intervinientes y la necesidad de reducirla para optimizar las propuestas¹¹. El artículo concluye que:

- La rehabilitación debe basarse en datos reales del edificio. Es esencial realizar una campaña de monitorización y hallar modelos energéticos en un proceso de calibración.
- Los procesos de calibración deben ser llevados a cabo mensualmente utilizando datos horarios, como hacen todos los programas de simulación. Necesitamos información detallada para la calibración
- La metodología de calibración propuesta busca reducir el número de parámetros -reducir la incertidumbre- y evaluar individualmente su efecto en el modelo energético utilizado en el análisis de sensibilidad.
- Para la zona climática que estudia -zona B4- concluye que la radiación solar a través de los huecos es un factor determinante. Considerar todas las posibilidades de protección solar, tanto las existentes como las incorporadas, incluida la vegetación, es esencial. Es muy importante también evaluar los efectos de la infiltración de aire en las viviendas, y es necesario en rehabilitación, conocer las condiciones de infiltración reales para disminuir el nivel de incertidumbre del modelo energético.

Los autores exponen también que los patrones de uso e intensidad en las simulaciones deben ser adaptados a la región sur de España -zona de su investigación- para una mayor correspondencia con la realidad y hacer simulaciones más precisas. En estas zonas hay grandes diferencias en cuanto al consumo de calefacción y refrigeración, el primero por utilizarse poco y el segundo por falta de instalación (IDAE, 2011).

Los datos climáticos que utilizan los programas están basados en estadísticas contrastadas. En España, se organiza en zonas climáticas, definida por el CTE como la zona para la que se definen unas solicitaciones exteriores comunes a efectos de cálculo de la demanda energética (Ministerio de Fomento, 2015).

En cualquier caso, la relación entre demanda y consumo energético no es tan directa como en otras localizaciones geográficas más frías. Además, el usuario de bajo nivel económico no prioriza el confort o en su previsión de gastos (Sendra, et al., 2013). Volvemos a citar el problema social de la pobreza energética.

11 El software de simulación que utilizan es DesignBuilder (v.2.4.2)

2.2.4. La investigación sobre optimización energética

La BPO -*Building Performance Optimization*, en castellano *optimización del rendimiento de los edificios*- tiene como objetivo seleccionar las soluciones óptimas a partir de un conjunto de alternativas disponibles para un edificio determinado, en función con un conjunto de criterios de rendimiento y limitaciones existentes. Estos criterios se expresan como funciones matemáticas que los autores llaman funciones objetivas -*objective functions*-, combinación de diferentes tipos de algoritmos de optimización para optimizar una o más funciones de diseño. Se busca mejorar los impactos en coste, uso de la energía, impacto ambiental (energía incorporada, ciclo de vida...), en condiciones de confort interior en los edificios (Attia, et al., 2015).

Es necesario objetivar las decisiones proyectuales a partir de las restricciones existentes, tanto del propio edificio objeto de estudio como las impuestas por normativas y el entorno.

En arquitectura no existe un único parámetro que estudiar, por lo que se trabaja con lo que Attia et al. (2015) denominan optimización multiobjetivo -*multiobjective optimization*-.

Utilizamos técnicas de visualización para extraer información relevante relacionada con compensaciones en los rendimientos, reducción de incertidumbres y análisis de sensibilidad del edificio a las variación de los parámetros.

Los objetivos europeos que llevan a la exigencia de proyectar y construir edificios de consumo energético casi nulo (lo que internacionalmente se denomina net Zero Energy Building -nZEB-) está cambiando el modo en el que el arquitecto aborda un proyecto dado que la evaluación de las diferentes opciones de diseño es cada vez más ardua: interactúan parámetros relacionados con el diseño del edificio, como su forma, orientación o construcción y con las instalaciones que garantizan el confort (Hayter et al., 2001 citado por Attia et al., 2015).

En la figura 2.2.8. los autores nos muestran el número de veces, tras una revisión bibliográfica, que una herramienta de simulación energética o BPS y una de optimización o BPO se ha utilizado para optimizar el diseño de un edificio (Attia, et al., 2015)

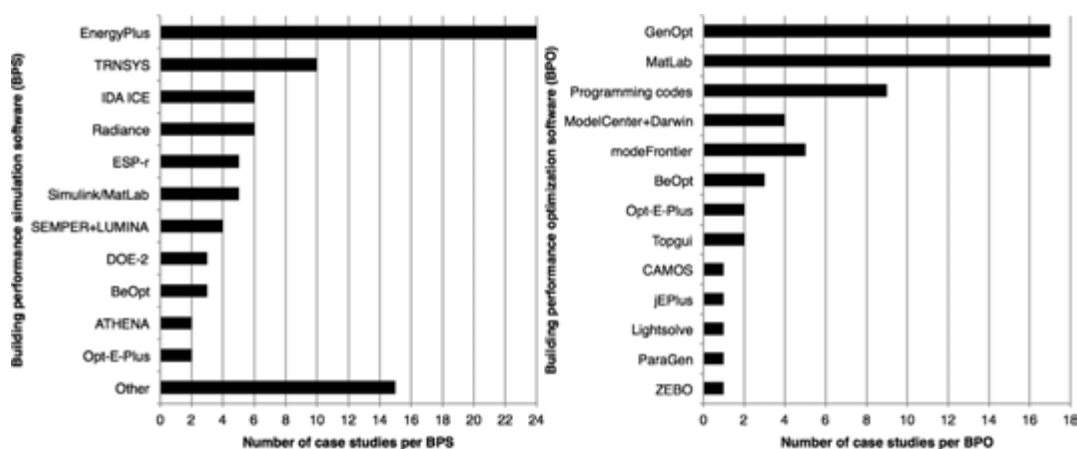


Figura 2.2.8. Número de herramientas de simulación energética utilizadas en la revisión bibliográfica aportada por Attia et al., 2015

Por todo ello, una solución a esta cuestión es trabajar la optimización energética de los edificios -BPO- utilizando los procedimientos de simulación energética por ordenador -la BPS o Building Performance Simulation.

El análisis de sensibilidad es la metodología más extendida en la investigación sobre optimización energética de edificios. Pretende analizar el efecto de las variaciones de los parámetros sobre el comportamiento de un sistema. Se trata de un tipo de análisis muy extendido en las diferentes ramas de la ciencia y que ha sido ampliamente utilizado en la evaluación energética de edificios.

Clara Spitz et al. indican que el análisis de sensibilidad se utiliza en muchos campos y cita algunos ejemplos relacionados con campos ecológicos, químicos, materiales semiconductores y económicos (Spitz, et al., 2012).

Andrea Saltelli, coautor del libro *Sensitivity Analysis*, escribe que este análisis es útil para determinar (Saltelli, et al., 2000):

- La influencia de los parámetros de entrada en los resultados.
- Los parámetros que son influyentes en los resultados de la simulación: si la incertidumbre se reduce, se reducirá al mínimo el error de salida.
- Los parámetros que no son influyentes en el resultado. Se puede establecer un valor por defecto para este parámetro.
- La correlación entre los parámetros.

Hopfe and Hensen (2011, citados por Bucking et al., 2014) exponen las ventajas de realizar un análisis de sensibilidad en relación a la incertidumbre:

- Detectar parámetros para reducir la complejidad del modelo
- Análisis de la robustez y validación del modelo
- Las medidas de control de calidad para identificar la sensibilidad de los requisitos
- Análisis que apoye las decisiones tomadas.

Existen distintos métodos de análisis de sensibilidad disponibles (Bucking, et al., 2014):

- **Screening methods**, o métodos de selección, identifican los factores más relevantes entre un gran grupo con un reducido número de evaluaciones del modelo. Es un método cualitativo conocido como método de cribado. En edificios ha sido utilizado por Rahni et al. Es el aplicado en el modelo ETNA, con la herramienta CLIM2000, del equipo de investigación de la compañía eléctrica de Francia (EDF), que con 390 parámetros de entrada seleccionaron 23 con 136 simulaciones.
- **Uncertainty analysis**, análisis de incertidumbre, determina un límite de confianza para el modelo de salida. McDonald et al. presentó un análisis de este tipo incluido en la herramienta británica ESP-r.
- **Calibración**, que compara entre las simulaciones con datos experimentales para determinados valores óptimos.
- **Global sensitivity analysis**, o sensibilidad local y global, que estudia como determina el efecto de los parámetros en los resultados. Es el estudio de como la incertidumbre en los resultados *-output-* de un modelo (numérico o cualquier otro) puede establecerse con un determinado grado de incertidumbre en el modelo de entrada *-input-*. Puede evaluar el efecto de la interacción de los parámetros y requiere una gran cantidad de tiempo en los cálculos. Los métodos más utilizados son el Sobol, FAST, Random Balance Design, y el método Monte Carlo.

Son métodos que buscan estimar el efecto de las variaciones de los parámetros de entrada con respecto a los resultados obtenidos.

El análisis Monte Carlo es una técnica común para realizar análisis sensibilidad energética y acotar la incertidumbre.

La descomposición del modelo en funciones de distribución de probabilidad (*PDF -Probability Distribution Functions*) permite un examen de las variaciones de resultados debido a la variación de los parámetros de entrada.

Un modelo es sensible a un parámetro cuando una pequeña variación en su valor provoca un cambio grande en el resultado.

En simulación de edificios se identifica y clasifica las variables sensibles en un modelo, analizando un resultado, como la demanda y el consumo energético.

Se utilizan análisis de regresión, como los *SRC -Standardized regression coefficients-* para estudiar los resultados y su incertidumbre (Bucking, et al., 2014).

El método Morris (1991, citado por Bucking et al., 2014) determina que las variables pueden ser (i) insignificante, (ii) lineal y aditivo, (iii) no lineal o implicar interacciones con otros factores.

El método Monte Carlo es una buena metodología ya que, tanto el análisis de sensibilidad y los de incertidumbre, pueden hacerse con el mismo número de simulaciones. En la figura 2.2.9. tenemos un diagrama de flujo para el análisis de sensibilidad energética de edificios.

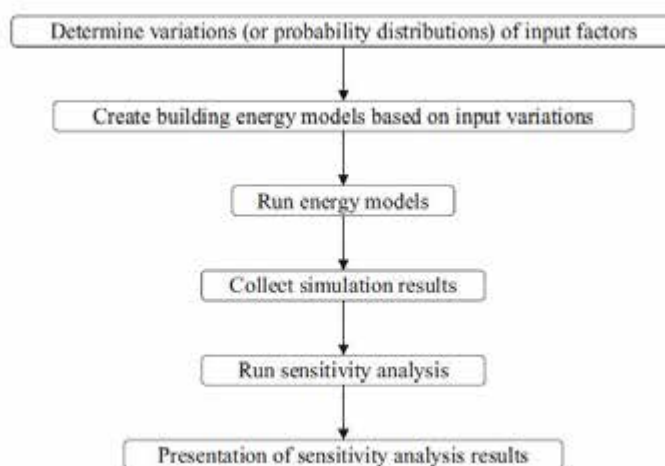


Figura 2.2.9. Típico diagrama de flujo para el análisis de sensibilidad en simulación energética de edificios (Tian, 2013)

Spitz et al. (2012), en su artículo "*Practical Application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house*" aplican el método Monte Carlo utilizando 139 parámetros físicos en el modelo digital del edificio.

Existen gran número de artículos de investigadores internacionales en este campo, dentro de la relación de publicaciones científicas sobre energía y arquitectura. Podemos destacar las investigaciones de los siguientes autores -comentamos los que tienen mayor relación con nuestra investigación:

- Song et al. (2014) indica que hay diversos tipos de análisis de sensibilidad como la regresión, screening method, variance-based (Spitz et al.2012), meta-modelling. Para una descripción detallada de los mismos cita a (Saltelli et al. 2012; Levy and Steinberg, 2010). Para una revisión de la aplicación del análisis de sensibilidad en el análisis energético de edificios cita a (Tian 2013).

- Bucking et al. (2014) plantean una metodología que sirve como referencia para identificar la influencia de las variaciones del diseño de los edificios en la eficiencia energética. Realiza una revisión bibliográfica sobre incertidumbre, sensibilidad y técnicas de optimización en simulación energética citada con anterioridad.

- San Juan et al. (2000) analiza la sensibilidad de variables edilicias y energéticas de tipologías escolares en dos regiones de Argentina. Plantea la iteración de tres subsistemas: (i). *El edilicio*; (ii) *el funcional*; (iii). *El relativo al sitio o medio de localización*. Los subsistemas *edilicio* y *sitio* comprenden las variables independientes que definen las características dimensionales, su organización, la tecnología de sus elementos constructivos y el equipamiento involucrado para mantener las condiciones operativas y su orientación y emplazamiento. El subsistema *sitio* involucra las variables climáticas y de implantación. El subsistema *funcional* define las variables intervinientes, como factor de uso, que puede ser diario, estacional y anual, el factor de ocupación que condiciona las ganancias internas definido por el tipo de actividad.

El Subsistema *edilicio* considera las siguientes variables:

1. Situación original, con temperaturas base de calefacción de 18° y 16° y renovaciones por ventilación de 9 ra/h
2. Variable Temperatura: elevando en 2° cada zona (20 y 18)
3. Variable renovaciones de aire: reduciendo la ventilación a 4 ra/h

4. Variable Superficies de Ventanas: duplicando el área de los huecos exteriores
5. Variable Techo: mejorando el aislamiento térmico
6. Variable Muro: mejorando el aislamiento térmico
7. Variable Ventana: Incorporando doble vidrio, mejorando el aislamiento térmico.
8. Variable Suelo: incorporando aislamiento térmico perimetral
9. Total de mejoras: ra/h + techo + muro + ventanas + suelo

El subsistema del sitio utiliza los datos climáticos de cada zona. El subsistema funcional adopta el funcionamiento habitual de un aula docente, en este caso 130 días hábiles y 10 horas diarias, considerando una ocupación de 30 alumnos por aula.

- Enríquez Miranda (2013) introduce el concepto de parámetro activo de un modelo, en el que se basa el diseño experimental. Un parámetro activo de es aquel que al ser variado produce una perturbación del mismo orden en la respuesta del modelo. El diseño experimental parte de un análisis de sensibilidad que identifica los parámetros activos del modelo. Para realizar este análisis de sensibilidad se desarrollan las herramientas matemáticas (informáticas y numéricas) adecuadas en el entorno de simulación empleado. Dicho de otro modo: utilizamos este tipo de análisis para identificar los parámetros más influyentes del edificio

Enríquez Miranda plantea un modelo de simulación que consta de parámetros que clasifica en cuatro grupos, que define así:

1. Geometría del sistema. Aquí se incluyen las diferentes dimensiones espaciales del recinto seleccionado, la posición y dimensión de los elementos semitransparentes, la geometría de los elementos de sombra y los diferentes espesores de las diferentes capas de los materiales de los que están compuestos los elementos constructivos.
2. Propiedades termofísicas y ópticas de cada uno de los materiales empleados en la construcción. Dentro de esta categoría se incluyen la capacidad calorífica, la densidad y la conductividad térmica de cada uno de los materiales empleados en la definición del modelo de simulación. Asimismo, la absorptividad, emisividad e índice de transparencia medios también forman parte de este grupo.

3. Condiciones de contorno indefinidas. La simulación se realiza con los valores obtenidos de un Año Meteorológico Tipo, que no incluye las características del terreno. Las características necesarias son la reflectancia hemisférica del terreno y la temperatura del mismo en función de la profundidad.

4. Otros aspectos físicos relevantes en la evolución temporal de la temperatura del aire interior. En este grupo se incluyen los coeficientes de convección de cada una de las superficies (tanto interiores como exteriores) en contacto con el aire, la tasa de infiltraciones, o la inercia térmica del interior de la estancia.

En total dispone de 132 parámetros, siendo 76 referentes a propiedades termofísicas (conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica) de los componentes constructivos del C-DdI (considerando la cámara de aire de la fachada como un elemento de capacidad calorífica despreciable), 31 geométricos (diferentes dimensiones de la estancia, longitud del peto de sombra y espesores de las diferentes capas de los materiales que componen en CDdI), 24 referentes a aspectos físicos relevantes para evolución temporal del sistema (coeficientes de convección y de absorción de cada una de las superficies en contacto con el aire interior y exterior, inercia térmica y tasa de infiltraciones) y 1 referido a las condiciones de contorno no disponibles (temperatura del terreno bajo el edificio).

- Es relevante por la metodología empleada, el artículo de Dongjun & Seongju (2014) "*A Heuristic Rule-Based Passive Design Decision Model for Reducing Heating Energy Consumption of Korean Apartment Buildings*". Tiene como objetivo establecer unas reglas heurísticas para el diseño de un edificio optimizado energéticamente. Para ello realiza un estudio de sensibilidad de parámetros de diseño de los edificios.

Realiza un planteamiento que busca resultados o metas globales (*optimal goals*) utilizando un gran número de variables se denomina NP-Hard problem.

Un método heurístico, según los autores, se plantea cuando una búsqueda exhaustiva es impracticable. Puede mejorar el proceso de encontrar una solución satisfactoria mediante atajos mentales que aliviar la carga cognitiva de la toma de decisiones.

Estableciendo reglas heurísticas de sensibilidad energética, los arquitectos diseñarán conociendo las mejores alternativas que reducen el uso de la energía.

Estudia un edificio de apartamentos de 85 m², con agrupaciones de dos apartamentos por planta, con un total de 15 plantas, situado entre medianera. Las viviendas son pasantes con doble ventilación y doble orientación (fig. 2.2.10).

El perfil de uso utilizado es el proporcionado para una familia coreana.

Los datos climáticos son los de Seoul, obtenidos de la base de datos que comercializa ASHRAE, denominada *International Weather for Energy Calculation* (IWEC).

El software de evaluación energética empleado es Designbuilder, que tiene como motor de cálculo *EnergyPlus*.

Un estudio de sensibilidad es utilizado en matemáticas o ingenierías de control. En economía, el concepto de elasticidad se utiliza para estimar la sensibilidad y capacidad de respuesta de un sistema.



Figura 2.2.10. Edificio tipo utilizado en la investigación publicada (Dongjun & Seongju, 2014)

Cita a varios autores, como Lam et al. (1996), que realiza un estudio de sensibilidad de edificios de oficinas en Hong Kong. Tavares et al., que investiga sobre un “*diseño inteligente*” en la búsqueda de un edificio sostenible en una ciudad de Portugal.

Procede de la siguiente manera: en primer lugar, realiza un amplio estudio para seleccionar los parámetros adecuados que tienen un potencial impacto sobre la eficiencia energética de un edificio destinado a vivienda en Corea. En segundo lugar, se realizan pruebas de simulación energética con los parámetros seleccionados para determinar las reglas heurísticas en función con su influencia en

el comportamiento energético. En tercer lugar, se proponen factores de sensibilidad energética para establecer la influencia de cada variable. Se establece un “modelo de decisión” que se verifica con un caso de estudio.

Los parámetros deben ser extraídos de una extensa revisión bibliográfica y de variables clave para decisiones de diseño. El procedimiento empleado en el estudio es el siguiente:

1. Selección de los parámetros de diseño de entrada que deben ser identificados y analizados.
2. Construir un caso base como modelo de referencia.
3. Identificar los parámetros de interés e investigar a los valores del caso base.
4. Determinar qué outputs de simulación están siendo investigados.
5. Realizar variaciones de los parámetros seleccionados.
5. Estudiar la relación de influencia de los parámetros de entrada en las diferentes salidas de simulación.
6. Determinar los coeficientes de sensibilidad para cada parámetro.
7. Llevar a cabo un proceso de validación en relación con los resultados de simulación realizadas.
8. Realizar un estudio de caso.
9. Construir reglas heurísticas de eficiencia energética.

La figura 2.2.11. establece la metodología de investigación.

El estudio únicamente aborda la influencia de los elementos pasivos de la arquitectura residencial a través del cálculo de la demanda energética anual. Se agrupa la demanda total anual para simplificar los resultados dado que, según comentan, un intervalo de series temporales menor (como puede ser mensual, diario o incluso horario) complica el análisis de resultados.

El estudio no evalúa consumos energéticos: las instalaciones de confort, como calderas, enfriadoras o elementos de iluminación artificial, no influyen en la demanda sino que, en función de su rendimiento, afectan al consumo de energía.

Los parámetros –variables-, están seleccionados de una extensa revisión bibliográfica de edificios de vivienda colectiva en Corea.

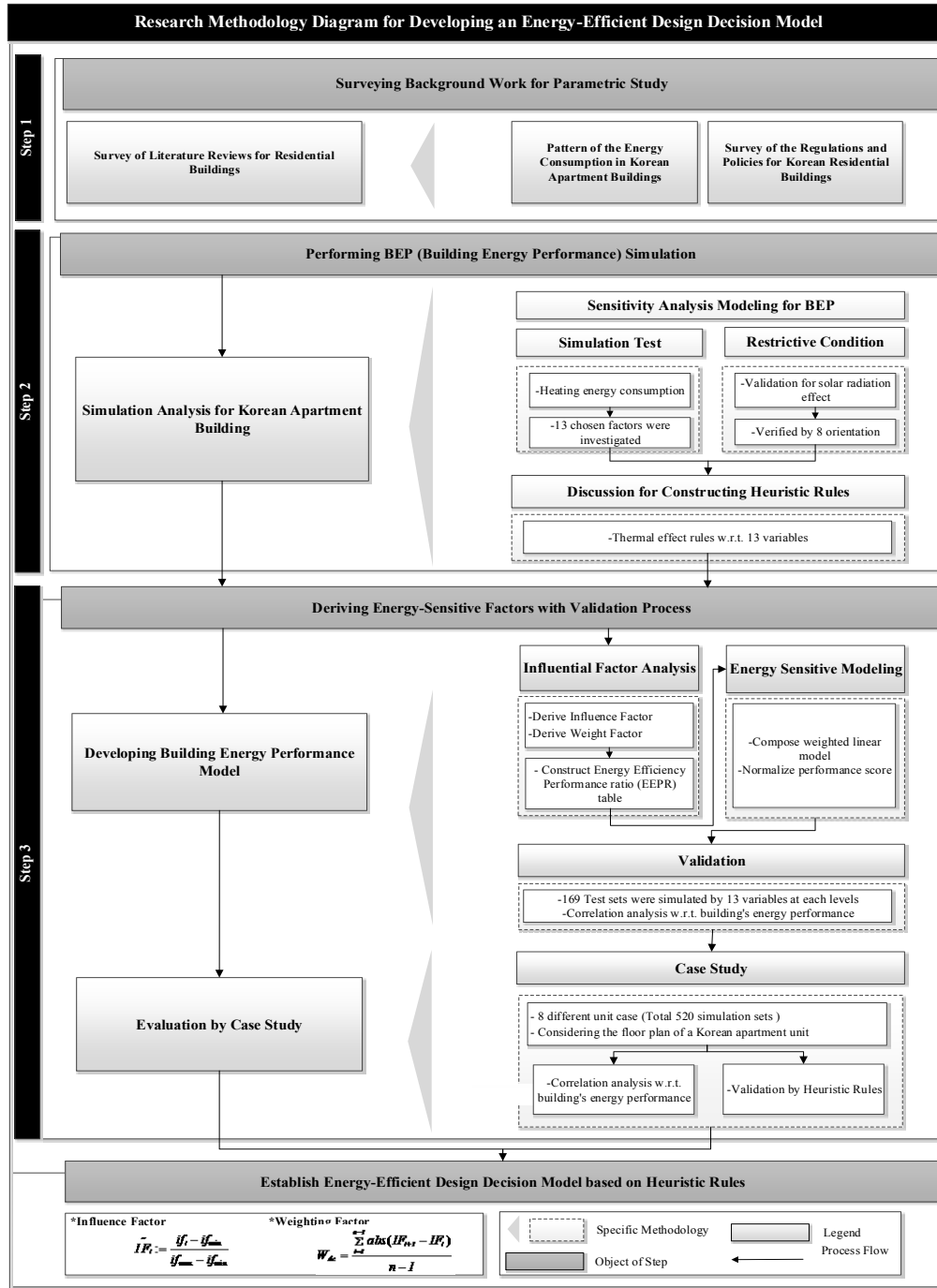


Figura 2.2.11. Diagrama de la metodología de investigación para el diseño eficiente de edificios (Dongjun & Seongju, 2014)

La investigación se centra en las características de los elementos constructivos utilizados y en el diseño del edificio: el diseño de estructura y envolvente, considerando la transferencia de calor por conducción (espesores de aislamiento y situación en el muro, construcción de ventanas o balcones, porcentaje de huecos), convección (tasa de renovación de aire y ventilación) y la radiación (orientación, soleamiento, proporción de la planta, porcentaje de superficies acristaladas y su composición y ubicación, protecciones solares ...etc. (fig. 2.2.12).

Los sistemas constructivos planteados también son los más comunes en el país para edificios de viviendas, según la siguiente tabla.

El estudio realiza trece test donde varía un parámetro del edificio cada vez. La lista es la siguiente:

1. Orientación
2. Tasa de ventilación
3. Situación del aislamiento térmico
4. Espesor del muro: masa
5. Espesor del aislamiento: valor de U
6. Porcentaje de huecos
7. Tipo de vidrio
8. Superficie de la vivienda
9. Proporción de la planta (horizontal/vertical)
10. Tipo de balcón
11. Profundidad del balcón
12. Situación de la vivienda en el bloque
13. Situación de las particiones interiores respecto a los huecos

Table 2. Standard condition for the simulation test.

Component	Material	U-value
External Wall	Concrete, Reinforced (with 2% steel) 180 mm	0.263 W/m ² ·K
	XPS Extruded Polystyrene-CO ₂ Blowing 120 mm Gypsum Plastering 9.5 mm	
Internal Wall	Gypsum Plastering 9.50 mm	2.525 W/m ² ·K
	Concrete, Reinforced (with 2% steel) 150 mm Gypsum Plastering 9.50 mm	
Flat Floor	Cement/plaster/mortar—render, synthetic resin, exterior insulation 400 mm	0.659 W/m ² ·K
	XPS Extruded Polystyrene—CO ₂ Blowing 300 mm	
	Concrete, Reinforced (with 2% steel) 200 mm	
	Air gap 25 mm (downwards) 25 mm Gypsum Plasterboard 9.5 mm	
Ground Floor	Cement/plaster/mortar—render, synthetic resin, exterior insulation 40 mm	0.319 W/m ² ·K
	XPS Extruded Polystyrene—CO ₂ Blowing 85 mm	
	Concrete, Reinforced (with 2% steel) 200 mm	
	Air gap 25 mm (downwards) 25 mm Gypsum Plasterboard 9.5 mm Cast Concrete 50 mm	
Roof	XPS Extruded Polystyrene—CO ₂ Blowing 180 mm	0.173 W/m ² ·K
	Concrete, Reinforced (with 2% steel) 180 mm	
	Air gap 25 mm (downwards) 25 mm	
	Gypsum Plasterboard 95 mm	
HVAC	Under Floor Heating System	Heating Set point: 21.0 °C
	Air Conditioner Cooling	Cooling Set point: 26.0 °C
Window Type	Glazing Type	Glazing Double Clear 3 mm/13 mm
		Air, U-Value: 2.761 W/m ² ·K; SHGC: 0.764
	Window to Wall Ratio	Southern balcony: 70% Northern balcony: 40%
Air Exchange Rate	0.7 ac/h (on the basis of living room)	
Lighting	Lighting Power Density: 5.0 W/m ² (Fluorescent)	
Occupancy	0.05 people/m ² (on the basis of living room)	
Base model location	Bottom-outside (1st floor/15 stories, 60 Households)	

Figura 2.2.12. Condiciones estandar para los test realizados en la investigación (Dongjun & Seongju, 2014)

2.2.5. Estrategias arquitectónicas de diseño bioclimático

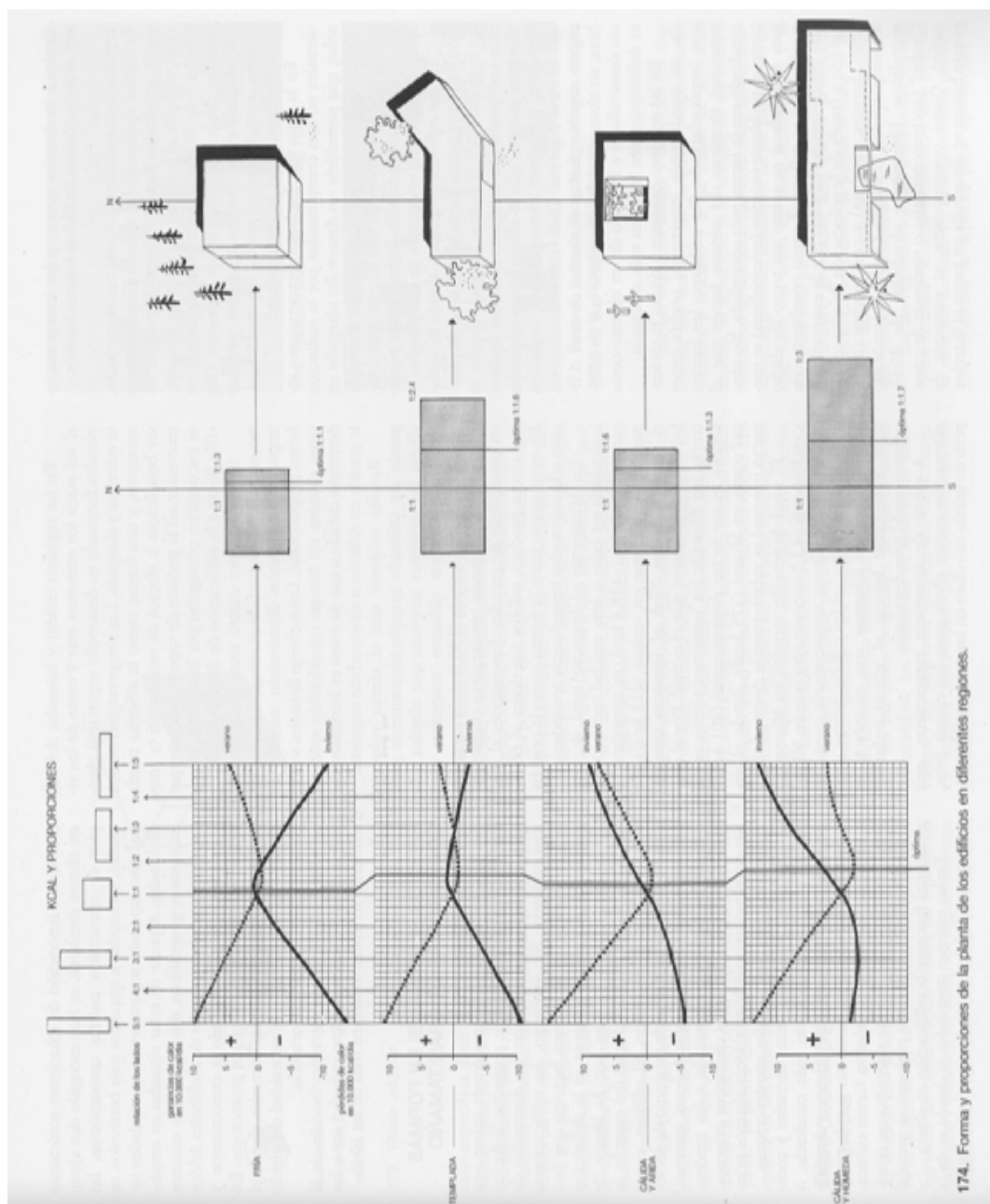


Figura 2.2.13. Forma y proporciones de la planta de los edificios en diferentes regiones. Extraído del "Arquitectura y clima", versión en castellano del "Design with climate" de Victor Olgyay (Olgyay, 2002)

“La arquitectura bioclimática representa el empleo y uso de materiales y sustancias con criterios de sostenibilidad, es decir, sin poner en riesgo su uso por generaciones futuras, representa el concepto de gestión energéticamente óptima de los edificios de alta tecnología mediante captación, acumulación y distribución de energías renovables pasiva o activamente, y la integración paisajística y empleo de materiales autóctonos y sanos, de los criterios ecológicos y de ecoconstrucción.

Neila González, 2004

En este apartado vamos a exponer los criterios relacionados con la optimización energética de los edificios a través de dos autores de distinta época pero pioneros en abordar estas cuestiones: los arquitectos Victor Olgyay y Francisco Javier Neila González.

Victor Olgyay fue pionero en la investigación sobre la arquitectura y el clima. Su obra cumbre, *Design with climate*, publicada en 1963, expone el resultado de las investigaciones realizadas durante ocho años sobre el efecto del entorno en el diseño arquitectónico: aporta una serie de criterios para diseñar edificios en función del clima. Aplica estos criterios a cuatro ejemplos situados en otras tantas regiones: una región fría, una templada, una cálida árida y otra cálida húmeda (fig. 2.2.13).

En el prólogo indica que *“este libro quiere demostrar la influencia del clima en los criterios constructivos. Hasta el momento, la arquitectura se ha guiado por un subjetivo proceso de ensayo y error; evidenciándose la necesidad de adoptar técnicas de análisis razonado para madurar adecuadamente en este sentido”*(Olgyay, 2002).

Olgyay detalla, como conclusión a la investigación, los parámetros más importantes a considerar en el diseño de edificios en función del clima. Para cada ejemplo plantea tres grupos de acciones: la ordenación del conjunto -que correspondería al ámbito territorial y urbano-, el diseño de la casa y los elementos constructivos -ámbito del edificio-.

Para la zona fría, representada por la ciudad de Minneapolis, concluye que, respecto al conjunto, se buscará la mejor orientación posible para maximizar el soleamiento, la ordenación protegerá a los edificios de los vientos y la vegetación se estudiará para que permitan el paso del sol, con hoja caduca, y no aumenten la humedad del ambiente. La orientación solar óptima la sitúa en 12º este respecto al sur (una orientación mediodía, ligeramente girada a levante).

El diseño de la casa buscará tipologías compactas, para minimizar las pérdidas de calor. La superficie de envolvente exterior respecto al volumen encerrado deberá ser mínima, con proporciones de 1 : 1,1 o 1 : 1,3.

El color de las superficies asoleadas debe tener tonalidades medias pudiendo ser oscuras si se pueden proteger en verano.

Respecto a los elementos constructivos, se buscará aumentar el tamaño de los huecos bien orientados (al sur y este principalmente) para captar energía. El resto deberán ser de reducido tamaño. El doble vidrio es esencial, compensando el exceso de soleamiento en verano con protecciones solares.

Los muros deberán ser de alta capacidad de aislamiento térmico. La masa constructiva interior es beneficiosa, dado que aporta capacidad de acumulación que equilibra las oscilaciones extremas. Olgyay indica que el material del muro oeste es el que equilibrará la distribución calorífica interna.

También plantea que la sombra durante el verano es muy importante, pero en invierno no debe interceptar el impacto del sol: por la importancia de la captación solar en temporadas frías, se deberán proyectar elementos móviles que solo protejan del sol en verano.

En una zona templada, representada por la ciudad de Nueva York -con la similar latitud que Valencia pero un clima más extremo, con temperaturas que pueden ir de -25°C en invierno a -39°C en verano-, apuesta por una tipología de vivienda más flexible que en el clima frío. Es fundamental el aprovechamiento de la radiación en invierno, y la correcta disposición frente a los vientos (que pueden ser o no favorables).

Los edificios deberán tener aberturas hacia el sur, sureste y protegerse del oeste. La proporción óptima de su forma es 1 : 1.6 y con un desarrollo mayor en el eje este-oeste.

La orientación óptima es de 17,5° al este del sur. La ventilación cruzada interior es muy importante y se buscarán crujías no muy grandes para que el sol penetre en todo el espacio.

Los colores exteriores medios son los más adecuados: oscuros solo cuando estén protegidos del sol, con la cubierta de color claro.

Respecto a los elementos constructivos, el autor plantea una distribución correcta de los huecos para un equilibrio calorífico interno. Las superficies acristaladas a sur funcionan bien desde un punto de vista estacional si se protegen en verano. A poniente es conveniente reducir el tamaño de los huecos y apunta que, respecto a las pérdidas energéticas en invierno, éstos son el punto débil del edificio. Plantea una ventilación en las zonas altas de la cubierta en verano, pero que pueda cerrarse en invierno.

Respecto al aislamiento, plantea una mejora en cubierta y fachada norte, con una relación respecto a la fachada sur de un 50% superior en la primera y un 40% en la segunda. También habla de la importancia de la inercia térmica del muro oeste y de la protección estacional de las superficies más soleadas en verano.

En climas cálidos y secos, con la ciudad de Phoenix, destaca la importancia de la sombra en las zonas exteriores de la vivienda, creando patios y estructuras urbanas densas y sombreadas, con zonas de agua, vegetación y superficies sin pavimentar.

La vivienda propuesta es la casa-patio (llega incluso a citar la casa enterrada), agrupadas en hileras compactas según el eje E-O y edificios de construcción maciza. Su gran objetivo es perder el calor en lugar de ganarlo, por lo que un edificio cerrado al exterior y abierto a un microclima interior que favorece el efecto de enfriamiento evaporativo y pérdida por radiación nocturna.

Las formas compactas con desarrollo en el eje E-O son más convenientes, con proporción 1 : 1,3, donde el *efecto volumen*¹² es muy influyente. Se minimizará su asoleo, con una orientación óptima es 25º al este del mediodía y ventilación cruzada.

Construiremos con materiales pesados y colores claros en las superficies expuestas al sol. Los huecos bien protegidos de la radiación directa en la parte alta para evitar radiación reflejada del suelo y muy herméticos para protegernos del calor diurno. Estarán preferentemente en las orientaciones sur y norte, con menor proporción en el resto. Las protecciones solares estarán separadas de las fachadas para favorecer la convección.

12 Un cubo de lado 1 m. contiene un volumen de 1 m³ con superficie de 6 m² (relación 1:6) mientras que uno de lado 4 contiene un volumen de 64 m³ y una superficie de 96 m² (relación 1:1.5). Así describe Olgyay el *efecto volumen* que relaciona el tamaño del edificio con la compactidad: En zonas frías es beneficioso construir grandes edificios, que son muy compactos, pero no tanto en zonas cálidas.

Los muros serán de materiales que acumulen el calor para la actividad diurna y al contrario en la nocturna. Sombreadremos los orientados a este y oeste. Las cubiertas sombreadas y bien ventiladas, pudiendo tener aspersores de agua o incluso ser inundables con colores claros y capacidad de emisión para radiación infrarroja -de onda larga.

Por último, en climas cálidos y húmedos, como Miami, debe potenciarse la relación del edificio con el viento, buscando zonas norte y sur que reciben menos radiación que el resto. Los edificios deben separarse para favorecer este efecto y las zonas exteriores sombreadas son muy importantes. El arbolado será de ramas altas para no interferir en las brisas. La orientación equilibrada es sur, ligeramente girada 5 grados a este (fig. 2.2.14).

La tipología de vivienda aislada es la más adecuada, situada en un emplazamiento elevado. También son buenos los edificios altos de formas libres y alargadas. Olgyay propone una planta con gran libertad si se protege del sol. Evitaremos las zonas pavimentadas y buena ventilación. La forma será alargada en el eje E-O con proporción 1 : 1,7 y el efecto volumen no es conveniente. Los colores en tonos pastel son los apropiados ya que evitan resplandores.

Respecto a la construcción, ya no es tan importante la diferencia de proporción de huecos por orientaciones. Los muros tienen menor importancia y únicamente actúan como pantalla protectora más que como barrera térmica. Las cubiertas son los puntos con mayor impacto térmico: una cubierta doble, ventilada y protegida del sol con una superficie reflectante. Las protecciones solares son muy importantes, donde incluso la pared norte recibe radiación en verano.

Las investigaciones del Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid, el arquitecto Francisco Javier Neila González, abordan la arquitectura desde el punto de vista energético. Sus publicaciones son bibliografía básica en todas las escuelas de arquitectura de España.

En su obra publicada, el profesor Neila expone lo que denomina *estrategias arquitectónicas de diseño bioclimático*, que analizan el comportamiento energético de los edificios partiendo de un profundo estudio de la arquitectura popular que mejor se ha adaptado al clima: Neila denomina "*arquitectura popular evolucionada*" a la arquitectura *bioclimática*. Aporta criterios que permiten al arquitecto tomar decisiones para proyectar edificios con un comportamiento energético óptimo.

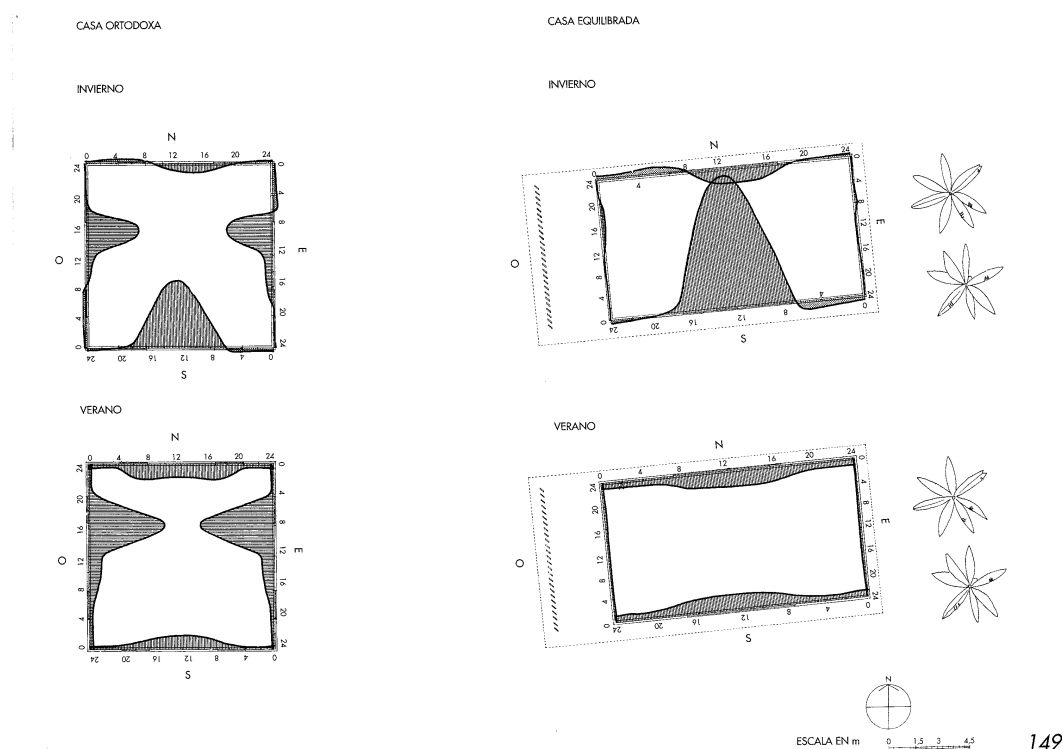


Figura 2.2.14. Casa equilibrada y casa ortodoxa en el clima cálido y húmedo de Miami (Olgay, 2002)

Las estrategias están planteadas en función de la estación del año en la que va a ser utilizado el edificio -verano o invierno-, teniendo en cuenta que son distintas las condiciones y, por tanto, también lo serán las soluciones arquitectónicas. Es necesario el conocimiento del clima y el periodo del año en el que va a ser utilizado el edificio.

La arquitectura planteada para condiciones de invierno, según nos expone Neila, debe minimizar las pérdidas energéticas y maximizar la captación de energía. En condiciones de verano deberemos, sin embargo, luchar contra el sobrecalentamiento, reduciendo las ganancias energéticas en el edificio. Son dos situaciones distintas en las que influyen de distinto modo los parámetros.

Dado que en invierno la temperatura exterior es baja, el flujo energético por transmisión a través de la envolvente se debe minimizar con un alto grado de aislamiento térmico. La conservación de la energía disponible dentro del edificio es clave en condiciones de invierno y más, si cabe, en los edificios proyectados con planteamientos bioclimáticos (Neila González & Acha Román, 2009).

El edificio buscará maximizar la energía captada de modo pasivo. La principal fuente de energía térmica exterior es el Sol, aunque también podrán ser otras energías disponibles, como la geotérmica.

El aprovechamiento de la energía que capta el edificio debe complementarse con un sistema de acumulación y distribuirse desde las zonas donde se capta hacia el resto del edificio. (Neila González, 2004).

En condiciones de verano el diseño arquitectónico se complica. El autor señala que no hay fuentes naturales de refrigeración como alternativa al Sol. Como estrategia general podemos seguir la misma que en invierno, es decir, captar la energía con el signo adecuado, su acumulación, conservación y correcta distribución. En este periodo buscaremos eliminar el exceso de calor interior o sobrecalentamiento y apoyarnos en la ventilación, con edificios muy abiertos, cuando ésta nos ayude.

Contra el sobrecalentamiento, Neila propone dos tipos de medidas: preventivas y de eliminación.

Las preventivas, que prevalecerán sobre las de eliminación, buscan reducir la elevación de la temperatura interior. Los huecos estarán protegidos de la radiación solar y buscarán una adecuada orientación. La selección del vidrio adecuado es fundamental, optando por factores solares bajos que reduzca la radiación solar que aumenta la carga interna.

La cubierta es el elemento que más cantidad de radiación solar recibe. Un color claro incluso reflectante ayuda a reducir el calor captado por este hecho. Ventilación de las cubiertas y acabados vegetales disminuyen las aportaciones energéticas.

Respecto a las fachadas, el catedrático apunta que se debe controlar color, sombreado y ventilación.

El acabado muy claro en fachada absorbe muy poca radiación solar y ha sido muy utilizado en la arquitectura popular en climas cálidos.

La fachada ventilada es eficaz en el periodo estival. La hoja exterior absorbe el calor que es eliminado por la ventilación.

Como medida de eliminación disponemos de la ventilación. Un edificio abierto podrá buscar la mejor ventilación posible, con una configuración poco compacta.

La combinación del efecto de la humedad como refrigeración adiabática junto con la búsqueda de una buena ventilación producirá edificios con una mayor relación con el exterior, con los patios, la vegetación exterior, la relación con el terreno o la ventilación nocturna (Neila González, 2001).

En su tesis doctoral (fig. 2.2.15), al hablar de orientación de los huecos durante todo el año, el profesor concluye que la óptima es la que tiene máximo porcentaje a sur, parte de norte y nada al este y oeste, para fomentar la máxima captación en invierno y mínima en invierno. Si no es posible buscaremos la Sureste y Suroeste en zonas frías y la Noreste o Noroeste en zonas cálidas. La orientación de los elementos opacos a efectos de ganancias solares tienen poca importancia y no debe condicionar el diseño arquitectónico (Neila González, 1984).

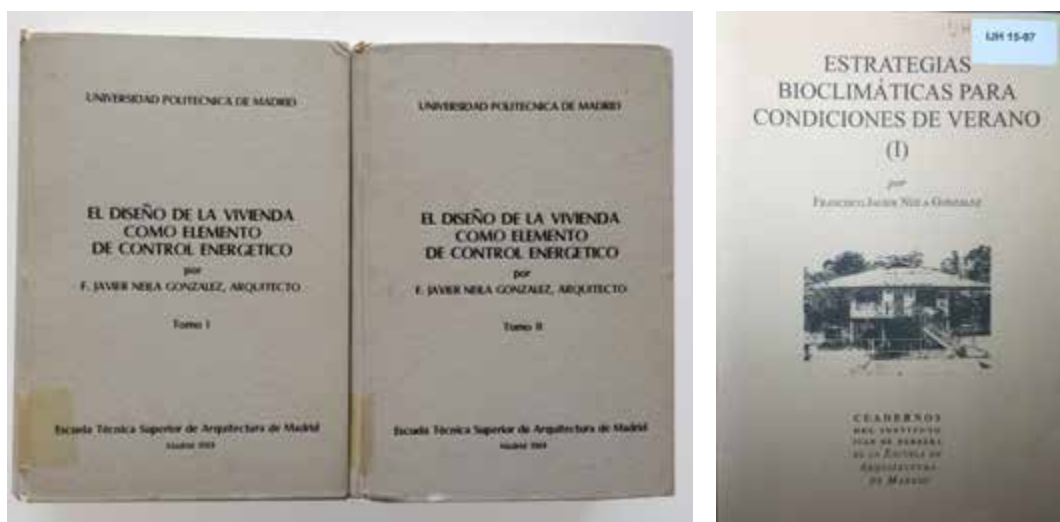


Figura 2.2.15. Izda. Tesis doctoral *El diseño de la vivienda como elemento de control energético*, del profesor Neila González (1984), consultada en la biblioteca de la ETSAM. Dcha. Portada del cuadernillo *“estrategias bioclimáticas para condiciones de verano (I)”*, publicado por el Instituto Juan de Herrera de la ETSAM. (Neila González, 2000)



Figura 2.3.1. *Room by the Sea* (1951). Edward Hopper

2.3. HABITACIÓN, HABITAR, HABITABILIDAD

“La arquitectura del exterior parece que ha interesado a los arquitectos de vanguardia a expensas de la arquitectura del interior. Como si una casa tuviera que concebirse para el placer del ojo más que para el bienestar de los habitantes.”

Eileen Grey, 1929¹

Los requisitos de habitabilidad de un espacio arquitectónico evolucionan. Habitar implica construir y cuidar. A principios del siglo XX, la arquitectura afronta el reto planteado por el movimiento higienista de mejorar la calidad de vida de las personas. La sociedad pide a su arquitectura que aire, sol y luz irrumpen decididamente en el espacio para proporcionar al habitante una sensación de bienestar. La combinación de las partes llevará al habitar.

En este apartado repasamos desde el origen, las condiciones necesarias para que una construcción sea habitada y reflexionamos sobre el camino que podemos recorrer. La habitabilidad implica considerar aspectos dimensionales, ambientales, y energéticos, que cobran cada vez más relevancia en la arquitectura actual. La sostenibilidad también es un aspecto básico en la habitabilidad.

2.3.3. Habitación

“...que estudien mucho antes de fingir que hacen arquitectura porque han olvidado lo más importante: que el arquitecto no es un prestidigitador o un dibujante de sueños sino aquél que posee unos conocimientos técnicos que el hombre necesita para resolver sus problemas de habitación”

Francisco Javier Sáenz de Oíza, 1993²

Louis Kahn escribe en 1971 que la *habitación* es el comienzo de la arquitectura; *“es el lugar de la mente. Cuando estamos en una habitación, en una sala con sus dimensiones, su estructura y su luz, reaccionamos a su carácter, a su aura espiritual, reconociendo que cualquier cosa que el hombre se propone y crea se transforma en vida.”* (Kahn, 2003)

1 Citada por (Paricio, 2014), *L'architecture Vivante*. Número de otoño-invierno, 1929. Conversación entre Eileen Grey y Jean Badovici

2 Citado por José Manuel Pozo, (Martín Gómez et al., 2010)

La casa primigenia

Vitruvio, en *De architectura libri decem*, tratado escrito en el siglo I a. C. y referente de todos los tratados posteriores de arquitectura, escribe (Vitruvio, 1995):

“Cualquier cosa que se construya ha de ser atendiendo a la solidez, firmitas, adecuación a la función que desempeña, utilitas, y a la belleza, venustas.

[...] Se atiende a la adecuación del edificio cuando la distribución es impecable y facilita en todo el uso para el fin a que se dedica [...] (libro I, cap. III).

Será adecuación natural tener luz naciente en los dormitorios y en las bibliotecas, la luz poniente en las ventanas de los baños y en las habitaciones de invierno y luz del norte en las galerías de pintura [...] (libro I cap. II).

[...] ha de seleccionarse un lugar lo más saludable posible para el teatro.

Porque cuando se dan espectáculos, los espectadores, con sus esposas e hijos, se sientan todos juntos encantados, y sus cuerpos inmóviles en su diversión, tienen los poros abiertos dentro de los cuales penetran los vientos. Si estos vientos vienen de pantanos o ciénagas o de otros lugares insalubres, introducirán exhalaciones nocivas para la salud. Por consiguiente, se tratará de evitar estos males seleccionando cuidadosamente el terreno del teatro [...] (libro V, cap. III).

[...] debemos considerar con el mayor cuidado la acústica del teatro para comprobar que se ha seleccionado un sitio donde la voz tenga una caída agradable y no sea devuelta con sentido indistinto al oído (libro V, cap. VIII).

Deben construirse columnatas detrás de la escena a fin de que, si la lluvia intempestiva interrumpe la representación, la gente tenga donde guarecerse y también para que haya espacio para la preparación de todo el equipo del escenario (libro V, cap. IX).

Por tanto [...], deben las ciudades ser dotadas de paseos espaciosos y adornados al aire libre y bajo cielo abierto.

El espacio central entre las columnatas y abierto al cielo ha de embellecerse con jardines, porque pasear al aire libre es muy saludable, especialmente para los ojos, ya que el aire refinado y purificado que viene de plantas verdes encontrando entrada en el cuerpo abierto por el ejercicio físico da una imagen clara de las cosas, deja la vista clara y la imagen precisa (libro V, cap. IX).

“Ahora, pues, si es un hecho que los países difieren unos de otros y son diversos en clima, de forma que hasta los hombres nacidos en ellos se diferencian naturalmente en su conformación física y mental, no podemos vacilar en hacer nuestras casas adecuadas a las peculiaridades de las naciones y razas, porque la misma naturaleza nos lo indica”

(libro VI, cap. I) (López Asiaín, J, 2010)

El higienismo y la arquitectura de principios del siglo XX

En el siglo XX se inicia una preocupación por las condiciones higiénicas de los edificios. Las condiciones de vida a finales del siglo XIX son muy duras. La gente muere en los edificios, en el trabajo o en sus viviendas por problemas higiénicos que no trata la medicina. La salud es el gran problema de la sociedad de esa época (fig. 2.3.2).

La arquitectura de principios del siglo XX no solo busca una solución estructural, el espacio y la luz, sino que se enfrenta a nuevos retos, como el que plantean los movimientos higienistas para mejorar la vida de las personas con las herramientas que maneja la arquitectura.

En España, los jóvenes arquitectos del GATEPAC, interesados por las nuevas tendencias extranjeras, abordan decididamente temas como el bienestar, la higiene en la vivienda o la democratización de la arquitectura, mientras buscan un nuevo lenguaje arquitectónico. Publican regularmente la revista *A.C. Documentos de actividad contemporánea* desde 1931 hasta 1937, con las interrupciones impuestas por la Guerra Civil, un total de 25 números que sirvieron de promoción y divulgación de las nuevas tendencias arquitectónicas (AA.VV., 2005).

Esta preocupación les hace tratar extensamente los múltiples aspectos relacionados con la habitabilidad en los edificios. Dedicán, por ejemplo, un número completo al cuarto de baño, artículos sobre la correcta iluminación de los espacios o a la crítica feroz de las infraviviendas. En una instancia que presentan al ayuntamiento de Barcelona, con alegaciones a un nuevo plan urbanístico que se pretende desarrollar, escriben (fig. 2.3.3):

“SANEAMIENTO. - Al hacer una reforma del casco antiguo de nuestra ciudad, creemos que lo primero que se ha de tener en cuenta, es el lamentable estado de la habitación de esta zona, la necesidad urgente de sanearla derribando las habitaciones infectadas de acuerdo con un plan por etapas, basado en el porcentaje de mortalidad (...).”

“Este plan de saneamiento tendrá que corregir, de la forma más eficaz y rápida posible, los defectos más grandes de estas habitaciones que son:

Exceso de densidad

Falta de espacios libres

Pésimas condiciones de asoleamiento y ventilación, consecuencia de la excesiva altura de las fachadas con relación a la anchura de las calles y de los denominados “patios de ventilación”, verdaderos pozos de basuras, etc.

Defectos, todos ellos que llevan como consecuencia el contagio de toda clase de enfermedades y anormalidades producto del ambiente y condiciones de vida...

De nada sirve ensanchar las vías existentes, las cuales solamente mejoran las viviendas que dan a la vía reformada, quedando en la misma deplorable situación actual los interiores de las manzanas y las calles de alrededor no afectadas por la reforma.”

Su preocupación por el bienestar en los años 30 del siglo XX queda plasmada también en otros de sus escritos:

Ensayo para una manzana del ensanche de Barcelona (A.C. nº 11, 1933):

“Un barrio de bloques de viviendas racionalmente ordenadas puede dar densidades tan altas como las que hoy día establecen las estadísticas para los distritos de “taudis” (viviendas del casco antiguo de la ciudad en malas condiciones de higiene y salubridad), permitiendo además proporcionar a sus habitantes, los servicios indispensables al espíritu y el cuerpo, rodeándolos de condiciones higiénicas. Un bloque de edificación en altura, no tiene como función única el servir de vivienda, sino que puede cumplir una misión cultural y moral. En un conjunto de estos bloques, es posible económicamente establecer muchas instituciones para el uso de la colectividad. La densidad de habitantes por hectárea que se puede conseguir permite la construcción de guarderías infantiles, escuelas, centros culturales, cooperativas, clubs de obreros, campos de deportes, restaurants económicos y bibliotecas, y hasta se puede pensar en municipalizar algunos servicios; por ejemplo, la calefacción. De modo que la edificación de bloques de viviendas colectivas, además de ser una solución del problema de la habitación obrera, es una solución ética e higiénica del problema de la educación social y del hogar. Esta es la orientación que hemos pensado para nuestro proyecto de distribución de bloques de habitación, dentro del trazado urbanístico del ensanche de Barcelona.”

4º manifiesto racionalista. Casas funcionales para obreros. (Gaceta de arte nº 9, 1932):

“En estos sórdidos espacios, en estas barriadas de niños sucios aparecen los gérmenes del rencor, del odio, de la violencia, especialmente contra las clases que no resuelven los problemas del proletariado y han venido desatendiendo el perfil moral de una clase separada de ella por pocos metros y por el semblante miserable de toda su vida. Existen respetables problemas de esteticismo que contribuyen de manera esencial a fijar la bondad de una ciudad, pero existen también, junto a estos problemas estéticos, muchos otros de humanidad, de decoro, de higiene, de dignidad social.”

2.3.4. Habitar

¿Qué habitamos?

Martin Heidegger (2015) escribe sobre la esencia de habitar en su texto *“construir, habitar, pensar”*, de 1951. No habitamos todas las construcciones –no todas las construcciones son nuestra morada: en un puente, un muro de contención o una estación energética no acontece el habitar-.

Habitar es cuidar –*“los mortales habitan en la medida en que salvan la tierra”* (Heidegger, 2015).

Nos interesa destacar este aspecto en el pensamiento de Heidegger cuando hablamos de habitabilidad, ya que nos habla de la relación hacia el medio, hacia la naturaleza y es en sí mismo una lucha contra la entropía, contra la flecha del tiempo.

Habitar no es adueñarse del planeta ni explotarlo sin límite. Es la protección del medio ambiente y de la memoria que contienen el patrimonio construido: *“Cuidar (velar por) quiere decir: custodiar la Cuaternidad en su esencia. Lo que se toma en custodia tiene que ser albergado. Pero, si el habitar cuida la Cuaternidad³ ¿dónde guarda (custodia) el habitar su propia esencia? ¿Cómo llevan a cabo los mortales el habitar en la forma de este cuidar? Los mortales no serían nunca capaces de esto si el habitar fuera únicamente un residir en la tierra, bajo el cielo, ante los divinos, con los mortales. El habitar es más bien siempre un residir junto a las cosas. El habitar como cuidar guarda (custodia) la Cuaternidad en aquello junto a lo cual los mortales residen: en las cosas.”*

3 Heidegger se refiere a cuaternidad como la unidad de la tierra y el cielo, los divinos y los mortales

Joaquín Arnau⁴ escribe: *“La primera consecuencia del propósito de habitar no es la habitación, sino el hábito. El habitar crea hábitos y los hábitos constituyen un principio de habitación: habitar es habituarse. Hábito y habitación juegan así un juego dialéctico.”*

Gaston Bachelard en *Poética del espacio* (Bachelard, 2000):

“...Vimos en ellas un ritmoanálisis de la función de habitar. Para dormir bien no hace falta dormir en una gran estancia. Para trabajar bien, no hace falta trabajar en un reducto. Para soñar el poema y para escribirlo se necesitan ambas moradas. Pues el ritmoanálisis es útil para los psiquismos actuantes. Así, la casa soñada debe tenerlo todo. Debe ser, por muy vasto que sea su espacio, una cabaña, un cuerpo de paloma, un nido, una crisálida. La intimidad necesita el corazón de un nido. Erasmo, nos dice su biógrafo, tardó mucho en encontrar, en su hermosa casa, un nido donde poder abrigar su cuerpecillo. Acabó por encerrarse en un cuarto a fin de respirar ese aire revenido que le era necesario”

Sol y aire

Francisco Javier Sáenz de Oíza empezó en 1949 como profesor en el departamento de instalaciones en la Escuela de Arquitectura de Madrid. En los años 50 del pasado siglo no había mucho escrito sobre la salubridad e higiene en los edificios en España, aunque distintos autores extranjeros publicaron textos de gran relevancia, como los hermanos Olgyay, con el ya comentado *Design with climate*, o Banham, *The architecture of the well tempered environment*.

Oíza tituló sus notas de clase como *“Apuntes de salubridad e higiene”*. Para él, hablar de instalaciones de un edificio no se limitaba a describir, calcular y dimensionar un sistema de desagües o fontanería, de calefacción o soleamiento, sino que todo era arquitectura y en estos apuntes se estudian materias básicas relacionadas con la habitabilidad en un edificio, como el análisis del soleamiento, caudal de ventilación en función del uso de los locales o las zonas de bienestar fisiológico del hombre.

Los apuntes se estructuran en cuatro bloques: cartas solares, calor solar, iluminación natural y el aire. El espacio habitado tiene una estrecha relación con el sol, como fuente de calor y luz, y con el aire, como ventilación, salubridad y confort (fig. 2.3.4) (Martín Gómez et al. , 2010).

⁴ Arnau, Joaquín, 72 voces para un Diccionario de Arquitectura Teórica, citado por Sarquis, Jorge, en *Arquitectura y Modos de habitar*, p. 16

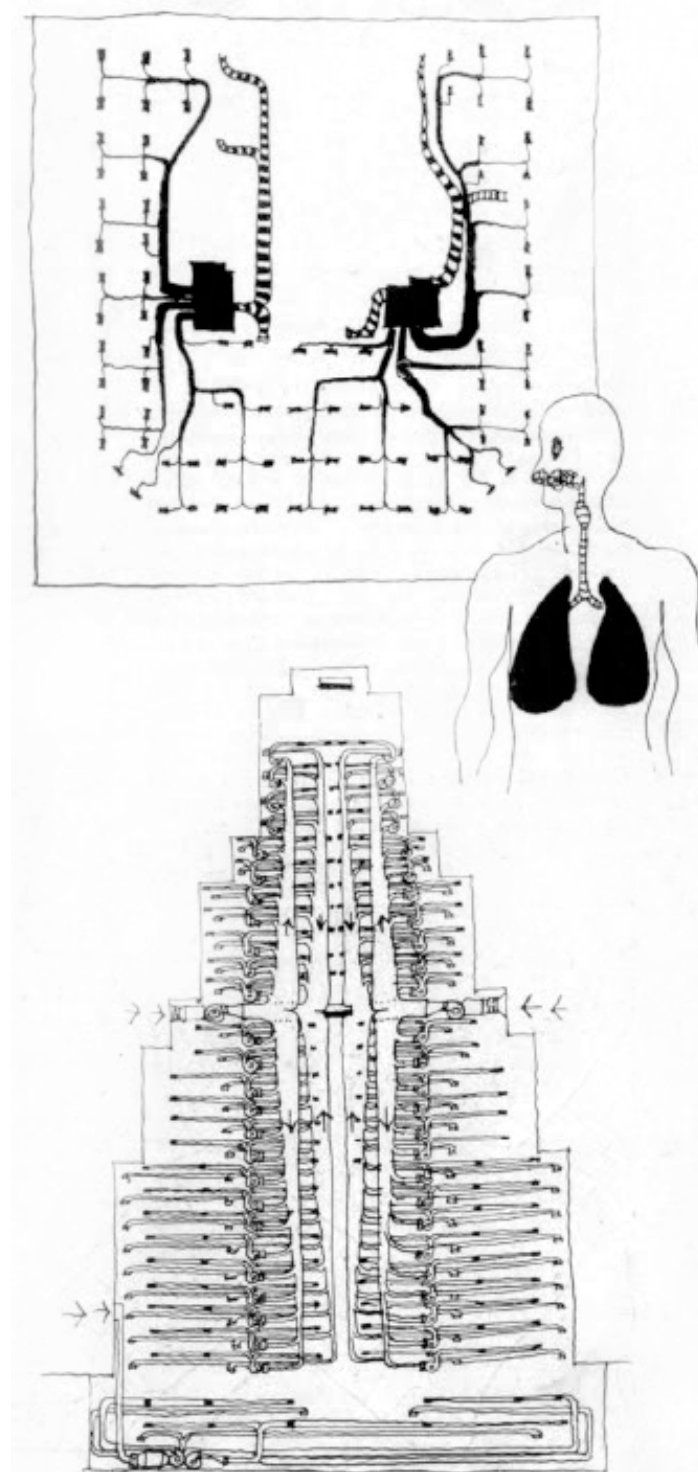


Figura 2.3.4. Esquemas de F. J. Sáenz de Oíza en los que plantea el paralelismo entre el sistema nervioso del hombre y un sistema de control de climatización. Reproducido en un artículo de Cesar Martín Gómez (Martín Gómez et al., 2010)

2.3.5. Habitabilidad

Los requisitos de habitabilidad están en permanente revisión. A los edificios se les exige prestaciones que varían con el paso del tiempo. Para que un edificio se considere habitable no solo debe reunir aspectos dimensionales que permitan desarrollar una actividad, como la altura libre o la superficie mínima sino que debe garantizar aspectos ambientales, como la calidad del aire, las condiciones de temperatura y humedad, lumínicas o acústicas, y aspectos energéticos, como el uso eficiente de la energía y acceso a la información: el acceso a la energía de los habitantes de los edificios se convierte en un elemento que cobra cada vez más relevancia en la arquitectura actual. La sostenibilidad también es un aspecto básico en la habitabilidad.

En marzo de 2016 se cumplieron diez años desde que se aprobó el Código Técnico de la Edificación, marco normativo que establece las condiciones de habitabilidad y seguridad en los edificios desde el año 2006 en España. Regula aspectos relacionados con la salubridad, como el control de las humedades, residuos, calidad del aire interior, abastecimiento y evacuación de aguas, el ruido y el uso de la energía en los edificios, tanto en climatización, iluminación, agua caliente sanitaria como en el uso de energías renovables.

Aun hoy está vigente la Orden de 29 de febrero de 1944, *por la que se establecen las condiciones higiénicas mínimas de las viviendas*. Esta norma, pionera en España, dice en su artículo primero que *“Toda vivienda familiar se compondrá, como mínimo, de cocina-comedor, un dormitorio de dos camas y un retrete, habiendo de tenerse siempre en cuenta la relación entre la capacidad de la vivienda y el número y sexo de sus moradores”*.

Desde este año se establecen como obligatorios en España aspectos básicos sobre la habitabilidad en las viviendas, como dimensiones mínimas y relación entre las piezas de una vivienda, la necesidad de ventilación directa al exterior estableciendo un tamaño mínimo de los patios interiores, la necesidad de instalaciones de recogida de aguas residuales y una red pública de saneamiento.

En su último artículo, el 14, se incorpora un aspecto que no será desarrollado hasta los años 70 -tras la gran crisis del petróleo- y en profundidad hasta el Código Técnico. Establece que las soluciones constructivas deben aislar térmicamente, dependiendo del clima, y de la humedad los espacios habitables:

“14. En todo edificio destinado a viviendas, por el tipo de construcción adoptado y materiales empleados, se asegurará el aislamiento de la humedad en muros y suelos, así como el aislamiento térmico para protegerlo de los rigores de las temperaturas extremas propias de la región en que esté emplazado.”

Al final de este artículo se indica en una nota al pie la obligación de cumplir con la ordenanza provisional 32 de VPO, que hace referencia a un aspecto muy relevante relacionado con el confort térmico y la salubridad: el aislamiento térmico.

“Ordenanza 32. Aislamiento térmico -Se dividirá España en dos zonas. La primera agrupará las regiones que comprenden la isoterma de más de 30 grados o que están por debajo de la de menos cinco grados, agrupando la segunda zona las restantes regiones. En la primera zona los muros tendrán una conductibilidad inferior a 1,2; las, cubiertas, cuando no comprendan locales de habitación, una conductibilidad inferior a 1,6 y en caso de ser cubiertas planas, inferior a 1,2. En la segunda zona, los aislamientos de muros y cubiertas serán, respectivamente, los que garanticen conductibilidades máximas de 1,6 y 1,8. En las viviendas de planta baja será obligatoria la colocación de un forjado separado del terreno un mínimo de treinta centímetros.”

La relevancia de esta Orden, aun vigente, reside en que inicia la lucha contra las condiciones insalubres de infraviviendas como las descritas del centro de la Barcelona de principio del siglo XX, desde la normativa.

Javier Neila escribe que el principal objetivo de la arquitectura es la habitabilidad, relacionada con el bienestar del usuario.

El *bienestar* –también utilizamos el galicismo *confort*- es subjetivo, pero para cada parámetro que lo regula se pueden establecer rangos para los que la mayor parte de las personas se sentirán en unas condiciones adecuadas. Neila define bienestar como el *“resultado de la interpretación que hace el cerebro de factores extrínsecos (la temperatura, la humedad, el ruido) e intrínsecos (estado de salud, hambre, sed, cansancio, estrés, etc.)”* (Neila González, 2013).

Los factores extrínsecos estimulan a los órganos receptores mediante determinadas situaciones, produciendo una excitación, transmisión de la señal hasta el cerebro, una imagen del fenómeno y una respuesta. En función de éstos, la reacción será placentera o molesta en el organismo y así podremos calificar el grado de confort o bienestar de un espacio.

No depende de un solo factor sino de la combinación de todos.

La ciencia que analiza los efectos provocados por la combinación de un grupo variable de estímulos es la *sinestesia*, que podría definirse como la alteración, generalmente subjetiva, de la percepción de un estímulo provocada por la estimulación aplicada en otra parte del cuerpo diferente.

Es la combinación de estos factores la que determinan las condiciones idóneas de habitabilidad de un espacio. Deben, por lo tanto, analizarse conjuntamente. El confort, considerado desde un punto de vista amplio, es una relación de sinestesia entre los diversos sentidos del ser humano (Neila González & Acha Román, 2009).

Los parámetros que influyen en el bienestar global en los edificios se pueden agrupar en lumínicos, acústicos, químicos, electromagnéticos e higrotérmicos.

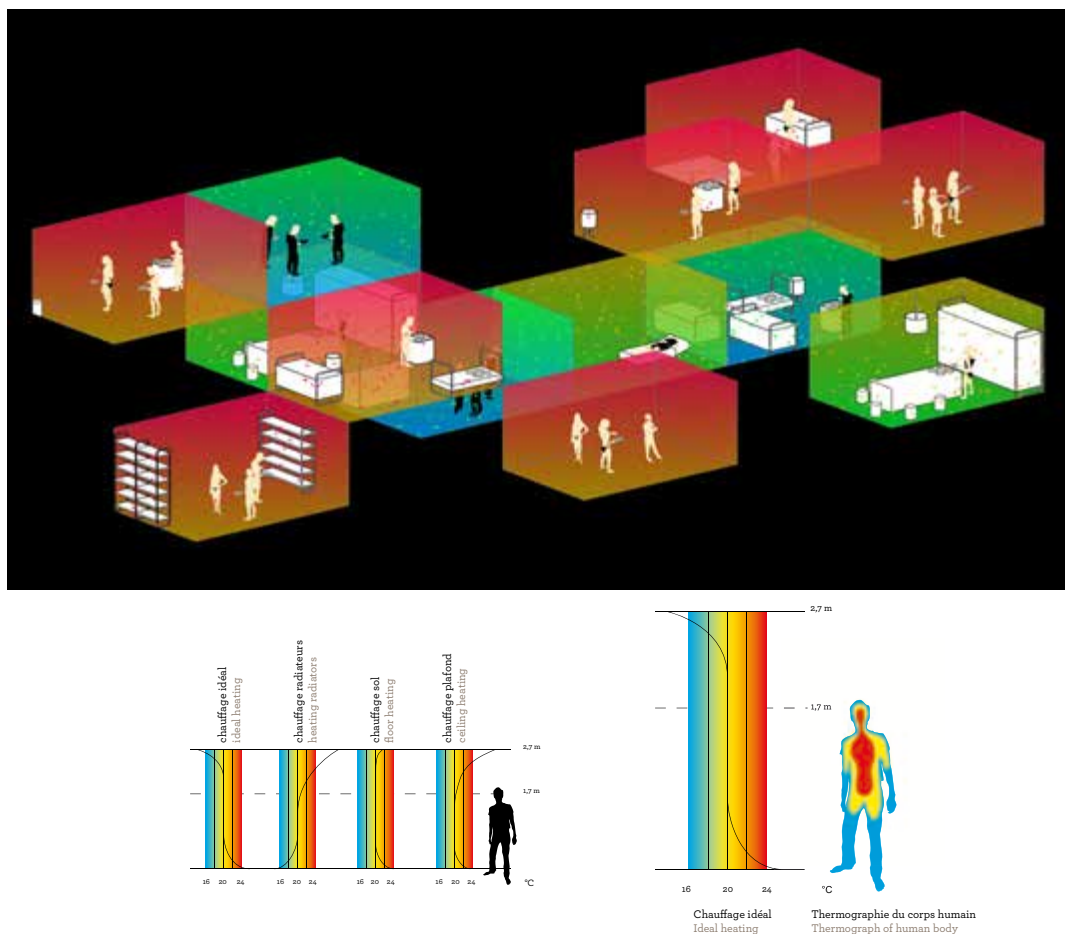


Figura 2.3.5. Esquemas que relacionan las condiciones higrotérmicas con la actividad humana (Rahm, 2017), (Rahm, 2009)

El ambiente lumínico

LES CONGRES INTERNATIONAUX D'ARCHITECTURE MODERNE INTERNATIONALE KONGRESSE FÜR NEUES BAUEN



Figura 2.3.6. Esquemas de iluminación de aulas en el Congreso Internacional de Arquitectura Moderna. Revista AC nº 9, 1933 (AA.VV.,2005)

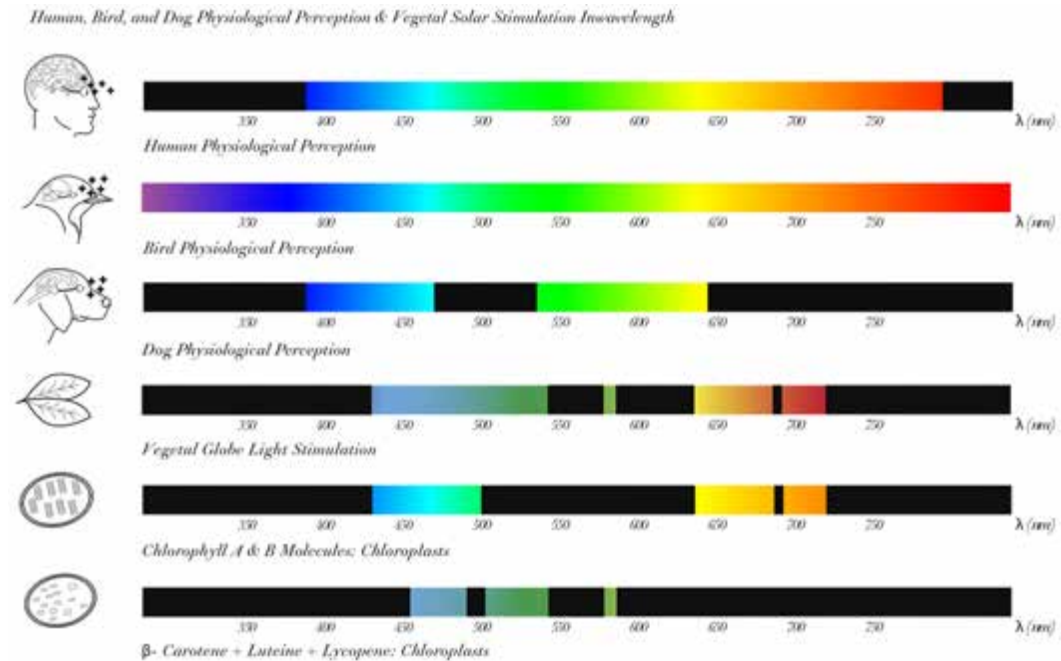


Figura 2.3.7. Precepción fisiológica de la luz en función de la longitud de onda. Proyecto en Milán para Artemide, 2015 (Rahm, 2017)

Le Corbusier acabó reconociendo la importancia del confort lumínico. *“Mi mujer fue la que me llamó la tención (sic) sobre esta cuestión. Un día me dijo que mi casa era un cuartel. Le dije: pero ¿por qué?. De repente, reflexionando, (...) dije: Es la iluminación la que produce eso; hay demasiada iluminación por todas partes, hay una iluminación demasiado intensa, en algunos lugares demasiado brutal (...) He comprendido, ¿quién lo dijo en otra ocasión?. Era Arquímedes, creo. He descubierto la ley de la iluminación”* (Le Corbusier, citado por Paricio, 2014)

La iluminación está relacionada con bienestar y salud, y es el elemento fundamental en la arquitectura –*“la luz natural es la única luz que hace que la arquitectura sea arquitectura”* (Louis I. Kahn).

Vemos aquella parte del espectro electromagnético a la que nuestros ojos son sensibles. Por debajo, la radiación infrarroja que percibimos como calor. Por encima, la ultravioleta, de la que debemos protegernos por ser altamente energética. Para conseguir un entorno iluminado de calidad los arquitectos trabajan con la luz natural y la artificial.

Los ambientes son más sanos si están correctamente iluminados. Se ha establecido relaciones entre la depresión y los cambios genéticos en la composición química del cuerpo, cambios que generalmente involucran un desequilibrio en los neurotransmisores, en particular la serotonina, y es la luz, a través de la pupila, quién estimula su producción. Los biorritmos del ser humano están vinculados al transcurrir del día. Trabajar bajo luz artificial de forma permanente produce distinto nivel de fatiga (Neila González, 2013). Situar la zona de noche orientada al este favorece, por ejemplo, que el despertar siga el camino del sol en el horizonte.

Cuando observamos objetos o realizamos tareas visuales sin molestias ni fatigas gracias a una correcta calidad y cantidad de iluminación, hablamos de bienestar visual. Requerimos que un espacio tenga un nivel adecuado de iluminación, que el contraste sea apropiado -evitando deslumbramientos- y que veamos los colores con la mayor precisión posible para una correcta percepción.

El nivel de iluminación adecuado se determina por la actividad realizada, el tamaño de lo que queremos ver incluso por la edad del individuo. Se mide en lux y, por ejemplo, necesitamos al menos 500 lux para leer un libro o 100, para caminar por un pasillo.

El ojo percibe objetos por contraste, que es la diferencia de luz entre dos zonas dentro del campo visual. Un excesivo contraste puede causar deslumbramiento. La pupila se ajusta a los cambios de luz, pero necesita un tiempo, por lo que los cambios bruscos de luz en los espacios provocan disminución del confort visual y la seguridad.

La normativa no presta toda la atención debida a este último aspecto: se fijan niveles mínimos de iluminación en función del uso al que van a estar destinadas las estancias o se establecen tamaños mínimos de huecos al exterior en función del tamaño de las mismas, pero deberían ser más ambiciosas y apostar por garantizar, por ejemplo, un mínimo de soleamiento y luz natural como requisito de habitabilidad de la vivienda. La Xunta de Galicia llegó a plantear unas condiciones mínimas de soleamiento en las viviendas⁵, pero en sus normas de habitabilidad lo terminó dejando en manos del planeamiento, lo que provoca que no se ponga en práctica. Seguimos asistiendo a aulas mal iluminadas y viviendo en casas con insuficiente luz natural o escasísimo soleamiento aun cumpliendo con las normativas.

La forma en la que iluminamos artificialmente los objetos determina cómo los vemos. Si una fuente de luz emite todas las longitudes de onda del espectro visible veremos perfectamente el color que nos refleja cada objeto –el color del objeto-. Las lámparas incandescentes –como la bombilla de Edison- ilumina con todos los colores del arcoíris –tienen un espectro de luz continuo-. Sin embargo, es más una estufa que una fuente de luz: transforma el 85% de la energía consumida en calor y solo el 15% en luz. Salvo en actividades que requieren de la máxima calidad en reproducción de color –como puede ser la iluminación de un museo- se utilizan fuentes de luz que no contienen todo el espectro visible, pero optimizan el uso de la energía, para cumplir con las exigencias de eficiencia energética. La tecnología LED (light-emiting diodes), cuya luz blanca es la combinación de los tres colores RGB (rojo, verde y azul) produce buenos resultados lumínicos aumentando hasta diez veces la eficiencia energética respecto a la luz incandescente.

Una correcta iluminación es más un problema de diseño lumínico que de tecnología.

⁵ En el Decreto 29/2010, de 4 de marzo de 2010, por el que se aprueban las normas de habitabilidad de viviendas de Galicia, [Enlace](#)

El ambiente acústico

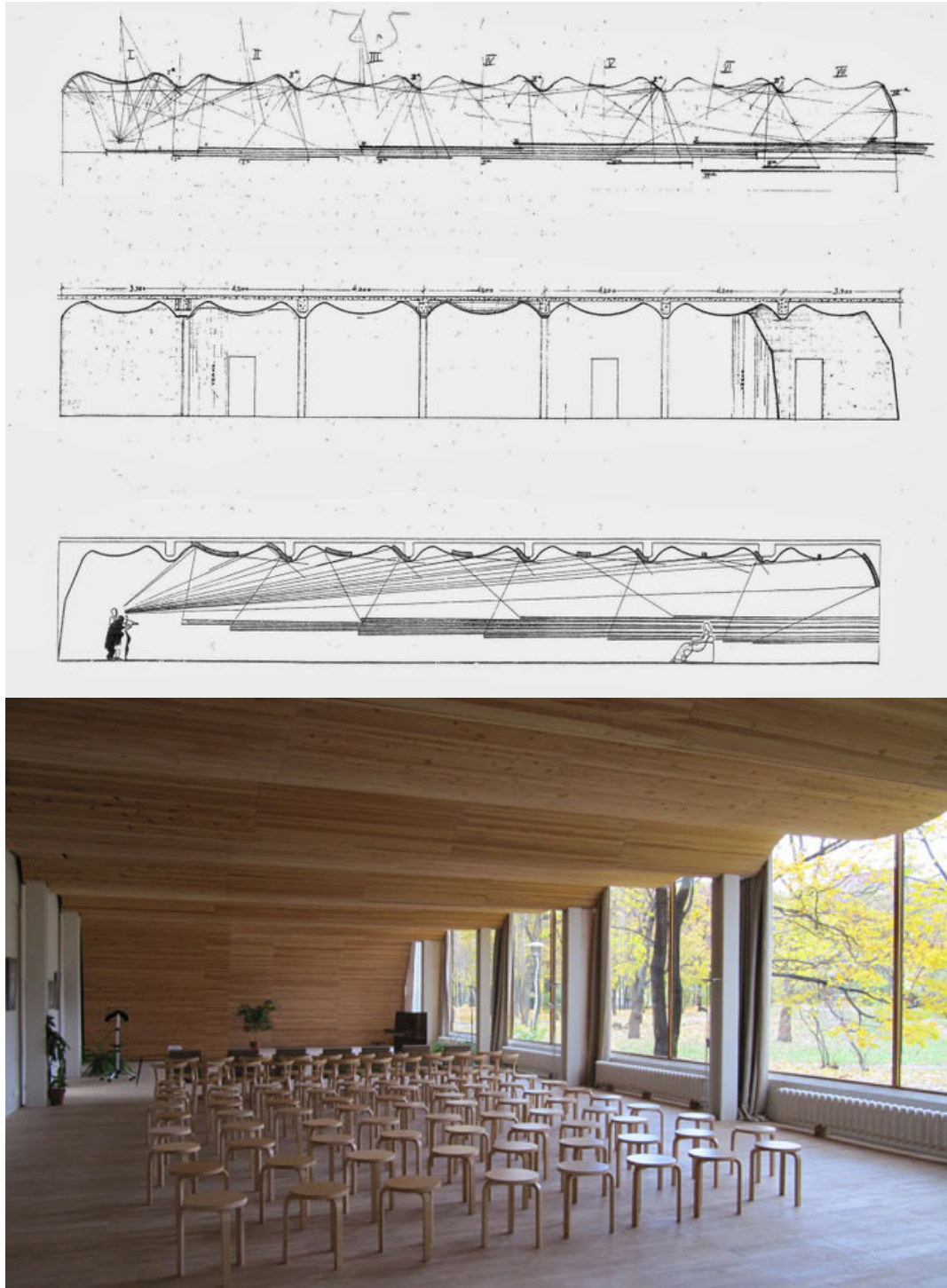


Figura 2.3.8. Diseño acústico de la sala de conferencias de la biblioteca de Vipuri. Arquitecto Alvar Aalto, 1935 (Alvar Aalto Museum, 2017)

El aspecto más conocido en referencia al confort acústico es el ruido.

La normativa busca garantizar un aislamiento de fuentes sonoras que pueden perturbar la actividad de un local. El ruido es un sonido inarticulado que resulta desagradable⁶. Construimos los edificios para controlar tanto el ruido procedente del exterior –el tráfico, por ejemplo- como el procedente de otros espacios anexos. En los edificios se definen zonas protegidas –como dormitorios, salas de estar o aulas de enseñanza, que aumentan las prestaciones acústicas respecto al resto que se denominan solo habitables –como pasillos, cocinas o cuartos de baño.

Pero hay otros aspectos muy importantes relacionados con la acústica, como la correcta distribución del sonido y la reverberación adecuada, aspectos que se consiguen con el diseño arquitectónico y los materiales empleados para revestir las salas.

El confort acústico es, por tanto, aislamiento y acústica: el primer aspecto está muy regulado por las normativas, el segundo queda en su mayor parte en la mano del buen hacer del arquitecto.

La calidad del aire

“La arquitectura es el aire que respiramos; eso sí, un aire cargado precisamente de eso, de arquitectura.”

Alejandro de la Sota (citado por Abalos y Sentkiewicz, 2015)

El aire interior no es fiel reflejo del exterior. Aun así, el inicio de una adecuada calidad del aire interior empieza en la ciudad. La vida cotidiana difícilmente se desarrolla en un ambiente con mala calidad de su aire. No lo vemos pero lo percibimos y es determinante en la habitabilidad. De hecho, la causa más probable en el denominado *síndrome del edificio enfermo*⁷ es una incorrecta ventilación.

6 Así lo define la Real Academia de la Lengua Española

7 Según el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, el Síndrome del edificio enfermo (SEE) es el nombre que se da al conjunto de síntomas diversos que presentan, predominantemente, los individuos en estos edificios y que no van en general acompañados de ninguna lesión orgánica o signo físico, diagnosticándose, a menudo, por exclusión. La Organización Mundial de la Salud (OMS) diferencia entre dos tipos distintos de edificio enfermo. El que presentan los edificios temporalmente enfermos, en el que se incluyen edificios nuevos o de reciente remodelación en los que los síntomas disminuyen y desaparecen con el tiempo, aproximadamente medio año, y el que presentan los edificios permanentemente enfermos cuando los síntomas persisten, a menudo durante años, a pesar de haberse tomado medidas para solucionar los problemas. (INSHT, s.f.)

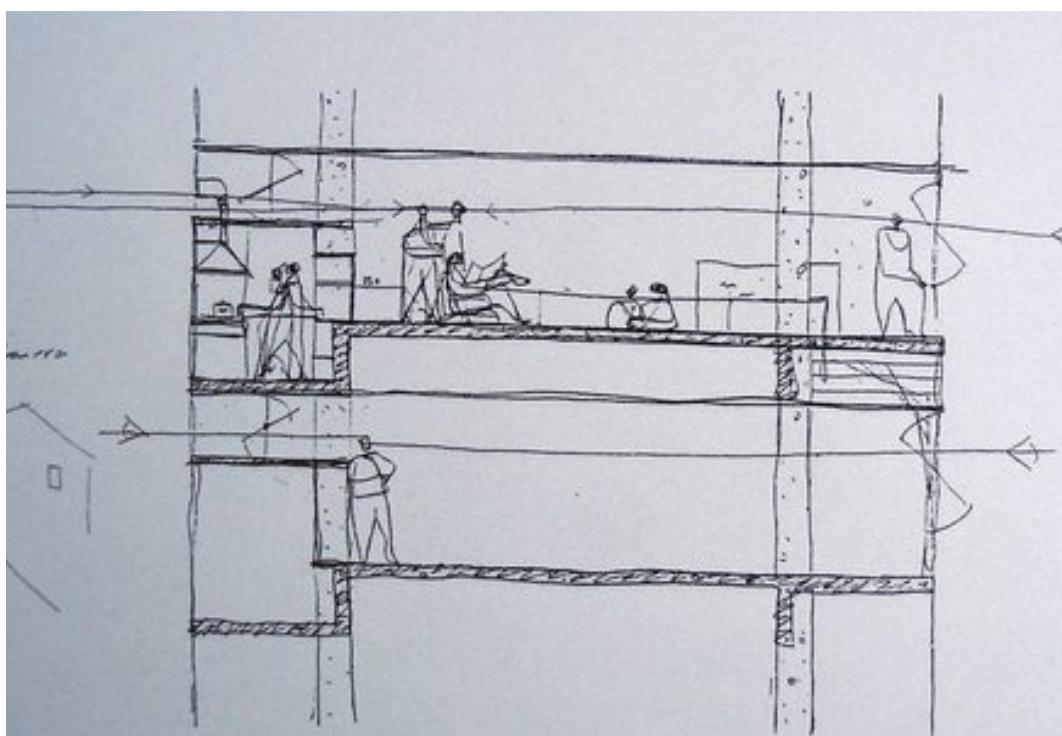


Figura 2.3.9. Sección del edificio Jaraguá, Sao Paulo, 1984, de Paulo Mendes da Rocha

Ventilamos para renovar el aire que contaminamos al respirar o al desplazarnos en coche, por ejemplo. La presencia de contaminantes (como los NO_x que emiten los coches, el CO_2 que exhalamos en la respiración o el ozono que emiten algunas máquinas) puede provocar graves problemas en las personas.

Cada vez se nos exige realizar edificios más herméticos, para ahorrar energía, lo que provoca que el edificio no “respire” de modo indirecto, como lo hace una casa antigua con ventanas de madera, que deja pasar el aire y eso ayuda a renovarlo, aunque provoque pérdidas energéticas poco relevantes, por cierto, en climas cálidos como el nuestro. También ventilamos para controlar los niveles de humedad dentro de los límites del confort: la respiración y otras actividades humanas provocan un aumento de la humedad en el aire que puede provocar ambientes insalubres, humedades y la proliferación de microorganismos. Al sustituir un aire usado – contaminado, con humedad relativa alta y mayor concentración de CO_2 de la deseada- por aire exterior buscamos controlar todos estos aspectos.

También puede utilizarse la ventilación como un mecanismo bioclimático, tomando el aire exterior de zonas frescas en verano y sustituyendo las bolsas de aire caliente, por ejemplo. Los edificios deben diseñarse para que ventilen de modo

natural pero también estar dotados de instalaciones que garanticen la correcta renovación del aire cuando ésta no se produzca correctamente. Los sistemas también buscarán la máxima eficiencia energética y reducirán al máximo el ruido de sus ventiladores o el transmitido por vibración al edificio para no suponer un problema acústico... todo está relacionado.

Un incorrecto diseño de las redes de saneamiento también puede provocar olores que pueden inhabilitar un espacio. Somos sensibles a los efectos de casi medio millón de compuestos químicos con tres sistemas sensoriales: el olfato –olor-, el gusto –sabores- y el sentido químico común, con las que percibimos las propiedades irritantes de sustancias inhaladas y se desencadenan reflejos para limitar la exposición. La respuesta combinada del primero y el último es la que determina como percibimos la calidad del aire (Neila González, 2013).

La calidad del aire es, pues, un elemento esencial en la habitabilidad.

El ambiente electromagnético

Hemos hablado ya de radiación y habitabilidad: el sonido y la luz son ondas que nos rodean. El planeta tierra recibe radiación procedente del universo que varía según el lugar. Vivimos en un mar de radiaciones cósmicas que son esenciales para la vida: magnetismo, radiactividad o energía térmica. La tierra y la actividad humana también producen radiaciones. Los factores electromagnéticos que influyen en procesos vitales son:

- Radiaciones provenientes del cosmos y de la tierra: magnetismo, radiactividad, energía térmica o telúrica.
- Radiaciones artificiales de origen humano: conducciones eléctricas, ondas de radio, televisión, radares, motores eléctricos, transformadores...etc.
- Materiales de construcción, que transmiten sus cualidades por radiación o evaporación de sus partículas más volátiles, o erosión o desprendimiento de diminutas partículas. Pueden contener microorganismos y a nivel electromagnético puede transmitir campos electrostáticos que afectan a campos eléctricos y magnéticos naturales.

Un tipo de contaminación a la que estamos sometidos es, por tanto, la radiación, natural o procedente del desarrollo tecnológico.

El ambiente higrotérmico

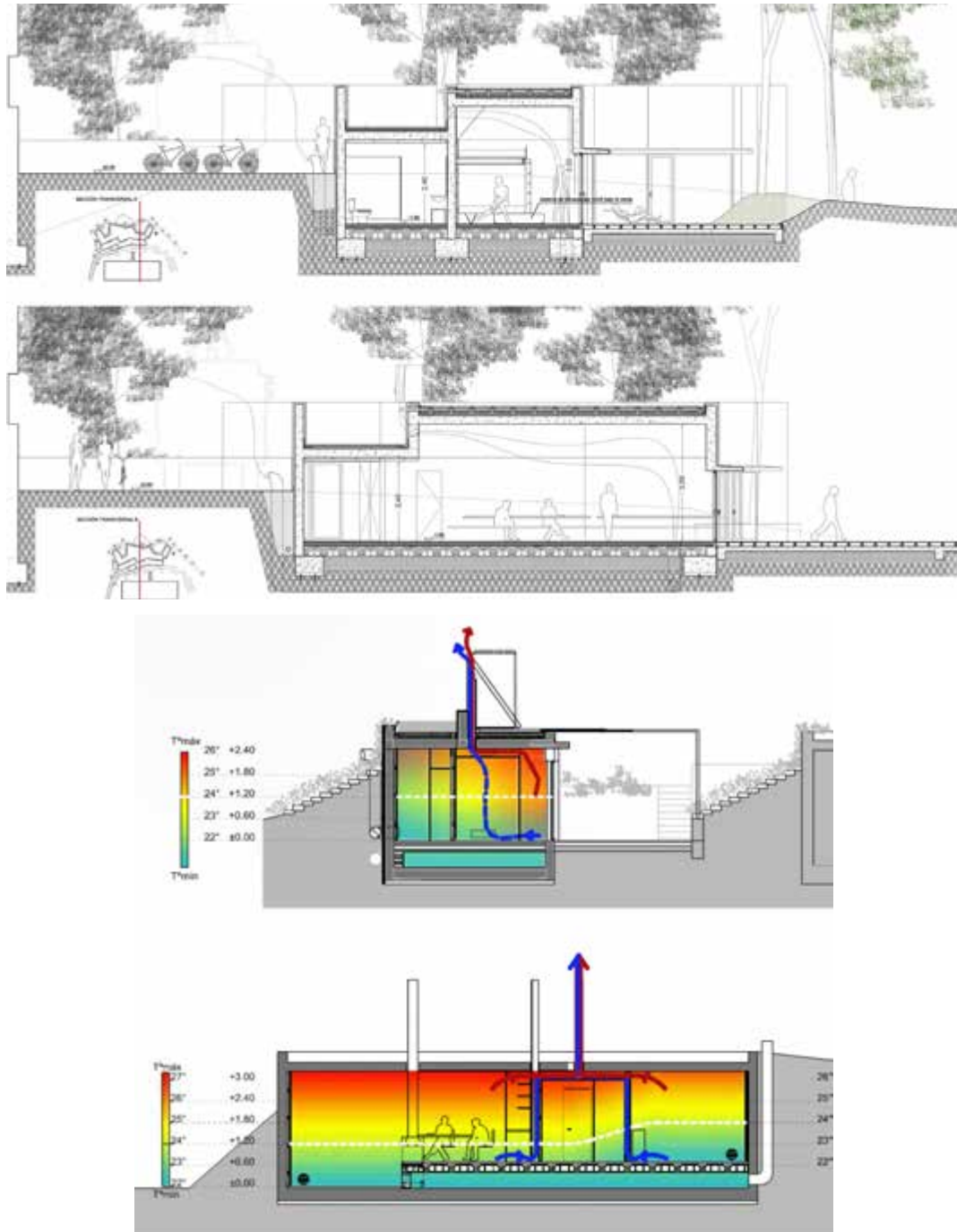


Figura 2.3.10. Arriba, Sección constructiva del Albergue juvenil en La Rafa, Bullas (2011), Premio especial Sostenibilidad en los XVII PRAU. Abajo, análisis térmico en sección de una vivienda Bioclimática del CEAMA, Bullas, Premio Regional de Arquitectura en los XV PRAU (2008). Retes Arquitectos (Consejería de Fomento CARM, 2017)

El cuerpo humano produce energía consecuencia del metabolismo, que transforma los alimentos en trabajo mecánico y en calor. Intercambiamos energía con el medio en forma sensible –radiación, conducción y convección, y latente – evaporación de agua. Alcanzamos un equilibrio cuando el calor producido es igual al disipado. Ahora bien, este equilibrio no se consigue fácilmente, ya que hay gran cantidad de factores que influyen, como la temperatura y humedad del ambiente, la vestimenta o la exposición a la radiación solar, entre otros.

Los mecanismos que utiliza el organismo para mantener la temperatura corporal son análogos a los que utilizamos en los edificios para hacerlos funcionar térmicamente: con calor se produce un incremento del flujo sanguíneo a través de los vasos capilares cutáneos y aumenta la temperatura superficial de la piel. Aumenta la sudoración para que al producirse la evaporación refrigere la piel.

Con frío reducimos la temperatura superficial de la piel reduciendo el flujo sanguíneo e intentamos aumentar la resistencia térmica cutánea –piel de gallina que utiliza el aire como aislante-, o producimos calor mediante el trabajo realizado con movimientos reflejos –tiritonas-. En definitiva, el cuerpo reacciona ante situaciones adversas para mantener unas condiciones, como lo debe hacer un edificio.

Cuando equilibramos el balance térmico entre el cuerpo y el ambiente experimentamos una sensación de bienestar térmico. Dado que es subjetiva, la solemos dar por buena cuando entre el 80 y el 90% de los habitantes del edificio está satisfecho. Olgay nos define la zona de confort relacionando temperatura y humedad relativa (fig. 2.3.11) del ambiente, que recoge magistralmente de la Sota en sus bocetos (fig. 2.3.12).

El interés por el bienestar térmico y su definición aparece en los años 70, con la generalización del aire acondicionado, cuando se publica la obra *“Thermal Comfort”*, de P.O. Fanger. El método de Fanger utilizaba para la valoración del ambiente térmico el Índice de Voto Medio Predicho que considera la satisfacción de los habitantes (Neila González & Acha Román, 2009).

Depende de la temperatura del aire (la que mide un termómetro de mercurio), la temperatura radiante media del recinto (la temperatura a la que están techos, paredes y suelos), la velocidad del aire y la humedad relativa.

Las zonas de bienestar están muy relacionadas con la actividad que se desarrolla en el edificio: la temperatura de confort será mucho más baja en la cafetería de una estación de esquí que en la de una biblioteca.

Las normativas no fijan únicamente los rangos de estos parámetros en función del bienestar, sino que también las limitan por ahorro energético, por ejemplo, la temperatura en un edificio comercial que está climatizado con energía convencional no puede bajar de 26°C en verano ni superar los 21°C en invierno: no solo el confort marca los límites. Cada grado centígrado de diferencia puede suponer, según el IDAE, un 7% de incremento del consumo energético.

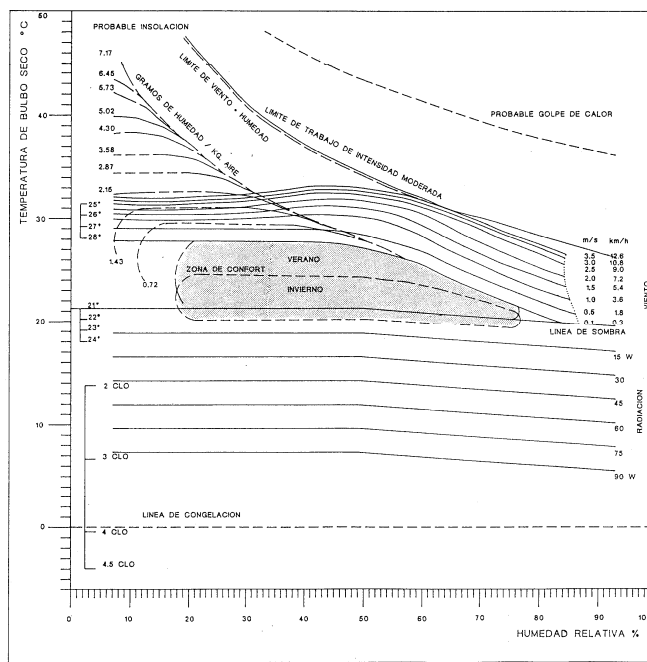


Figura 2.3.11. Gráfica bioclimática. Fuente: Olgay 2002

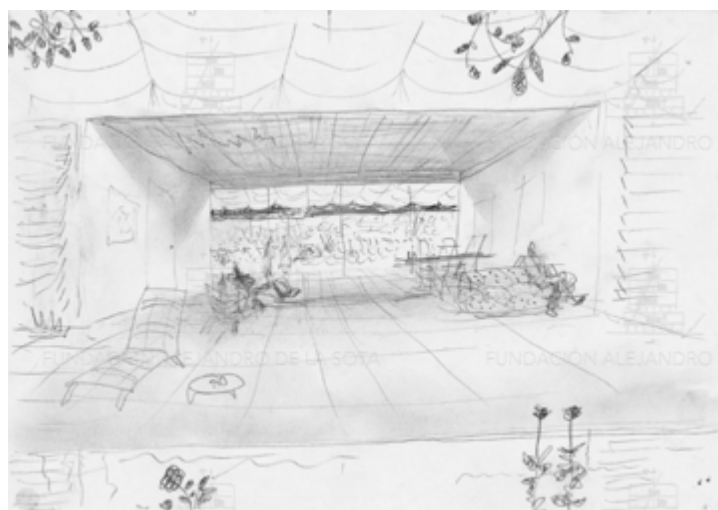


Figura 2.3.12. Casas en Alcudia. Mallorca, 1984. Boceto interior. Alejandro de la Sota. Fuente: Fundación Alejandro de la Sota

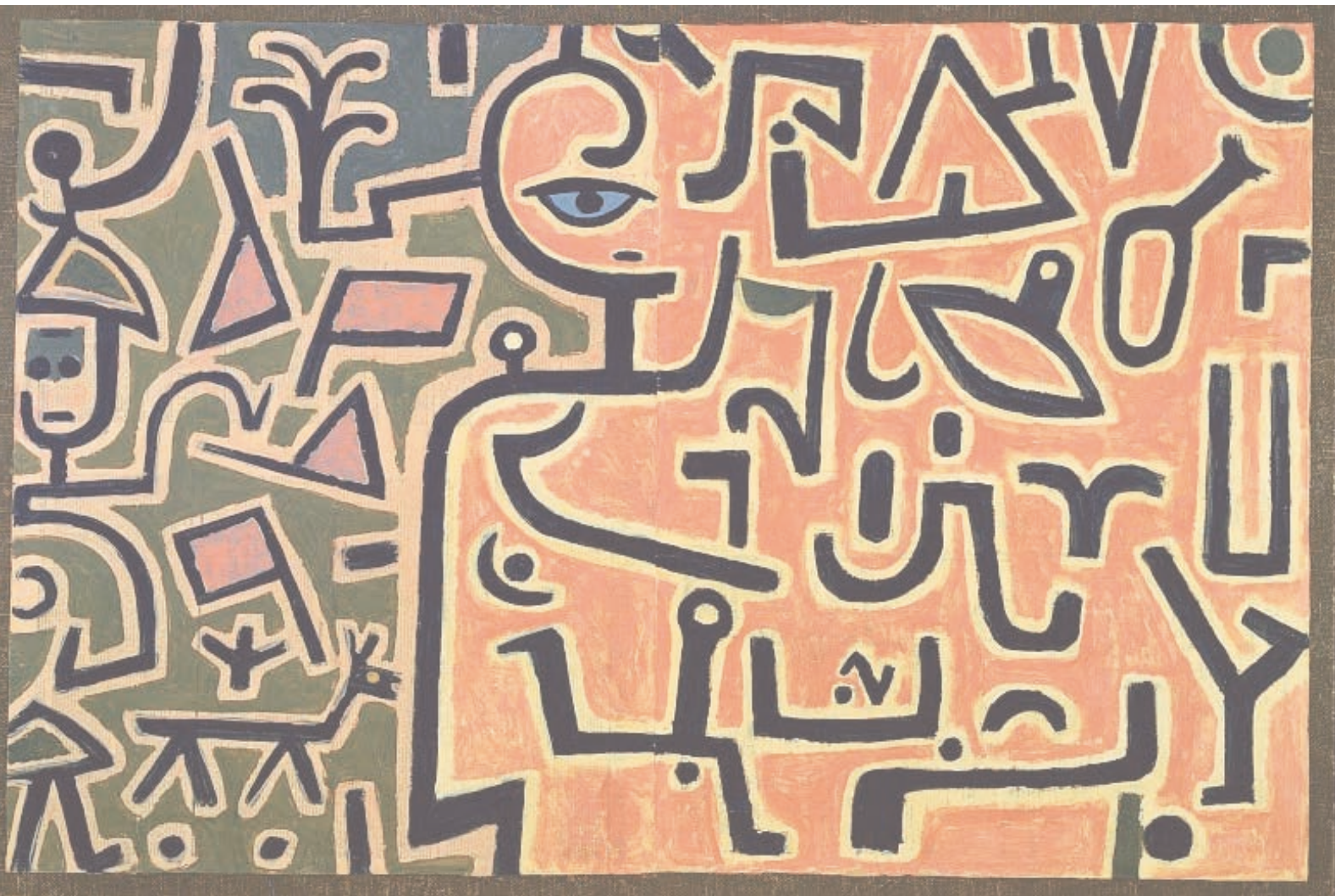


Figura 2.4.1. Paul Klee, 1938, Vorhaben

2.4. ARQUITECTURA Y ENERGÍA

El debate energético debe vincularse al ámbito arquitectónico, al urbano y al territorial (Fernández-Galiano, 2015).

Salvador Rueda expone que la energía asociada a los tejidos urbanos puede desglosarse en tres grandes bloques: la *energía de uso* -funciones activas de edificios y espacios públicos que determinan la demanda energética- la *energía gris* -ligada al proceso de edificación y urbanización- y la *energía relacionada con los flujos másicos* -flujos materiales de tipo no energético que utiliza el edificio, como el agua o los residuos generados- (Rueda, et al., 2012).

El modelo territorial no es solo determinante en los consumos de energía destinada al transporte y a las actividades urbanas sino que condiciona en gran medida las necesidades energéticas de la arquitectura.

La arquitectura puede entenderse como organización material que regula y ordena flujos energéticos; y al propio tiempo, e inseparablemente, como organización energética que estabiliza y mantiene formas materiales¹ (Margalef, 1978 citado en Fernández-Galiano, 1991).

Fernández-Galiano (1991) considera la arquitectura como un asunto de termodinámica: “*el edificio alberga procesos pero él mismo es también un proceso y ambas circunstancias demanan (sic) la presencia de la energía*”. El autor traza una doble vía de presencia de la energía en la arquitectura: en los procesos de construcción y en los de utilización, lo que denomina “*energía de construcción*” y “*energía de mantenimiento*”. La primera es la energía necesaria para construir, organizar o reparar un edificio -la que Rueda denomina *energía gris*. La segunda es la que refiere al consumo del edificio o más bien, de la utilización del edificio para el fin al que está destinado por sus usuarios, que tiene que ver con el acondicionamiento térmico, calentamiento de agua, iluminación, alimentación eléctrica de máquinas -ascensores, motores o bombas, entre otros procesos y actividades.

Esta *energía de mantenimiento* es la que sirve para garantizar unas condiciones de bienestar a los habitantes. El edificio utiliza la energía disponible para establecer estas condiciones, que son irrenunciables, y que han ido aumentando a lo largo del tiempo, desde los planteamientos higienistas de principios del siglo XX hasta nuestros días.

1 Ramón Margalef, 1978. *Perspectivas de la teoría ecológica*, Blume, Barcelona, p. 98

Victor Olgyay, en 1963, escribe que *“la vivienda es el principal instrumento que nos permite satisfacer las exigencias de confort adecuadas. Modifica el entorno natural y nos aproxima a las condiciones óptimas de habitabilidad. Debe filtrar, absorber o repeler los elementos medioambientales según influyan beneficiosa o negativamente en el confort del ser humano”* (Olgyay, 2002).

A finales del siglo XIX y principios del XX se desarrollan edificios especializados, con nuevos requisitos, lo que provoca el desarrollo de nuevas tipologías arquitectónicas: las estaciones de ferrocarril o de metro, los centros penitenciarios, los hospitales modernos o las escuelas.

El edificio tiene, en su definición programática, características singulares que determinan las necesidades energéticas: la función determina la demanda energética, en la que el usuario tiene una gran influencia.

También son determinantes los ciclos o periodos de uso: existen edificios concebidos para su utilización continua, durante todo el año, y otros con claro carácter estacional. Uso y usuario son factores determinantes: en realidad deberíamos hablar de consumo energético de los usuarios de los edificios aunque lo habitual es referirse a la energía que consume un edificio.

En referencia al uso estacional del edificio, encontramos un antecedente previo a la idea de sostenibilidad, en los planteamientos de racionalización del uso de los recursos y de relación con la utilización del edificio: José Luis Sert y Torres Clavé, en el año 1931 escriben en el artículo en la revista *A.C. Documentos de Actividad Contemporánea*, denominado *“Pequeñas casas para fin de semana”* (AA.VV, 2005):

“Del mismo modo que en los últimos años ha evolucionado el concepto del automóvil, poniéndose en boga los modelos pequeños y de poco consumo, que se ajustan a un programa de reducción de gastos, igualmente debe evolucionar también el concepto de la residencia de verano.”

En el primer tercio del siglo XX, ya plantean los arquitectos tanto la economía de medios al construir como el uso estacional de la vivienda.

Encontramos carencias muy importantes en la forma de conducir a la arquitectura hacia el cumplimiento de los objetivos que plantea la normativa española y que fundamentan la investigación iniciada en esta tesis.

Los edificios deben cumplir ciertas exigencias normativas que llevan al arquitecto a buscar soluciones que aun no han sido contrastadas, evaluándolas en el proyecto mediante simulaciones energéticas con aplicaciones informáticas. Las exigencias, consistentes en limitar demandas y consumos energéticos en función de ciertos parámetros, varían únicamente en función de los climas de referencia donde se ubican. Cada edificio tiene unos condicionantes singulares que determinan su comportamiento térmico que no son considerados, lo que lleva a posibles disfuncionalidades al aplicar los requisitos normativos.

La falta de consideración de la estacionalidad y del uso concreto al que va a estar destinado el edificio ha provocado la redacción de normativas que plantean programas fijo y funcionamientos estandarizados, lo que denomina *perfil de uso*², que no puede ser adaptado a requisitos particulares a cada caso.

La norma española exige unas prestaciones homogéneas que únicamente evalúa un edificio utilizado en unas condiciones que podemos llamar normalizadas, pero que olvida que cada edificio responde a unas necesidades específicas. Recordemos que la primera directiva europea indica que no se debe contravenir otros requisitos como la utilización a la que se destina el edificio.

El estudio individualizado de cada caso, considerando su ubicación en un clima concreto, se frena en seco al introducir usuario y función. Sirva como ejemplo que la arquitectura residencial de fin de semana o la planteada para una estación del año concreta -como el turismo estival o invernal- no tiene exigencias adaptadas a sus singularidades.

La mayor parte de las soluciones a las que nos llevan las normativas están planteadas para el frío, con textos basados en normas procedentes de países centroeuropeos que tienen la mayor parte del año temperaturas invernales, lo que otorga una excesiva relevancia al aislamiento térmico de las envolventes, que en muchos casos se ve sobredimensionado (Díaz Guirado, 2014).

2 El Documento Básico DB-HE del CTE define "*Perfil de uso*" como "*descripción hora a hora, para un año tipo, de las cargas internas (carga sensible por ocupación, carga latente por ocupación, equipos, iluminación y ventilación) y temperaturas de consigna (alta y baja) de un espacio habitable. Está determinado por el uso del espacio habitable, su nivel de cargas internas y su periodo de utilización*"

Sostenibilidad y arquitectura

La arquitectura actual está inmersa en el gran reto de la búsqueda de un desarrollo que sea sostenible y duradero pero, ¿desde cuándo hablamos de sostenibilidad?

El término *sostenibilidad* es muy reciente. La primera vez que se utiliza el término “sostenible” fue en el Informe Brundtland “*Our Common Future (Nuestro futuro en común)*” en 1987³. En el punto 3 del informe, denominado *el desarrollo duradero*, indica que (Brundtland, 1987):

“Está en manos de la humanidad hacer que el desarrollo sea sostenible, duradero, o sea, asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de futuras generaciones para satisfacer las propias”

La sostenibilidad tiene tres dimensiones: una ecológica, otra social y otra económica. No existe un consenso acerca del significado de lo que denominamos desarrollo sostenible entre distintos autores: puede implicar (Artaraz, 2002): sostener los recursos naturales; sostener los niveles de consumo; lograr la sostenibilidad de todos los recursos: capital humano, capital físico, recursos ambientales, recursos agotables; perseguir la integridad de los procesos, ciclos y ritmos de la naturaleza; sostener los niveles de producción.

Nos interesa establecer el aspecto cuantitativo que aporta el concepto sostenibilidad, que lo distingue de cualquier planteamiento ecologista. La interpretación de la sostenibilidad de una decisión arquitectónica se puede realizar a través de la cuantificación de aspectos o repercusiones de carácter ecológico, social y económico. La sostenibilidad tiene objetivos que son mensurables: implica el análisis cuantitativo de una acción humana para que pueda ser mantenida en el tiempo sin acabar con los recursos naturales ni destruir el medio ambiente.

La arquitectura, como campo de investigación, debe ser proyectada, construida y utilizada desde los preceptos de la sostenibilidad. Debe colaborar en la consecución de los objetivos europeos y mundiales en cuanto a reducción de consumos de energía.

3 Redactado por una comisión encabezada por la doctora Gro Harlem Brundtland, entonces primera ministra de Noruega

La sostenibilidad se puede entender como una idea profundamente conservadora, ya que su interés final se concentra en mantener los sistemas productivos, los hábitos y las culturas, tal como existen, en un perpetuo equilibrio entre los recursos disponibles y los consumibles, para permitir la equilibrada renovación de estos. No supone una revisión ecologista de las relaciones del hombre con el planeta y el resto de los seres vivos⁴, pero tampoco es necesariamente una confrontación.

Arquitecturas de la Energía

La crisis energética de los años 70 del siglo XX provocó la mirada de los arquitectos hacia la termodinámica. Se plantearon vías alternativas para afrontar la solución al problema.

Una vía fue el *universalismo* que, fundado en la noción de homogeneidad térmica y formal, busca la solución en la tecnología. Le Corbusier que, en su primera etapa, con su *machine à habiter* o el *mur neutralisant*, buscaba integrar en las formas arquitectónicas el mundo de la tecnología ambiental, es el gran exponente de esta corriente.

Otra vía, la del *regionalismo*, más sensible a las especificidades del contexto, mira a la arquitectura vernácula y la relación con el lugar, como lo hace Frank Lloyd Wright (fig. 2.4.2). El clima es un elemento mediador entre viejas y nuevas soluciones. No busca imitar las formas sino los procesos que producen, resultando una pluralidad estética (Prieto González, 2014).

Fernández-Galiano (1991) distingue tres tipos de “*arquitecturas de la energía*”: la *heliotecnología*, el *bioclimatismo* y la *rehabilitación*, que asocia con las dos primeras leyes de la termodinámica. Edificio y ciudad como sistemas termodinámicos abiertos que son, a la vez, estructuras materiales portadoras de información y sistemas materiales sometidos a un proceso de degradación y conformación simultánea. La energía se almacena como forma y como información.

La primera de estas arquitecturas de la energía es la relacionada con la primera ley, la de conservación de la energía. Es la que denomina “*heliotecnología*” o “*helioingeniería*”: Tiene una vertiente en la arquitectura solar activa y busca soluciones en la tecnología con vocación universalista.

⁴ La *ecología* es una ciencia que estudia el medio ambiente (del griego *oikos* –casa-, estudio de la casa). Estudia las relaciones entre los organismos. Establecemos su origen en los escritos del biólogo alemán Haeckel, en 1869, que consideraba la ecología como el estudio de la economía de la naturaleza, y la define como el estudio científico de las interacciones entre los organismos y su medio ambiente.

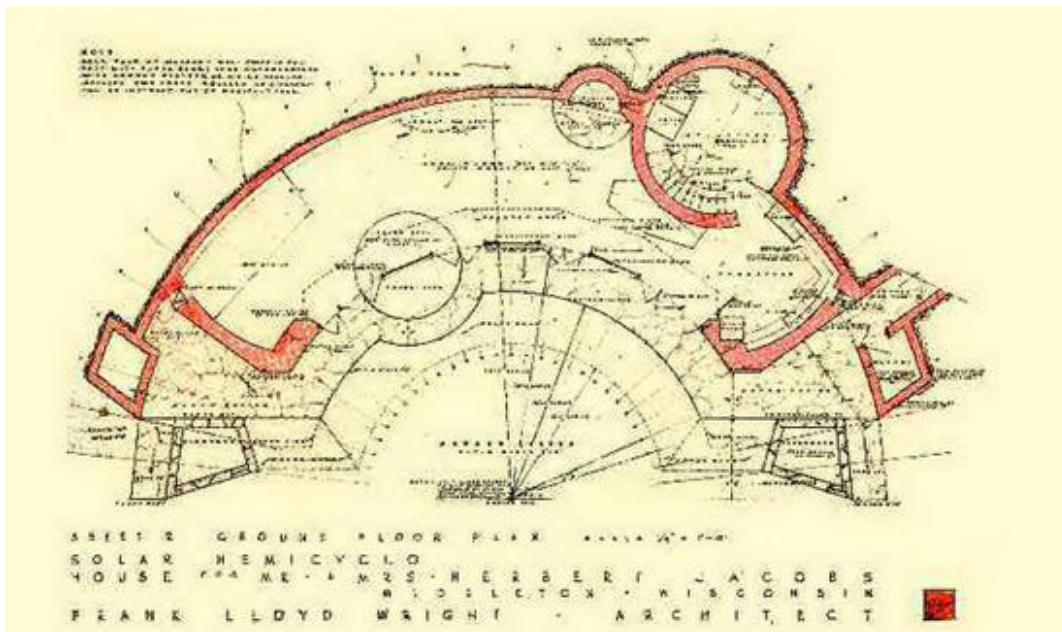


Figura 2.4.2. Hemiciclo Solar (Herbert Jacobs House II), Frank Lloyd Wright, 1944. Fuente Frank Lloyd Wright Foundation

Este tipo de arquitectura está relacionada con la idea de *energía de mantenimiento* del edificio. Produce edificios que buscan la generación de energía con captadores solares, digestores de metano o aerogeneradores, entre otras soluciones basadas en las últimas tecnologías a las que se les unen hoy los sistemas geotérmicos, la aerotermia o los sistemas de iluminación LED.

Es una arquitectura obsesionada por máximos de captación y mínimos de pérdidas, optimizando rendimientos de sus instalaciones y sistemas, donde “*hasta la inclinación de sus paramentos viene determinada por las cartas solares*” con una visión mecanicista. Alguna de esta arquitectura surge en los años 80, como una reacción a las propuestas de la arquitectura moderna –estilo internacional-, pero termina pecando de la misma uniformidad que critica: “*nada tan semejante a una casa solar como otra casa solar...*” (Fernández-Galiano, 1991)

Los otros dos tipos están relacionados con la segunda ley de la termodinámica, la de la entropía: *bioclimatismo* y *rehabilitación*.

El *bioclimatismo* es la segunda de las arquitecturas de la energía –*optimismo entrópico* relacionado con las ideas del químico Prigogine⁵ - que busca la adaptación al clima, de carácter organicista. Es la conocida como arquitectura pasiva, que busca controlar la demanda de energía del edificio y tiene una visión regionalista.

La tercera es la arquitectura de la *rehabilitación*. Es expresión física del “*pesimismo entrópico*” relacionado con los planteamientos de Georgescu-Roegen (1996), que está asociada a la energía embebida en la materia; a la energía gris, cautiva o incorporada, como memoria que debe ser dosificada, cuidada y transmitida: es la que Fernández-Galiano considera “*tan atenta al proceso de degradación entrópica de la materia como al que afecta a la energía dedicada a su recuperación y su reciclaje...*” (Marot, 2015). “*La entropía es la flecha del tiempo*”⁶ (Hawking, 2011)

Estas tres arquitecturas, relacionadas con la termodinámica, emergen con fuerza tras la crisis energética de los años 70 en los países industrializados.

Los planteamientos de universalistas y regionalistas fueron desbordados por una actitud que buscó definir los parámetros de diseño para que las formas resultantes pudieran llegar a ser “objetivas”, con miradas a esquemas de flujos, tablas de contabilidad energética o cartas solares.

Se inician caminos hacia la búsqueda de la objetivación de las soluciones arquitectónicas, en búsqueda de parámetros que controlar para obtener los resultados óptimos. Este parametricismo ocupó gran parte de las investigaciones de los años 80 del siglo pasado.

5 Ilya Prigogine (1917, Moscú-2003, Bruselas). Físico-químico ruso, premio Nobel de Química, 1977

6 Hawking señala que hay, al menos, tres flechas del tiempo diferentes: la *flecha termodinámica*, que es la dirección del tiempo en la que el desorden o la entropía aumentan, la *flecha psicológica* -la dirección en la que recordamos el pasado pero no el futuro- y la *flecha cosmológica* -la dirección del tiempo en la que el universo está expandiéndose-.

Estos planteamientos y las arquitecturas de la energía, perdieron interés a partir de los años 80 por la bajada del precio del petróleo. El intento de objetivación de la respuesta al problema energético perdió fuerza, no por el interés de sus planteamientos sino por la bajada del precio de la energía, que abrió un nuevo tiempo donde o bien la arquitectura perdió interés en las cuestiones relacionadas con la energía o éstas fueron incorporadas como un argumento más del discurso arquitectónico.

Hoy, esta nueva crisis medioambiental reedita estos planteamientos, que han de apoyarse en la tecnología actual. Muchos consideran que lo que se adviene es un cambio de paradigma económico y social que cambiará el modo de proyectar y construir los edificios (Prieto González, 2015). Surgen nuevos factores -medioambientales, sociales y ecológicos- que trascienden a los meramente económicos.

La actual bajada de los precios del petróleo, que muchos analistas auguran duradero, no está produciendo la pérdida de interés que produjo en los 70, ya que el factor medioambiental está muy presente y ha calado en la sociedad.

Numerosas líneas de investigación tratan sobre la objetivación de las soluciones, apostando por definir estrategias que produzcan arquitecturas eficientes desde el punto de vista energético. Pero existe el riesgo de caer en otro un formalismo energético, que produzca una imagen de arquitectura “sostenible”: se debe incorporar a la arquitectura sin anular las dimensiones culturales, espaciales o constructivas en las propuestas.

La arquitectura de la 3ª Ley de la termodinámica

Aceptando las definiciones de arquitecturas de la energía de Fernández-Galiano podríamos proponer una nueva, basada en la tercera ley de la termodinámica, que podríamos denominar *arquitectura de entropía constante*: el postulado de Nerst dice que a medida que un sistema dado se aproxima al cero absoluto, su entropía tiende a un valor mínimo y constante.

La arquitectura de consumo energético próximo al cero⁷ necesita de un planteamiento holístico que aúne, junto al resto de requisitos funcionales o espaciales, los energéticos.

⁷ Los Edificios de Consumo Energético Casi Nulo (net Zero Energy Buildings) buscan aproximarse al cero incluso aportar energía en vez de gastarla

Podrá ser un nuevo paradigma o una evolución más de la arquitectura. Es el gran reto al que nos enfrentamos los arquitectos, en uno de los sectores clave para alcanzar los objetivos de sostenibilidad. Existen dos líneas de actuación en este debate: enfoque parcial y enfoque global.

El enfoque parcial analiza las partes que componen el sistema. Está relacionado con la especialización o más bien con los especialistas. Autores, como Prieto González (2014), indican que este enfoque ha cerrado el debate estético en la arquitectura:

“...el diálogo con la energía, más que abrir un debate estético, lo ha cerrado, pues las cuestiones con ella relacionadas se han puesto, en la mayoría de los casos, en manos de ‘especialistas’ —profesionales del bioclimatismo, ingenieros, socioecólogos—, alumbrando al cabo una especie de escolástica tecnocrática que, abusando de la interdisciplinariedad, parece despreciar cuanto no se mida en los términos de lo que vagamente se denomina ‘sostenible’. El resultado ha sido una suerte de funcionalismo ecológico cuyo destino es acaso repetir los errores de los viejos funcionalismos, confiado como está en encontrar la piedra filosofal que transmute directamente la energía en forma construida, sin que en tal proceso parezca haber mucho hueco para las mediaciones de tipo cultural o estético.”

Genera una arquitectura invadida por añadidos tecnológicos, placas solares, aerogeneradores y otros elementos que se suplementan a un edificio convencional.

El enfoque global, o de conjunto, busca un planteamiento holístico de la arquitectura. “*El todo es mayor que la suma de sus partes*” escribe Aristóteles en su *Metafísica*. La integración consecutiva de las partes no conseguirá sustituir a una integración global del todo. Una visión holística plantea una arquitectura integradora de todos los condicionantes de tipo material e inmaterial que la definen.

La dimensión material está enunciada en la teoría clásica de la composición, donde la arquitectura se organiza como un sistema en el que las partes guardan una relación con el todo, semejante a la que las partes guardan entre sí y de nuevo el todo mantiene la misma ley que las partes: Alberti en su obra “*De re aedificatoria*” define la belleza como “*la armonía y concordancia de todas las partes, lograda de tal manera que no pueda añadirse, quitarse o alterarse nada sin que el resultado empeore*” (Wittkower, 2002).

La modernidad⁸ establece dos modelos de organización comprensiva: el modelo asimilado a la producción industrial o “*maquínico*”, y el modelo “*orgánico*” de reminiscencias biológicas (Deleuze & Guattari, 2002).

Ambos modelos despliegan su vocación de sistema, donde las piezas u órganos constituyen una parte esencial del todo, donde encajan, para dar lugar a un ente superior, organizado y autónomo que no se explica cómo suma de las partes. La arquitectura tiene, ciertamente, esta característica que la diferencia de otras construcciones.

La relación entre técnica y arquitectura es directa. La positividad de la técnica puede entrelazarse con el carácter subjetivo de la ideación (Ábalos & Herreros, 2000).

Soluciones apoyadas en una visión parcial de la arquitectura conllevan el análisis de las partes de un modo independiente sin tener en cuenta el alto grado de interrelación que entre ellas existe. Además, alcanzar objetivos de eficiencia en el uso de la energía, no puede deteriorar ningún otro aspecto que requiere la arquitectura: es solo una parte más del sistema.

Trabajos recientes, en el campo de la arquitectura, indican que el arquitecto tiene en su mano acercarse a la solución de los problemas energéticos y medioambientales desde planteamientos holísticos, que integren todos los requisitos de la arquitectura entendida como ecosistema.

La técnica tiene un papel muy importante, en cuanto a la optimización de los rendimientos de las máquinas y equipos, la obtención de materiales con mejores prestaciones o el aprovechamiento de fuentes de energías limpias. Sin embargo no tiene el potencial, casi ilimitado, que ofrece el diseño arquitectónico, que permite una búsqueda de soluciones óptimas e individualizadas a cada propuesta con una función, unos requisitos programáticos adaptadas a condiciones climáticas singulares.

Otras líneas de investigación trabajan sobre el estudio de las partes, para buscar alternativas apoyadas en la tecnología de generación de energía a través de fuentes renovables y la optimización en su uso. Rendimientos de equipos y sistemas que disminuyen los consumos de energía y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero.

⁸ Término que utilizaré por ser, quizás, el menos expuesto a controversia, frente a otros como “estilo internacional”, “arquitectura racionalista”, “arquitectura moderna” o incluso “modernismo” en los países de influencia cultural anglosajona, según los criterios de Calinescu en su publicación “*Cinco caras de la modernidad. Modernismo, vanguardia, decadencia, Kitsch, posmodernismo*” (Calinescu, 2016)

En lo que toca a la eficiencia energética, existen una corriente que busca abordar el problema con esta visión holística: el edificio es más que la suma de las partes. Montaner (2015) indica que *“todo forma parte de un sistema y todo encaja”*: aun no teniendo necesariamente que ser así, ya que el hecho de buscar una solución global a un problema no conlleva que la solución sea la correcta, buscaremos en esta investigación soluciones desde la propuesta arquitectónica, donde el arquitecto su principal actor, responsable de las decisiones que afectarán al comportamiento energético del edificio.

El arquitecto necesita de herramientas proyectuales precisas para incorporar al proceso de diseño, que le ayuden a conseguir alcanzara las exigencias normativas actuales y futuras sobre eficiencia energética. Estas herramientas deben ser planteadas en conjunto con todas las partes del sistema desde esa visión holística de la arquitectura.

Debemos mirar atrás y aprender del pasado. No todo es nuevo. No todas las soluciones están por proponer. Es posible extraer de la arquitectura moderna, desde los maestros del Movimiento Moderno hasta nuestros días, soluciones válidas para el futuro.

Esta investigación pretende aportar una visión que englobe técnica y arquitectura, que analice cómo optimizar el uso de la energía de los edificios como una parte más del sistema que es la arquitectura. Debemos revisar las experiencias del pasado para extraer soluciones válidas que, aun planteadas en otro marco histórico, social y económico, pueden ayudarnos a encarar el futuro.

A la vista de todo lo expuesto, esta investigación plantea unos aspectos concretos de la arquitectura, los energéticos, en una zona concreta, la costa mediterránea murciana, con una arquitectura planteada para un uso residencial estacional, el turismo estival y en un marco temporal, los años 1960, en los que desarrolló su arquitectura la tercera de arquitectos del Movimiento Moderno en España.

Figura 2.4.3. En las páginas siguientes: esquema temporal que representa el interés científico por las cuestiones energéticas, la evolución de los precios del petróleo y de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y las publicaciones sobre arquitectura y energía y las arquitecturas de la energía. Incluyo en los márgenes superior e inferior las publicaciones propias relacionadas con la cuestión. Elaboración propia

2015 CSCAE ANEXO Nº 19

Aerotermia como alternativa a la contribución solar mínima de ACS
ISSN 2255-0879

2011 CSCAE ANEXO Nº 3

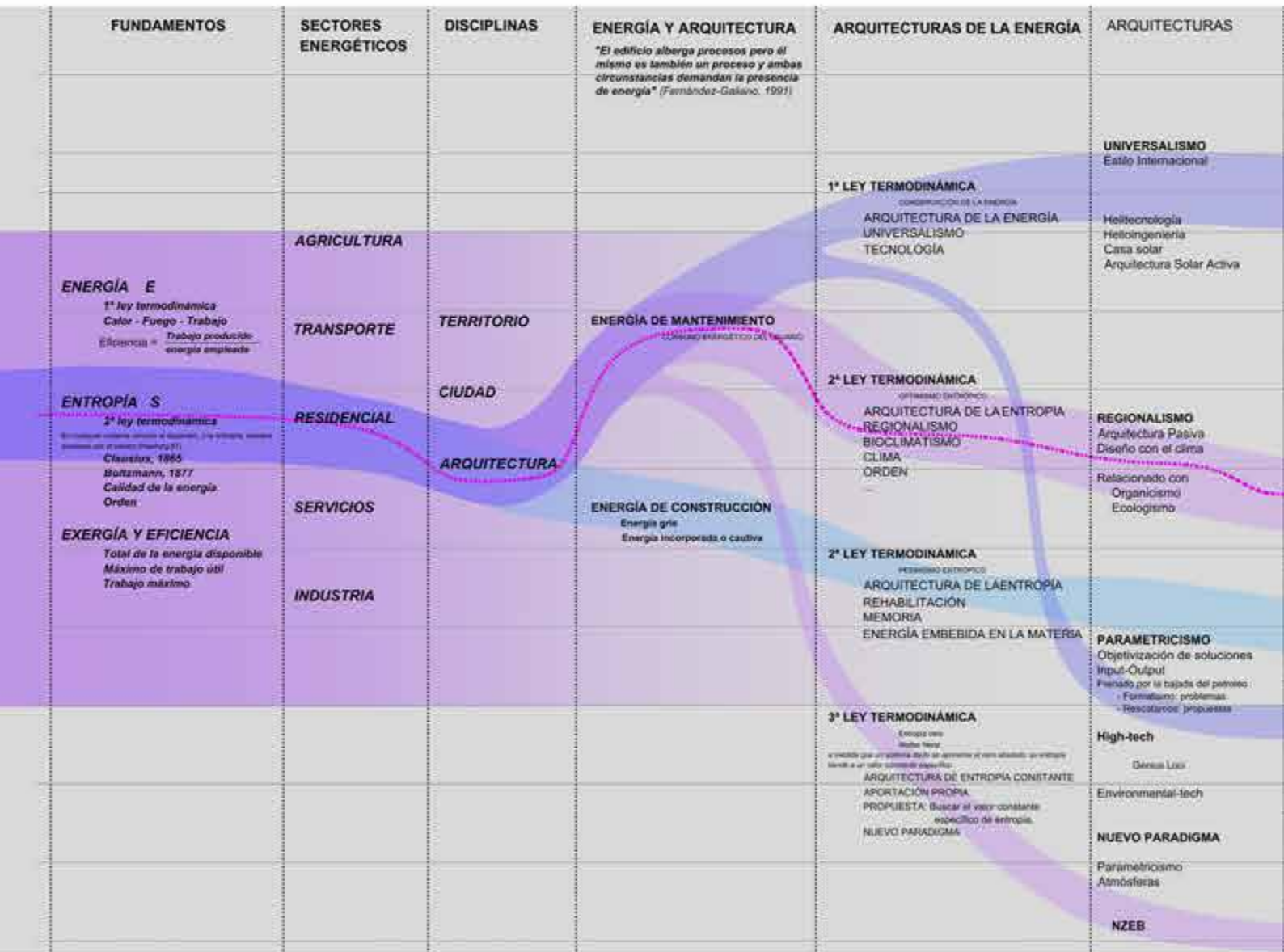
Portales en Edificios de Viviendas
ISSN 2255-0879

2011 CSCAE ANEXO Nº 2

Sala de Máquinas
ISSN 2255-0879

2010 FICHAS 1. Conductos verticales en edificios de viviendas

ISBN 978-84-920285-4-2



2014 CSCAE ANEXO Nº 14

¿Cuánta energía consume su edificio Mr. Foster?
ISSN 2255-0879

2014 CSCAE ANEXO Nº 15

DB HE-13: Intervención en edificios existentes
ISSN 2255-0879

2014 II CONGRESO EDIFICIOS DE ENERGÍA CASI NULA

COMUNICACIÓN PUBLICADA EN PAPEL
Del DB HE-13 al Edificio de Energía casi nula

2011 II Congreso de Arquitectos de la Región de Murcia. Forma, estructura y Modo

PONENCIA: El proyecto Digital

2013 Trabajo Final de Master
Arquitectura y Energía

2013 VIII Congreso Internacional DOCOMOMO IBÉRICO. La arquitectura del Movimiento Moderno y la Educación

COMUNICACIÓN LEÍDA: El "Proyecto de Segunda Enseñanza para Cartagena", de Alzupúa y Aguilaga, bajo una óptica energética contemporánea".

2014 II Congreso Pioneros de la arquitectura Moderna española

COMUNICACIÓN ¿Cuánta energía consume su edificio, Sr. de la Sota? El proyecto de "Bahía Bella" en Murcia de Alejandro de la Sota, bajo una óptica energética contemporánea."

COMUNICACIÓN Las Viviendas "Marale", en La Manga del Mar Menor, de Antonio Bonet Castellana, bajo una óptica energética contemporánea"

2014 IV Congreso nacional de estudiantes de AT e IE

POSTER Arquitectura y Energía: análisis energético con modelos digitales de la arquitectura del Movimiento Moderno

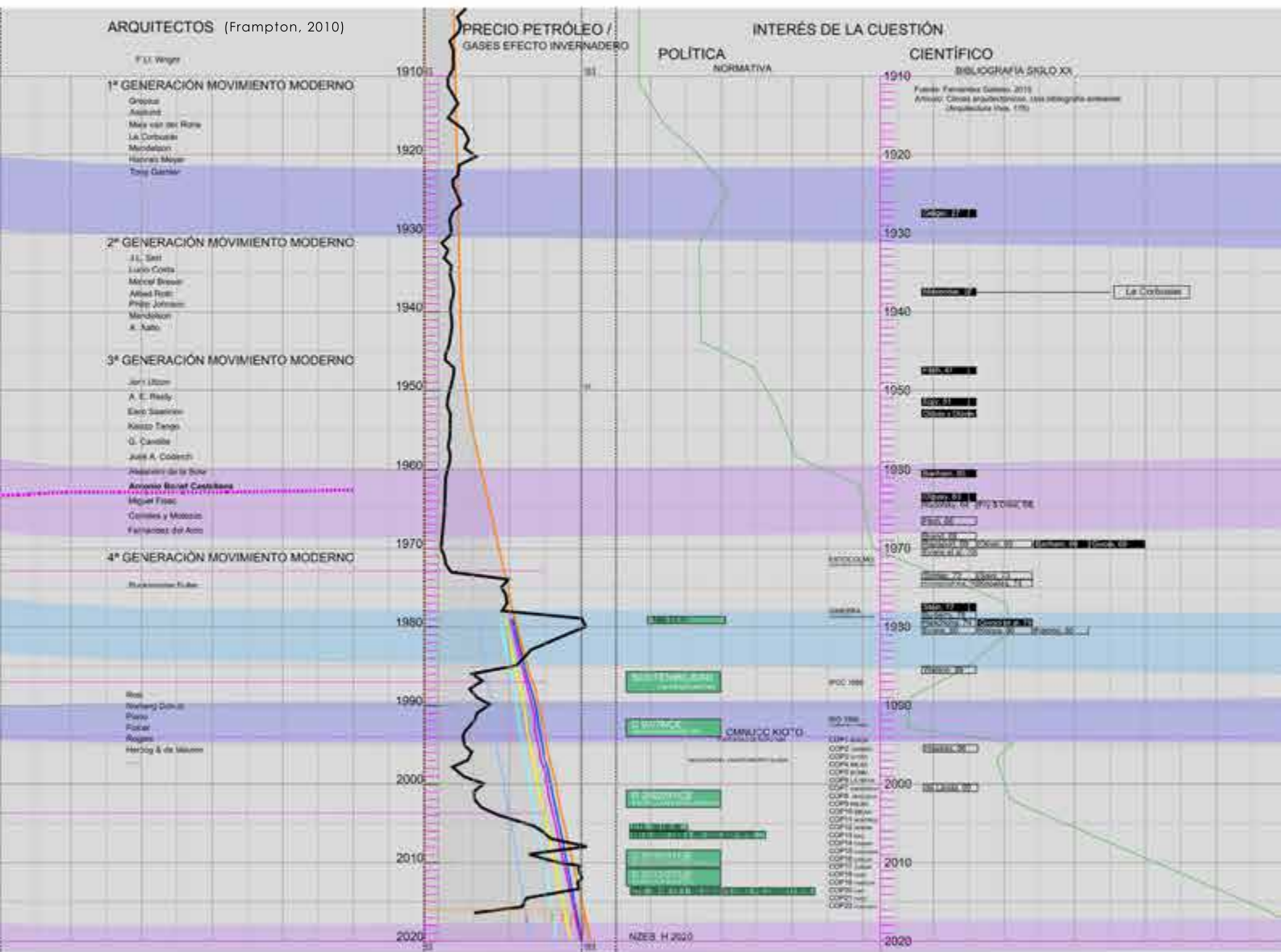




Figura 2.5.1. Participantes en el IV CIAM en Atenas, en 1933. Fuente: Fundación Le Corbusier

2.5. LA TERCERA GENERACIÓN DE ARQUITECTOS DEL MOVIMIENTO MODERNO EN ESPAÑA

Los arquitectos del Movimiento Moderno sentaron las bases de la arquitectura del siglo XX. Utilizaron nuevas técnicas y materiales para una nueva arquitectura. La novedad de sus planteamientos teóricos requería soluciones innovadoras, apoyadas en las tecnologías, que posibilitará el desarrollo de sus propuestas.

Los inicios de la arquitectura del Movimiento Moderno mostraron, aparentemente, una irrelevancia en la relación con el lugar. Sin embargo, las consideraciones térmicas y energéticas han estado presentes entre las inquietudes y planteamientos de los arquitectos más destacados del Movimiento Moderno, proponiendo soluciones válidas para un buen comportamiento energético, adaptadas al lugar.

Josep María Montaner, en su libro *La modernidad superada*, apunta que la cultura organicista de Frank Lloyd Wright y las aportaciones de los arquitectos nórdicos encabezados por Alvar Aalto fueron las que “introdujeron con fuerza definitiva la relación de la arquitectura con el lugar” (Montaner, 2011). De hecho, ya en 1930 el III CIAM incorporó los conocimientos técnicos del asoleamiento a la arquitectura y el urbanismo (fig. 2.5.1).

Los maestros de la denominada segunda generación -Joseph Lluís Sert, Lucio Costa, Marcel Breuer, Alfred Roth, Philip Johnson, Max Bill, Alvar Aalto- plantearon con claridad una crítica a la arquitectura de factura racionalista y a la estética maquinista, pero fueron los arquitectos de la tercera generación, que iniciaron su actividad en la posguerra, allá por los años 50, -Jorn Utzon, A. Eduardo Reidy, Eero Saarinen, Kenzo Tange, Georges Candilis, Jose A. Coderch o Antonio Bonet Castellana- los que se distanciaron definitivamente de los inicios del movimiento moderno y volcaron su interés en la adecuación al entorno natural, las condiciones locales, el clima y el medio ambiente. Se acercaron a la arquitectura vernácula tomando una definitiva y clara conciencia por el lugar.

En los años 20 del siglo pasado, aparece un grupo de jóvenes arquitectos españoles interesados por las nuevas tendencias surgidas en la arquitectura centroeuropea. Muestran interés por temas como el bienestar, la higiene en la vivienda y la democratización de la arquitectura, a la vez que buscan un nuevo

lenguaje para una arquitectura entendida como una actividad capaz de cambiar la vida. Ponen sus ojos en la experiencia de la Bauhaus, en las propuestas de Le Corbusier o en las aportaciones de Mies van der Rohe; mientras tanto en España se extinguía el Modernismo y se seguía un cierto eclecticismo de corte académico.

Las escuelas de arquitectura se mantenían al margen de las nuevas tendencias y los estudiantes solo podían acceder a ellas mediante las revistas y publicaciones extranjeras. Algunos jóvenes arquitectos entran en contacto y colaboran con los maestros de la arquitectura moderna y participan en congresos y encuentros internacionales.

Montaner indica que existió una historiografía en la época que calificó a estos arquitectos vanguardistas como *“héroes míticos que se enfrentaban al enemigo de la decadencia academicista, y se legitimaban los valores de una nueva moralidad con efectos pedagógicos, regeneradores e higienistas”* (Montaner, 2007)

En septiembre de 1930 tiene lugar en San Sebastián una exposición de arte y arquitectura moderna que pone en contacto a todos los arquitectos españoles interesados en este nuevo movimiento; también acuden pintores como Juan Gris o Pablo Picasso y surge la idea de formar un grupo que se denominará GATEPAC (Grupo de Arquitectos y Técnicos Españoles para el Progreso de la Arquitectura Contemporánea) que terminará formalizándose el 26 de octubre en Zaragoza.



Figura 2.5.2. Portada del número 1 de la revista AC, enero-marzo de 1931 (AA.VV., 2005)

La introducción del Movimiento Moderno en España por los arquitectos del GATEPAC nos sirve como punto de partida para el análisis de una arquitectura que cambia radicalmente los planteamientos y postulados vigentes en la época, cuya influencia podemos considerar que llega hasta la actualidad. Baldellou y Capitel (2001) citan los objetivos declarados del GATEPAC, que fueron:

1. Estudiar, por medio de comisiones, temas relacionados con la arquitectura contemporánea.
2. Participar, el grupo o una representación del mismo, en todos los congresos, concursos y exposiciones de España y del extranjero.
3. Organizar conferencias, concursos y exposiciones.
4. Dar publicidad, en la forma más oportuna para cada caso y siempre que se crea conveniente, a los trabajos de los asociados.
5. Redactar una revista (A.C.) que fuera órgano del grupo.
6. Seleccionar y agrupar un conjunto de industriales colaboradores, orientándolos en sus distintas actividades, para conseguir tipos estándar que respondan a sus nuevas ideas.

A principios de 1931 el GATEPAC edita en Barcelona el número 1 de una revista trimestral llamada A.C. (Documentos de Actividad Contemporánea). Se publica regularmente, con las interrupciones impuestas por la Guerra Civil, hasta el 15 de junio de 1937, contando con un total de 25 números, que sirvieron de promoción y divulgación de las nuevas tendencias arquitectónicas. Estos documentos constituyen un rastro del innovador modo de construir de la época, en la que convivían los tradicionales, de estructuras murales, con las nuevas tecnologías del hormigón armado o del acero (Díaz Guirado & Allepuz Pedreño, 2014).

En esos años no se planteaban temas como la sostenibilidad o el consumo energético en los términos que se manejan actualmente, aunque los criterios de ahorro y economía estaban presentes en las propuestas como temas principales, como queda reflejado en las publicaciones de la época.

El primer número de la revista A.C. comienza con unas palabras de presentación que están estructuradas como una declaración de intenciones. Dicha presentación se puede interpretar como un manifiesto sobre el modo de poner en práctica la arquitectura (fig. 2.5.2).

De su lectura extraemos¹:

«Los sistemas arquitectónicos, históricos, no fueron obra de fantasía y de capricho, expresión los caracteres esenciales de una época y de una región; estructura social, procedimientos de construcción, materiales propios, necesidades económicas exigencias espirituales.

Nuestra época se caracteriza por un gran movimiento universal de renovación.

[...] Se conocen nuevos procedimientos y materiales de construcción de uso universal.

Debemos adaptarlos. La estructura de un edificio cambia con los materiales. Las necesidades económicas –LEY DE ECONOMÍA– exigen rapidez sin olvidar la perfección. [...] SERIE»

[...] Adaptar un sistema histórico es falsear el sistema, y negar la época. En las Arquitecturas regionales, producto de las condiciones de clima, costumbres locales y materiales de que se dispone, solo el clima tiene un valor absoluto. Lo esencial subsistirá. Lo episódico, lo accidental, debe desaparecer.

Una división de la arquitectura universal fundándose en las condiciones del clima puede preverse.»

Arquitectura meridional: terrazas, toldos, losas voladas, luz tamizada. Arquitectura Septentrional, grandes superficies vítreas.

[...] Partir de elementos, programa, materiales, espacio luz...desarrollándose racionalmente del interior (función) al exterior (fachada) de una manera simple y constructiva, buscando la belleza en la proporción, en el orden, en el equilibrio. Suprimir la decoración superflua superpuesta [...] Llevar la arquitectura a su medio natural, es decir, al técnico, social y económico...»

Los arquitectos del GATEPAC aúnan el interés por los avances científicos en los aspectos de soleamiento, iluminación natural y acústica aplicada², (fig. 2.5.3) con el estudio de la arquitectura popular mediterránea –como los estudios sobre arquitectura popular ibicenca de Erwin Broner y Richard V. Waldkirch cuyas enseñanzas transfirió al proyecto de 1934 para un establecimiento de baños en la playa de Talamanca y al de 1936 para viviendas en hilera en una playa de Ibiza– como paradigma de una arquitectura adaptada al clima, al paisaje, a la cultural local y a las técnicas constructivas primarias³.

1 A.C. nº 1, página 13

2 Un ejemplo es el artículo “soleamiento de las construcciones”, publicado en el número 8 de la revista AC Documentos de Arquitectura Contemporánea, en 1932

3 En el artículo “Ibiza, Baleares: Las viviendas rurales”, número 21 de A.C., pp. 15-23, de Erwin Broner y Richard v. Waldkirch

Soleamiento de las construcciones

Procedimiento rápido para la determinación de los característicos de iluminación solar (1)

Siendo el sol uno de los más eficaces agentes de higienización y proporcionándonos durante el día luz y calor, interesa a urbanistas y arquitectos tener en cuenta que, el conocimiento de las condiciones de soleamiento de la localidad, será uno de los factores higiénicos más esenciales para orientar y proyectar racionalmente las construcciones.

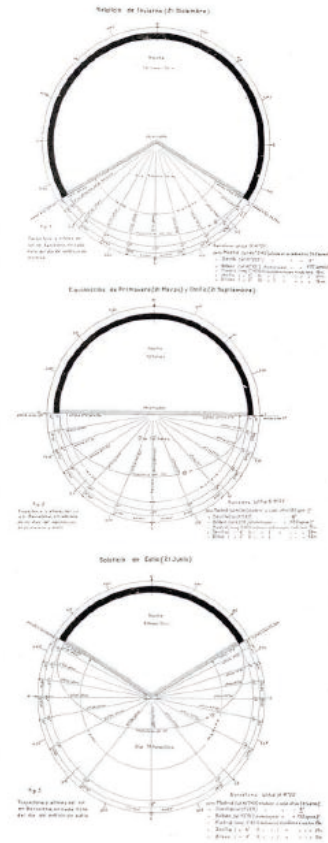
El procedimiento, rápido y sencillo, aplicado para América por Howard T. Fischer y adaptado y completado para Alemania por el profesor W. Körte, de Stuttgart (véase «Moderne Bauformen», noviembre 1932), se funda en los datos astronómicos sobre el movimiento aparente del sol, y es adaptable, como más adelante veremos, a toda localidad de situación geográfica (longitud y latitud) conocida.

Para estudiar el movimiento aparente del sol sobre la esfera celeste, se empieza por suponer al observador en el centro de una circunferencia (horizonte) y mirando al Sur. En la fig. 1 se indican las trayectorias descritas por el sol en los días del solsticio de invierno, el más corto del año (el 21 de diciembre aproximadamente); equinoccio de primavera (21 de marzo aproximadamente), y otoño (el 21 de septiembre aproximadamente), equinoccios en que el sol describe el ecuador celeste; y solsticio de verano, el día de mayor duración (21 de junio aproximadamente). En realidad, puede considerarse como si cada día describiera un círculo paralelo a los anteriores.

Las figs. 1, 2 y 3, están construidas para el meridiano de Greenwich y la latitud de Barcelona, en donde pueden aplicarse sin error sensible. En realidad, la figura está hecha para el caso de que el tiempo solar coincida con el tiempo legal (hora de Greenwich) y, por lo tanto, para el punto del meridiano de Greenwich que tenga la latitud de Barcelona (41° 23'). Correspondiendo una corrección de 4 minutos de tiempo (24 h. : 360°) por cada grado de longitud de diferencia, y siendo aproximadamente 2° longitud E. la situación de Barcelona, pasará el sol por el meridiano de Barcelona 8 minutos antes de la hora oficial (de Greenwich) adoptada para toda España. Para nuestra finalidad podemos prescindir de esta pequeña diferencia de 8 minutos o corregirla como veremos más adelante para otros casos (Sevilla, Madrid, etc., véanse «correcciones»).

Las figuras 1, 2 y 3, son asimismo suficientes para todo el año, ya que, siendo pequeña la variación de declinación del sol en invierno y en verano, pueden considerarse las figuras 1 y 3 aplicables a los meses diciembre y enero la 1, y a junio y julio la 3.

La declinación del sol, varía, por el contrario, muy rápidamente en primavera y otoño, pero como los equinoccios están en el centro de estos períodos de tiempo, puede admitirse la figura 2 como tipo para los demás meses del año.



(1) Los diagramas de las figs. 1, 2 y 3 han sido amablemente cedidos por el Dr. Fontsera, Director del Servicio Met. de Cataluña

Figura 2.5.3. Extracto del artículo “soleamiento de las construcciones”, publicado en la revista AC n°8. Fuente: Biblioteca Nacional (AA.VV., 2005)

La arquitectura de estos años va asociada a nuevas formas de construir que supusieron un gran avance respecto a las técnicas de la época y un desarrollo de la industria de la construcción en España. La revista A.C. es una plataforma de difusión donde se realizan nuevas propuestas, se polemiza y se combate la arquitectura, el arte y la enseñanza “decadentes”.

En los años 50, en un contexto de atraso tecnológico en la España de la posguerra, la revisión crítica del Movimiento Moderno hace a los arquitectos mirar hacia las raíces, buscando una aproximación al lugar, las preexistencias o materiales y sistemas constructivos tradicionales. Los principios modernos se adaptan al lugar y al clima, tomando como inspiración la arquitectura vernácula y unida a una voluntad de innovación.

Durante la segunda mitad del siglo XX llega al litoral mediterráneo el influjo de una nueva industria: el turismo, origen de la presencia en la costa de un nutrido grupo de arquitectos pioneros del Movimiento Moderno en España: Antonio Bonet Castellana, Juan Antonio Corrales y Ramón Vázquez Molezún, Miguel Fisac o Alejandro de la Sota.

En España, es el grupo GATEPAC quien conjuga el interés por los avances científicos en los aspectos de soleamiento, iluminación natural y acústica aplicada , con el estudio de la arquitectura popular mediterránea como paradigma de una arquitectura adaptada al clima, el paisaje, la cultural local y las técnicas constructivas primarias , aproximándose de diferentes maneras al espíritu de los CIAM.

Esta labor es continuada por uno de los miembros más jóvenes de esta agrupación: Antonio Bonet Castellana que, en su etapa argentina, tal y como consta en la publicación Austral⁴, investiga sobre la influencia de las condiciones climáticas locales sobre la nueva arquitectura.

La obra de Bonet Castellana alcanzó muy pronto proyección internacional, siendo el único arquitecto español recogido en el libro de Siegfried Giedion "*A decade of contemporary architecture. 1937*" (Ares Álvarez, 2013): de hecho, Oriol Bohigas dijo que Bonet había hecho «*el sillón más famoso del mundo*», refiriéndose a la silla BKF⁵.

En el litoral mediterráneo se conservan obras proyectadas y construidas por los arquitectos españoles de esta tercera generación: José Antonio Corrales y Ramón Vázquez Molezún, con obras como la casa Caetana, bungalows hacienda dos mares y en La Manga del Mar Menor o el Hotel Galúa, Miguel Fisac, con los apartamentos en la Bahía de Mazarrón, Alejandro de la Sota con el Residencial Bahía-Bella -hoy muy transformado, o Antonio Bonet Castellana, autor del malogrado plan de ordenación de La Manga, conocido como Plan Bonet y de varias obras en los años 60 del siglo XX.

Esta arquitectura, que conjuga los planteamientos del estilo internacional con soluciones vinculadas con una relación con el clima y el lugar, hace que sean de interés para su análisis y estudio desde una óptica energética contemporánea, campo aún por explorar.

4 Revista publicada por el grupo Austral, establecido en Buenos Aires y activo de 1939 a 1943

5 La silla toma el nombre de las iniciales de sus autores: Bonet, Kurchan y Ferrari-Hardoy

La arquitectura de principios del siglo XX, por tanto, inicia un camino que no solo trabaja con los aspectos estructurales y constructivos para generar espacio y luz, sino que se enfrenta a nuevos retos, como los planteados por los movimientos higienistas, en búsqueda de una mejora de las condiciones de vida de las personas en los edificios. La búsqueda del bienestar se inicia en este momento de la historia: no era un tema fundamental en épocas anteriores. Se plantean nuevos objetivos y surgirán nuevos retos.

Para esta nueva arquitectura se dispone de nuevos materiales que aún no están desarrollados ni estudiados teóricamente en profundidad: los cerramientos se insertaban en las estructuras sin conocer o investigar su nuevo comportamiento mecánico (Paricio, 2000). Las estructuras se construyen con hormigón armado y acero -en Europa el hormigón adquiere una gran importancia con los planteamientos de las estructuras Dom-ino con las que Le Corbusier aplica la técnica del hormigón armado de Perret-.

El hormigón armado como material se está utilizando desde hace poco tiempo. No existe normativa de referencia con un desarrollo importante, pero si hay grandes personalidades que lo trabajan y lo experimentan, como el citado Perret en Francia o Eduardo Torroja en España. De hecho, la primera instrucción española aparece en el año 39 pero no es hasta la EH-68 cuando se hace obligatoria

Piel y estructura empiezan una nueva relación. La estructura se separa de la piel y adquiere autonomía. Los edificios modernos se caracterizan por el empleo de sistemas estructurales independientes del cerramiento, es decir, la piel se libera de la función portante, lo que supone una gran innovación, adquiriendo función térmica, acústica y de seguridad.

Los nuevos materiales irrumpen con fuerza buscando su incorporación a la obra de la mano de un nuevo lenguaje plástico, hijo de las vanguardias. Por otro lado, encontramos una búsqueda de sus límites técnicos y prácticos por medio de una aplicación en obra, que resulta extrema y en ocasiones temeraria.

Es el momento en el que se produce la disociación entre sostener y cerrar: la técnica lo posibilita y sus caminos no volverán a converger.



Figura 2.6.1. Los delegados del GATCPAC en Atenas (1933). R. Torres, J.L. Sert, A. Bonet, J. Torres y R. Ribas. Fuente: Blog hasxx_teoría

2.6. ANTONIO BONET CASTELLANA

Antonio Bonet Castellana nació en Barcelona en 1913 e ingresó en la Facultad de Ciencias Exactas y en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona en 1929.

Comenzó a trabajar en el estudio de José Luis Sert y Torres Clavé en 1932, antes de haber terminado los estudios de arquitectura.

Se convirtió en su colaborador de confianza, trabajando en la arquitectura moderna mediterránea que desarrollaba el estudio. Colaboró en el Plan Maciá de Barcelona que Sert y Torres Clavé realizaron en colaboración con Le Corbusier. Ingresó en el GATCPAC, versión catalana del GATEPAC en 1933 y asistió al CIAM IV a bordo del *Patris II* (fig. 2.6.1).

Según Oriol Bohigas “...en aquel momento el único estudiante que colaboraba y que intervenía en estos grupos de vanguardia era Antonio Bonet [...] A los veinte años, estudiante todavía, Bonet asiste al III CIAM (sic)¹, el congreso más importante en la historia de la arquitectura moderna: a bordo del “*Patris II*”, en pleno Mediterráneo, hombres como Le Corbusier, Aalto, Sert, Van Esteren y Terragni, firman la carta de Atenas, piedra fundamental del urbanismo moderno.” (Álvarez y Roig, 1999).

Termina sus estudios de arquitectura en 1936 y se marcha de España antes del comienzo de la guerra civil, en el 36, llegando a París para trabajar con Le Corbusier hasta 1938.

Allí conoció a los arquitectos argentinos Jorge Ferrari Hardoy y Juan Kurchan -con quienes diseñó el famoso sillón BKF, iniciales de los tres arquitectos-. Ese mismo año de 1938 partió hacia Buenos Aires, donde trabajó hasta su regreso a España, en 1958.

De su etapa en Argentina y Uruguay son sus publicaciones en la revista *Austral*, donde podemos apreciar su interés por la prefabricación y por la relación de la arquitectura con el clima.

Este interés se pone de manifiesto en sus planteamientos que sirven de base para la redacción de anteproyectos para viviendas rurales en Argentina, en

1 Se trató del IV CIAM, celebrado en 1933 en la ruta Marsella-Atenas- Marsella

los que plantea distintas soluciones en función de su latitud y clima (fig. 2.6.3), considerando tanto la incidencia del sol a través del estudio de las cartas solares como los vientos dominantes de la zona, para aplicarlos como punto de partida para solucionar la vivienda.

En el número uno de la revista Austral se publica un manifiesto denominado "voluntad y acción"(fig. 2.6.2) , articulado en once puntos por medio de los cuales se establecen los presupuestos ideológicos y artísticos que aglutinan a los fundadores en torno a esta publicación. Está suscrita por el propio Bonet, Ferrari-Hardoy y Kurchan.

En el manifiesto critica las escuelas de arquitectura, que denomina "almacenes de estilos, divorciados en absoluto de la realidad arquitectónica" y expone lo complejo del problema arquitectónico de la época, que aleja al arquitecto "de lo humano individual y de lo social colectivo". Por último plantea que el panorama de la arquitectura actual establece normas y sistemas que son "la antítesis del espíritu de lucha de los maestros, como Lloyd Wright, Gaudí, Eiffel, Perret, Le Corbusier..."



Figura 2.6.2. Reproducción del manifiesto "Voluntad y acción", contenido en el número 1 de la revista Austral. Grupo Austral, publicación de ocho páginas editadas en la separata de la revista Nuestra Arquitectura nº 6, del mes de junio de 1939, Buenos Aires.

En el segundo número se publica un extracto de los estatutos del grupo y podemos observar como las firmas que lo respaldan ha aumentado considerablemente.

En el interior de la revista encontramos un estudio sobre las propuestas de desarrollo de un modelo de vivienda rural para todo el territorio de Argentina comentandas anteriormente. Junto a este estudio aparece otro semejante realizado por Le Corbusier y Jeanneret para Francia, que utilizan de respaldo intelectual y modelo. La línea estructurante del trabajo consiste en la identificación de diferentes zonas climáticas, en función de las cuales se establece como correlato un tipo edificatorio específico para dichas condiciones.

Los factores climáticos analizados son el soleamiento y el régimen de vientos intensidad –dirección e intensidad–. Se fijan cuatro zonas climáticas para Argentina: cálida, templada norte, templada sur –norte y sur austral– y fría; a los que se asignan respectivamente los siguientes tipos edificatorios: casa sobre pilotis con búsqueda de vientos frescos y zona sombreadas, la casa patio, otra versión de la casa patio y la casa concentrada.

A partir de la construcción de la Ricarda (1957, fig. 3.2.2), comienza a viajar cada vez más a España hasta que se establece en Madrid en 1963.

A su regreso a España, lo aprendido en América será puesto en práctica en su obra construida en la costa mediterránea.

Desarrolló parte de su trabajo en la Manga del Mar Menor, donde en los años 60 plantea su plan de ordenación -*el Plan Bonet*- y, entre los años 1965 y 1967, construye tres conjuntos residenciales: el *Conjunto Hexagonal*, los *apartamentos Maralet* y el *edificio escalonado Babilonia*.

También proyectó el Club Náutico, actualmente *Club Dos Mares*, los apartamentos *Atamaría* y la desaparecida *Casa Rubio*.

En el número uno de la revista "*Arquitectura*", editada por el Colegio de Arquitectos de la Región de Murcia, Atxu Amann y Andrés Cánovas publican un artículo llamado "*Monólogos*" donde, hablando de los arquitectos Bonet Castellana, Corrales y Molezún, Alejandro de la Sota y Miguel Fisac, y en referencia a sus trabajos de la década de los sesenta en la costa murciana, escriben:

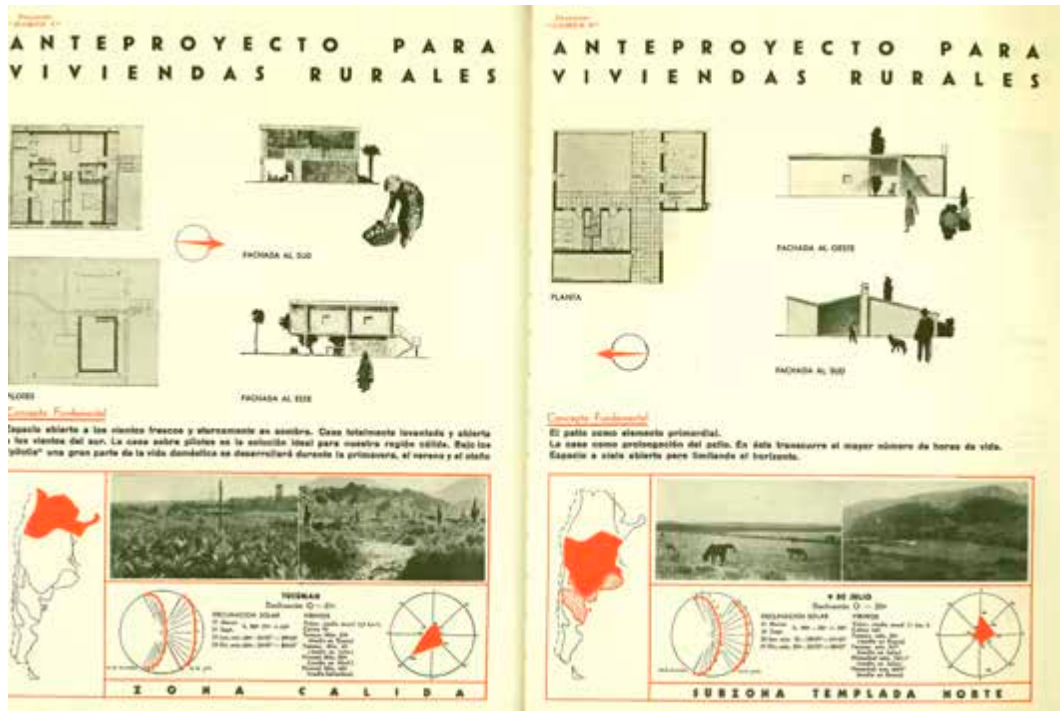


Figura 2.6.3. Artículo publicado en la revista Austral nº 2. Fuente: publicado en el libro "Bonet Castellana" de Fernando Álvarez y Jordi Roig (Álvarez y Roig, 1996)

«...ocultan entre la desidia y la vulgaridad del caótico y desmembrado litoral murciano, otras espléndidas y menos conocidas obras»

Amann & Cánovas, 1997

En la arquitectura de Bonet Castellana apreciamos una posición activa en sus propuestas, buscando aprovechar los recursos naturales ofrecidos por la condición climática del lugar, unida a la tecnológica, que se plasma en una definición tipológica específica. Además, se interesa por el uso de herramientas arquitectónicas tendentes a mejorar o mitigar en lo posible los rigores climáticos propios de las características naturales de cada clima. Lo hace por medio del uso de prótesis, mecanismos o añadidos sobre los huecos y sus vidrios que mejoran la protección solar.

Bonet incorpora a su arquitectura elementos de protección solar que pasan a formar parte del acervo característico o repertorio formal del lenguaje moderno, tomado de las soluciones típicas de las construcciones mediterráneas.

En el *Conjunto Hexagonal*, por ejemplo, la protección solar se une a la seguridad, con mallorquinas de eje horizontal diseñadas conjuntamente con las barandillas. La movilidad de las protecciones solares permite un óptimo aprovechamiento solar, haciendo partícipe al habitante, que buscará vistas, sombra o soleamiento.

En los *Apartamentos Maralet*, los grandes huecos de la zona de día con orientación poniente o levante pudieron ser proyectados con protecciones solares similares a las del conjunto hexagonal –parecen estar planteadas en los dibujos originales de proyecto– aunque no han llegado hasta nuestros días.

Por la calidad de la obra construida de Antonio Bonet Castellana y su interés por la relación entre la arquitectura y el clima, decidimos abordar la investigación propuesta tomando como modelos tres conjuntos residenciales que construyó en la costa murciana.

III. PLAN DE INVESTIGACIÓN

“Este libro quiere demostrar la influencia del clima en los criterios constructivos. Hasta el momento, la arquitectura se ha guiado por un subjetivo proceso de ensayo y error; evidenciándose la necesidad de adoptar técnicas de análisis razonado para madurar adecuadamente en este sentido”

Victor Olgyay, 1963 ¹

1 Cita del prólogo de la obra de Victor Olgyay, *Design with climate*. Op. Cit. Olgyay 2002

III. PLAN DE INVESTIGACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN AL PLAN DE INVESTIGACIÓN Y ALCANCE

Nos proponemos realizar un estudio que evalúe la influencia de parámetros relacionados con la construcción y materialidad -que denominamos matéricos- en la demanda energética de los edificios, para poder extraer criterios heurísticos de diseño arquitectónico de alta eficiencia energética.

Para ello seleccionamos un conjunto de edificios proyectados por un mismo arquitecto y ubicados en la misma zona climática.

Trazamos previamente un plan de investigación. Exponemos en esta introducción las consideraciones previas y el alcance de la investigación, que se desarrollará en cada apartado:

Respecto a la elección de los edificios

Seleccionaremos obras construidas en los años 60 por el arquitecto Antonio Bonet Castellana en La Manga del Mar Menor, zona turística de segunda residencia de la Región de Murcia (fig. 5.1.1).

Establecemos el interés de estas obras, por ser piezas proyectadas por un arquitecto de la tercera generación del Movimiento Moderno, que mostró en sus propuestas y escritos un interés por cuestiones que relacionan arquitectura y clima. Nos permitirá evaluar los edificios y comprobar si su comportamiento energético es o no adecuado para el fin al que fueron destinados.

Es relevante que el uso para el que fueron proyectadas es marcadamente estacional, siendo viviendas de segunda residencia principalmente para el verano. Estudiaremos el comportamiento estacional y anual de los edificios.

Este trabajo también pretende documentar las obras, redibujando los edificios a partir de las fuentes disponibles. En las publicaciones relacionadas con los mismos encontramos siempre la misma documentación gráfica que define parcialmente los edificios. La completaremos y ampliaremos, acudiendo tanto a los proyectos originales como a los edificios construidos.

Sobre la situación y la época de construcción

Seleccionamos la zona climática B3, definida como propone el Código Técnico de la Edificación. Daremos como buenos estos datos climáticos, sabiendo que hay autores que discuten la corrección de los mismos, pues consideran que es una simplificación que agrupa una zona muy amplia con factores climáticos que no coinciden. Con esta consideración, los datos corresponden a una zona con un invierno suave y un verano caluroso.

El interés de la época de construcción de los edificios es doble: por un lado son edificios muy poco aislados térmicamente, lo que nos permitirá evaluar su comportamiento energético con herramientas actuales. Por otro lado, son edificios en los que se está interviniendo (o se intervendrá) para su rehabilitación, ya que han pasado más de cincuenta años desde su finalización. El criterio del arquitecto para intervenir en ellos deberá garantizar los valores de la arquitectura moderna que encierran, por lo que será de interés conocer previamente las variables más influyentes que, a la vez, resulten compatibles con el buen hacer de la intervención en nuestro patrimonio arquitectónico.

Respecto a la evaluación energética

La demanda energética de un edificio es la energía útil necesaria que tendrían que proporcionar los sistemas técnicos para mantener en el interior del edificio unas condiciones definidas reglamentariamente (Ministerio de Fomento, 2013)

Decidimos evaluar el comportamiento energético de los edificios a través de los resultados de *demanda energética*. Nos centramos en este aspecto, frente a otros como el *consumo energético* o las *emisiones de gases de efecto invernadero*, para analizar los aspectos directamente relacionados con el diseño arquitectónico. Dejamos al margen la evaluación de sus instalaciones de acondicionamiento, que sería objeto de otra investigación: no consideramos, por tanto, todo lo relacionado con los rendimientos de sus instalaciones de confort térmico, consumos derivados de su iluminación artificial o consumos de agua caliente sanitaria entre otros.

Nos centramos, por consiguiente, en la influencia de la propuesta arquitectónica en el comportamiento energético y es la *demanda* el indicador idóneo para nuestro fin.

Para su evaluación seleccionamos la *Herramienta Unificada LIDER-CALENER*. Es la aplicación informática de simulación energética aportada por el Ministerio de Fomento para la justificación de las exigencias normativas del Código Técnico de la Edificación. Existen otras aplicaciones, como hemos indicado en la revisión bibliográfica, que pueden aportar distintos aspectos de interés (como Energy Plus, Trnsys) pero optamos por ésta por su amplia implantación como herramienta oficial que calcula de modo sencillo la demanda energética.

Además, este autor ha formado parte del Grupo de Trabajo de la Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo del Ministerio de Fomento, durante la fase de pruebas de la versión Beta de esta nueva herramienta, en el año 2014, lo que le da un profundo conocimiento de su funcionamiento.

Respecto a la selección de los parámetros

Seleccionaremos ciertos parámetros que influyen en el comportamiento energético de los edificios durante todas las épocas del año, que serán objeto de estudio. Para ello optamos principalmente por aquellos que forman parte de la definición constructiva de la envolvente con influencia sobre la demanda energética. Los definimos tras realizar una revisión de bibliografía seleccionada. Su desarrollo está en el punto 3.2.

Pretendemos fijar aspectos relacionados con los principios fundamentales de la arquitectura del Movimiento Moderno, presentes en las propuestas de Bonet Castellana.

Respecto al método y a la obtención de resultados

Analizaremos los edificios seleccionados mediante simulación energética, con la herramienta informática seleccionada.

Realizaremos análisis paramétrico de sensibilidad energética de los edificios estudiados, construyendo modelos digitales basados en el diseño arquitectónico original. Modificamos los parámetros que vamos a estudiar para evaluar su acción individual y combinada. Para esto utilizamos el *Método de Cadenas de Markov Monte Carlo (Markof-chain Monte Carlo)*. Es un método ampliamente utilizado en investigaciones científicas relacionadas y apto para evaluaciones de análisis de sensibilidad.

Se realizarán unas 20.417 variaciones (casos) por cada uno de los edificios y se analizarán datos de demanda energética mensual. El total de casos supera los 81.000 y los resultados se acercan al millón.

Necesitamos aportar a la investigación una aplicación informática que automatice los cambios, realice las simulaciones y almacene los resultados, dada la complejidad y duración de las simulaciones. Está descrita en el apartado 3.4 de este plan de investigación.

El modelizado digital de los edificios permite realizar todas las variaciones planteadas al edificio y observar como cambia su comportamiento energético, para así poder establecer la influencia de modo individual y combinada de cada parámetro.

Respecto al análisis estadístico

Una vez obtenidos los datos, realizaremos un análisis estadístico de los resultados y plantearemos los criterios heurísticos de optimización métrica de edificios de alta eficiencia energética, considerando su influencia en un periodo anual y estacional.

Para el análisis trabajamos con el programa *R*. El desarrollo de este aspecto queda en el apartado 3.5. Procedimiento.

Respecto a los criterios de optimización

Establecemos unos criterios generales de optimización basados en la racionalidad constructiva para plantear y evaluar las soluciones que reducen la demanda energética del edificio con soluciones sencillas y a disposición del arquitecto.

Quedan fuera del alcance de esta investigación análisis económicos de casos concretos, como estudios de amortización, ciclos de vida o incluso sostenibilidad social, que dependen de la coyuntura económica del momento.

Buscamos redactar criterios que ayuden en la toma de decisión del arquitecto, que debe manejar un gran número de variables al proyectar arquitectura.

Quedan definidos en el apartado 3.3. Criterios de Optimización.

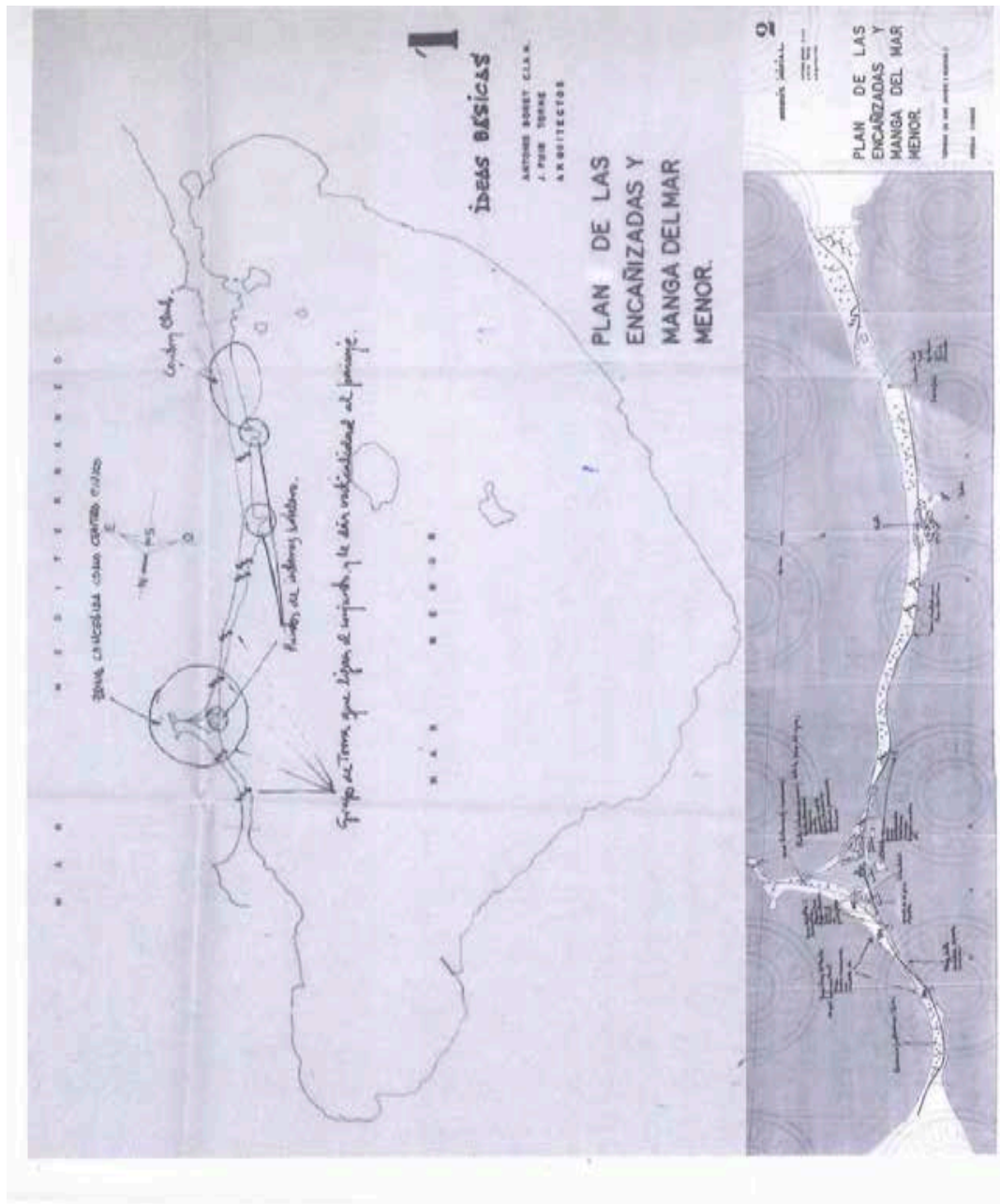
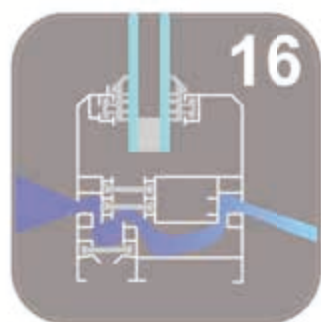
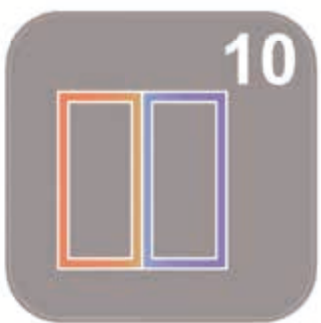
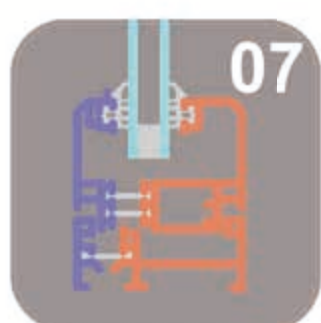


Figura 5.1.1. Plan las encañizadas y Manga del Mar Menor. Ideas básicas (1962). Arquitectos: Antonio Bonet Castellana y Josep Puig Torné. Fuente: Fundación DOCOMOMO Ibérico



3.2. PARÁMETROS MATÉRICOS SELECCIONADOS QUE INFLUYEN EN LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LOS EDIFICIOS

“El material es máscara y materia. Al rechazar la figuración historicista del eclecticismo finisecular como una forma fingida de estirpe escenográfica, la modernidad otorgó una dimensión ética a la verdad estética del material desnudo, por más que muchas veces emboscado en la ficción abstracta de la blancura clínica o la transparencia metafórica.”

Fernández-Galiano, 2005

“Hacer arquitectura moderna no significa utilizar nuevos materiales inmaduros; lo más importante es perfeccionar los materiales en una dirección más humana”

Alvar Aalto

El material es revestimiento y envoltura, en palabras de Luis Fernández-Galiano, *“piel además de músculo o de hueso, y máscara incluso si se entiende como protección o velamiento de la identidad testaruda de la construcción esencial”*.

Ignacio Paricio, en su última clase a la que llamó *“sostenibilidad y sensualidad en una arquitectura de vidrio”*, indica que la arquitectura no solo debe resolver exigencias elementales sino crear un ambiente de confort y sensualidad. *“La modernidad se ha ocupado, sobre todo, de la forma y no tanto de las sugerencias mentales y emocionales de la materia”* (Pallasmaa, citado por Paricio, 2014).

El profesor Aparicio Guisando (2000) escribe en su libro *“El muro”* que los materiales se transforman en materia en un muro gracias a la idea. La idea se hace arquitectura gracias a la materia. Cuando idea y materia entran en sintonía en un muro, en sus ausencias o relaciones, comienza la emoción del hombre que habita es espacio. A comienzos del siglo XX las funciones del muro se especializan -el muro se desdobra -gracias al desarrollo de la tecnología constructiva-: cerrar, soportar, iluminar, ventilar, proteger o mirar.

Piel y estructura iniciaron una nueva relación. La estructura se separa de la fachada y adquiere autonomía. Soportes puntuales liberan planta, modifican el diseño de huecos y separan los edificios del suelo. La arquitectura moderna se caracteriza por el empleo de sistemas estructurales independientes del cerramiento: la piel se libera de la función portante, lo que supone una gran innovación.



Figura 3.2.1 "El cuarto de baño" (1966). Antonio López



Figura 3.2.2 "Grande cretto nero" (1977) Alberto Burri (Cittá di Castelo, Italia, 1915, Niza, 1995), pintor perteneciente a la corriente del informalismo matérico

Los nuevos materiales irrumpen con fuerza como parte de un nuevo lenguaje. Los arquitectos del Movimiento Moderno exploran sus límites para construir las nuevas propuestas arquitectónicas.

“En primer lugar me refiero a la sustancia en el sentido material y, sin embargo, el término materia significa para mí algo más, pues ennoblece también la actividad puramente material transformándola en un proceso espiritual. La cultura humana se fundamenta esencialmente en la materia. Incluso opino que esta maravillosa palabra, ‘materia’, es finalmente la que une aquellas tres ramas del arte, arquitectura, pintura y escultura.”

Alvar Aalto, 1970¹

Giovanni Testori² escribe sobre la obra de Antonio López (fig. 3.2.1):

“Aquel amor y aquella identificación de su pintura con las incrustaciones de líquenes, con el polvo, los mohos y las devastaciones salítricas de los muros, con su agrietarse, abrirse y caer lentamente a los pies de una tierra desolada, amor e identificación que se observan también técnicamente en sus primeras obras, no sólo la atalaya de un procedimiento técnico, sino la clave de un procedimiento poético, es más, de una poética iniciación.”

Utilizamos el término *matérico* como un concepto que engloba la condición formal de la arquitectura en referencia a los efectos plásticos que se consiguen en una obra de arte con el material utilizado. Son referencia del arte matérico Antoni Tapies o Alberto Burri (fig. 3.2.2). No es solo definición material o materialidad en su acepción constructiva, sino que forma parte de la propuesta arquitectónica.

El arquitecto necesita conocer con precisión los aspectos que influyen en el comportamiento energético y para ello es necesario su cuantificación. El alto grado de exigencia nos lleva a tener que controlar todas las variables posibles a la hora de proyectar un edificio. La situación se vuelve más compleja en rehabilitación, donde habrá condicionantes -relacionados también con la propia propuesta arquitectónica- que limiten las posibilidades de acción. ¿Cómo condicionan las actuales exigencias normativas de eficiencia energética al arquitecto en la decisión sobre el material con el que construir el edificio?.

La ciencia aplicada a la arquitectura nos permite conocer y predecir comportamientos. La física aplicada es una herramienta fundamental: Domenech i Montaner, ya en el año 1877, fue profesor de una asignatura denominada aplicaciones de las ciencias físico-químicas a la arquitectura.

1 Conversación con Karl Fleig, 1970 (Fleig, 2010)

2 Giovanni Testori (1977 citado por da Graça Osório, 2001)

Podemos agrupar los parámetros que influyen en la demanda energética de los edificios en tres categorías generales: (i) clima y entorno, (ii) condiciones matéricas y (iii) condiciones de diseño del edificio.

Los primeros son los relacionados con el clima: la zona climática de invierno y verano, la orientación, obstáculos, reflexión del entorno, etc.

Los segundos, los parámetros matéricos, determinan el diseño constructivo del edificio y están relacionados con la tecnología.

El resto de parámetros dependerán del diseño del edificio: composición, geometría, compacidad, proporción, altura, relación o disposición de partes opacas y huecos, entre otras.

Centrándonos en los parámetros que denominamos matéricos, hemos seleccionado aquellos que definen la materialidad de un edificio y que muestran influencia sobre su comportamiento energético.

En termodinámica, se definen dos formas de energía: el *trabajo* y el *calor*. Se denominan transitorias dado que existen solo cuando se produce un intercambio energético entre dos sistemas. El trabajo existe cuando se produce transferencia de masas. Cuando media una diferencia de temperatura, a la transferencia la denominamos calor (Neila González & Bedoya Frutos, 1997). Trabajaremos con esta última acepción de energía, la relacionada con el calor, que se produce mediante tres mecanismos -que suelen darse de un modo combinado-: la conducción, la convección y la radiación.

Organizamos los parámetros en tres grupos, en función de estos tres mecanismos de transferencia de la energía, añadiendo un cuarto grupo relacionado con la inercia térmica:

1- Conducción: parámetros influyentes en el intercambio térmico por transmisión con el entorno. Se produce por intercambio de energía cinética entre las moléculas en contacto.

2- Radiación: parámetros relacionados con la incidencia de la radiación solar en el edificio: de la energía solar -radiante- incidente en un edificio, parte se pierde, debido a sus características superficiales y parte lo calienta, provocando distintos efectos según la época del año.

3- Convección: parámetros relacionados con los movimientos de masas de aire en los edificios, tanto ventilación controlada como accidental.

4- Inercia térmica: relacionado con la masa térmica de los elementos de la envolvente: la inercia térmica representa la dificultad de un cuerpo a cambiar su temperatura: es la masa térmica relaciona densidad, volumen y calor específico del material.

El listado de parámetros es el siguiente:

a. Conducción: Transmitancia térmica de la envolvente

- Cubiertas
- Suelos
- Fachadas opacas
- Huecos: Vidrios
- Huecos: Marcos

b. Radiación

- Absortancia de la Cubiertas
- Absortancia Fachadas opacas
- Absortancia Huecos: Marcos
- Factor solar del vidrio g (influye todo el año)
- Factor de sombra de los huecos en verano

c. Inercia térmica

- Masa de la fachada
- Masa de la cubierta y suelos

d. Convección

- Renovación de aire o ventilación
- Infiltraciones de aire por huecos

Para la investigación, incorporamos dos parámetros relacionados con el entorno, con el fin de estudiar su influencia y relación con el resto: la orientación del edificio y la altitud a la que está la parcela.

La zona climática donde están los casos de estudio de esta investigación es la B3, correspondiente a la definida por el Código Técnico de la Edificación. A continuación, procedemos a detallar cada uno de los parámetros considerados.

3.2.1. Clima y entorno

La investigación se centra en una zona climática concreta: el litoral mediterráneo de la Región de Murcia. La base de datos climáticos considerada es la que propone la normativa sobre ahorro energético en España, el Código Técnico de la Edificación, en su documento básico de ahorro de energía.

Los datos meteorológicos están disponibles en formato *.MET* en la web del Código Técnico de la Edificación (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2015) y la descripción de los climas de referencia, en el documento descriptivo correspondiente (Ministerio de Fomento, 2015).

El clima de referencia define las solicitaciones exteriores de cálculo para un año tipo a través de una serie de parámetros, como la temperatura, humedad relativa o la radiación solar, y que se consideran representativos para una zona climática.



Figura 3.2.3 Antonio Bonet, en La Ricarda (1953) establece ya una relación doble con lo moderno y lo vernáculo usando la bóveda tradicional catalana con una secuencia de espacios abiertos y cerrados (Tostoes, 2014). La Ricarda. Antonio Bonet Castellana. 1953. Fuente blog Hit et Nunc (AA.VV, 2016)

El CTE considera ocho meses del año como periodo de calefacción -invierno- (de octubre a mayo) y cuatro de refrigeración -verano- (de junio a septiembre).

El DB HE define *severidad climática* como el cociente entre la demanda energética de un edificio en una localidad y la correspondiente al mismo edificio en una localidad de referencia, que para el CTE es Madrid. La severidad climática de Madrid, por tanto, corresponde a la unidad. Se definen severidad climática de invierno -SCI-, identificada mediante una letra de la A a la E (más el α especialmente definido para zonas situadas en las islas canarias), y de verano (SCV) -identificada con un número, del 1 al 4.

Los climas de referencia con la letra A corresponden con inviernos más suaves y los denominados E con inviernos más extremos. Del mismo modo, los climas de referencia con los números 1 corresponden a veranos más suaves y los denominados con el 4 a veranos más calurosos.

En nuestra investigación la zona climática se denomina como B3 -invierno B ($0.23 < SCI \leq 0.5$) y verano 3 ($0.83 < SCV \leq 1.38$) -. Este parámetro lo consideramos fijo.

Las variables consideradas en esta categoría son las relacionadas con el entorno y el posicionamiento del edificio.

a) Orientación. Parámetro P01

La radiación solar es un factor fundamental dentro de las combinaciones de elementos, parámetros y factores que determina un clima. De hecho, clima proviene del griego *Klima* que quiere decir inclinación, referencia directa de la incidencia solar (Acha Román, et al., 2013).

La orientación del edificio tiene un gran impacto en los resultados de simulación energética de los edificios. Autores, como los coreanos Donjun Su & Seongju (2014) -que realiza un análisis de sensibilidad energética en edificios de apartamentos en Corea-, otorgan una variación máxima del consumo energético de un 36,78% de una orientación a otra, siendo la mejor situada el Sur y la peor el Noroeste. La sitúa en primer lugar en el ranking de factor de peso para el consumo energético en calefacción, no evaluando el comportamiento en verano. La orientación del edificio tiene una importante influencia en la demanda energética, que cuantificaremos en esta investigación.

Por otro lado, el arquitecto Antonio Bonet Castellana y, en general, los arquitectos de la época seleccionada para la investigación, han mostrado un gran interés en destacar la importancia del soleamiento en la arquitectura y el urbanismo, como hemos descrito en capítulos anteriores. La posición del edificio, determinada por su orientación y situación se combina con las soluciones arquitectónicas que componen un edificio, como la incorporación de protecciones solares en verano o la búsqueda de la radiación solar en invierno.

El planteamiento urbanístico determina en gran medida la posición de los edificios. Bonet Castellana, al realizar el plan de ordenación de La Manga del Mar Menor, pudo posicionarse ante una solución urbanística concreta (fig. 3.2.4).

El factor climático solo es uno de los tenidos en cuenta para el planteamiento propuesto por el arquitecto, pero sin duda tuvo relevancia. Otros, como las vistas, la relación con los dos mares o los vientos dominantes son, probablemente los que tuvieron más peso dada la singularidad del lugar.



Figura 3.2.4 Maqueta del Plan de ordenación de La Manga del Mar Menor. 1962

b) Altitud

Consideramos la altitud correspondiente a la zona climática B3 seleccionada. Según el CTE, en la Región de Murcia es zona B3 todo lugar con altitud entre 0 y 100 metros.

Incluimos en el estudio este parámetro para evaluar la influencia global del mismo a la hora de descartar o considerar su importancia. La altitud influye, por ejemplo, en la densidad del aire que rodea y ventila el edificio y tendrá influencia en el gasto másico (o caudal másico), que será determinante para evaluar la demanda energética correspondiente a modificar las condiciones energéticas del aire a climatizar.

3.2.2. Condición matéricas del edificio

La construcción del edificio determina en gran medida su comportamiento energético. Ya hemos analizado la tecnología constructiva de la época en la que se realizaron los edificios objeto de la investigación.

El primer grupo de parámetros es el relacionado con la conducción de energía. Sabemos que los aspectos relacionados con la transmisión energética de la envolvente, como es la transmitancia térmica, influyen decisivamente y de un modo directo cuando las condiciones de temperatura exterior del edificio están muy alejadas de las interiores de confort: en invierno, con temperaturas bajas, un mayor grado de aislamiento térmico de la envolvente –o lo que es lo mismo, una transmitancia térmica baja- provoca una disminución de las pérdidas energéticas por transmisión y la consecuente reducción de la demanda energética. La relación no es tan inmediata en meses de verano, y mucho menos en primavera y otoño, ya que la temperatura exterior no queda muy lejos de la de confort considerada y es previsible una menor sensibilidad al aumento del aislamiento térmico.

La transmitancia térmica U de un cerramiento es la inversa de su resistencia térmica R ($U=1/\Sigma R$), función del tipo $1/x$ por lo que el aumento del espesor del aislamiento en un cerramiento produce un descenso asintótico en el valor cero. Los primeros centímetros de aislamiento son los que producen un descenso mayor, siendo menos eficaces cuanto mayor es el espesor total de la capa de aislamiento (fig. 3.2.5.) (Díaz Guirado & Cayuela Díaz, 2014).

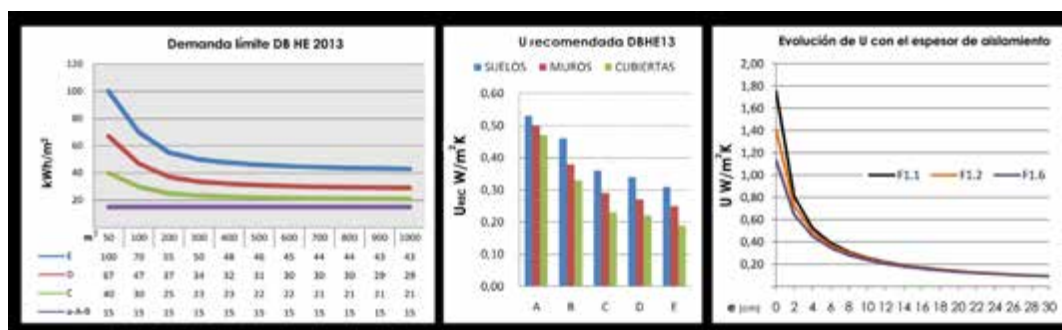


Figura 3.2.5 a- Demanda límite calefacción según superficie por zonas climáticas b- U recomendada (DBHE-13) c- Relación U/espesor aislante para tres tipos de fachada (Díaz Guirado & Cayuela Díaz, 2014)

Este grupo de parámetros tiene una posibilidad de aplicación a la intervención en edificios existentes. En rehabilitación podemos actuar sobre la envolvente para reducir la transmisión de energía. Su disposición tendrá las limitaciones propias que imponga el edificio.

Las pérdidas en calefacción o ganancias en refrigeración son directamente proporcionales al valor de U de los elementos constructivos de la envolvente. Pero no actúan de un modo aislado: fachadas y cubiertas, irradiadas por el sol, verán modificada su temperatura superficial y esto tendrá consecuencias sobre el total del balance energético. La *temperatura sol-aire* es una variable que relaciona ambos parámetros.

De los parámetros seleccionados, los relacionados con la conducción son:

- Espesor del aislamiento térmico de la cubierta. Parámetro P03
- Espesor del aislamiento térmico del suelo. Parámetro P04
- Espesor del aislamiento térmico del cerramiento opaco de la fachada. Parámetro P05
- Transmitancia térmica U del vidrio. Parámetro P06
- Transmitancia térmica U del marco. Parámetro P07
- Transmitancia térmica lineal en los puentes térmicos: Parámetro P17

c) P03. Espesor de la capa de aislamiento térmico de la cubierta

Proponemos la situación real del edificio como caso inicial. En los cerramientos opacos de los edificios utilizados como modelo no se disponen capas específicas de aislamiento térmico, así que serán el caso con mayor valor de U de todos los probados.

Las cubiertas serán inclinadas o planas según el edificio de partida. La *Transmitancia térmica* U inicial, asociada a un espesor nulo de la capa de aislamiento térmico, es alta dado que los forjados de hormigón tienen una baja resistencia térmica. La solución probada será la de aislamiento por el exterior, sobre el forjado.

Realizaremos simulaciones energéticas, descritas en el procedimiento, incorporando una capa de aislamiento térmico, de espesor variable, en la construcción de la cubierta para estudiar la influencia sobre la demanda.

Añadiremos sucesivamente un centímetro de un aislamiento tipo, con una conductividad térmica $\lambda=0,029$ W/mK. De este modo será fácil interpolar si se selecciona otro tipo de aislamiento con un λ distinto.

El rango seleccionado de los valores que puede adoptar el parámetro va de 0 a 30 centímetros, ambos valores extremos a los que no es usual llegar en edificios situados en la zona climática mediterránea.

d) P04. Espesor de la capa de aislamiento térmico del suelo

El suelo es la parte límite horizontal inferior de la envolvente térmica. No nos referimos a forjados interiores que delimitan dos espacios acondicionados, que denominaremos elemento de separación horizontal, sino que es el primer forjado, límite con el aire, con el terreno o con un local no calefactado en planta baja o sótano.

Realizaremos las simulaciones energéticas añadiendo espesor a la capa de aislamiento térmico. La disposición en una intervención dependerá de si es obra nueva o rehabilitación: en una intervención de rehabilitación no es siempre posible aislar por el interior –sobre el forjado– ya que la altura libre es limitada y no es habitual disponer de margen para consumirla.

Los suelos en la arquitectura estudiada configuran el límite superior de la



Figura 3.2.6 Capilla de Nôtre-Dame-du-Haut en Ronchamp, Le Corbusier, 1950. Fuente fundación Le Corbusier

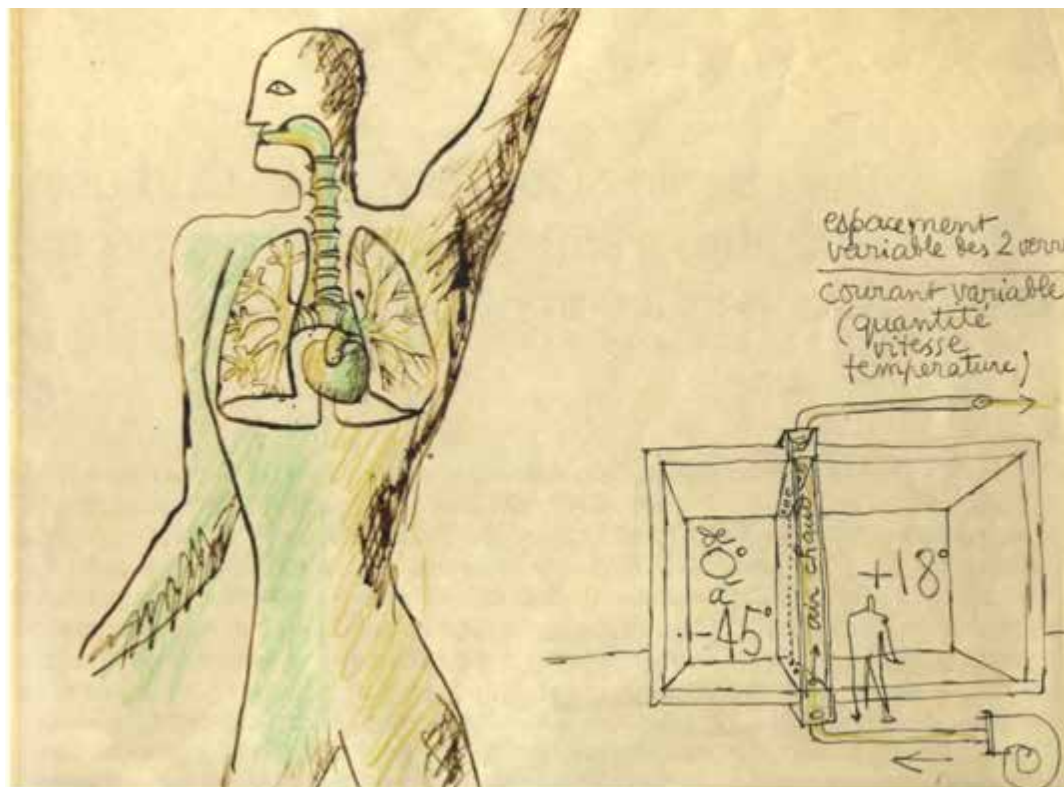


Figura 3.2.7 Dibujo del Mur Neutralisant. Le Corbusier. (González de León, 2006)

planta baja, que se plantea sobre pilotis, configurando un espacio de contacto con el terreno exterior, abierto y sombreado. Es una de las características más representativas de la arquitectura del Movimiento Moderno y uno de "*les cinq points d'une architecture nouvelle*", manifiesto ideado por Le Corbusier para ser lanzado como publicidad de sus ideas siendo un resumen no razonado de los planteamientos expuestos con mayor detenimiento en muchos de sus escritos, como "*Vers une architecture*" (1923) o en la revista *L'esprit nouveau en architecture* (1920).

Volviendo al aislamiento térmico, el rango de valores seleccionado que puede adoptar el parámetro va de 0 a 30 centímetros considerando un material de la misma conductividad que en el P4.

e) P05. Espesor del aislamiento térmico del cerramiento opaco de la fachada

El cerramiento opaco de la fachada es un elemento constructivo no portantes, independientes -como norma general- de la estructura, aunque en algunos casos no se desprenden totalmente de esta función³. Los test uniparamétricos consistirán en la adición de una capa variable de aislamiento térmico, al igual que en los dos parámetros anteriores.

Se puede proponer una situación de aislamiento por el exterior, intermedio o interior. En este caso proponemos el intermedio. El rango seleccionado de los valores que puede adoptar el parámetro va de 0 a 30 centímetros, como en los dos parámetros anteriores.

f) P06. Transmitancia térmica U del vidrio

El hueco es el elemento más complejo del edificio tradicional (Paricio, 1997). El hueco relaciona interior y exterior en un edificio. Debilita el muro para conseguir ventilación e iluminación, vistas y relación con el lugar. Es un elemento fundamental en la definición arquitectónica.

El hueco es el elemento de la envolvente con mayor indeterminación con respecto al balance energético: así como un muro aislado desplaza hacia el mínimo la transmisión energética, en el hueco entran en la ecuación los aspectos relacionados con la radiación solar que contrarrestan las pérdidas por transmisión en invierno o que se unen a las ganancias en verano. Es una pieza clave también para estas cuestiones energéticas.

2. Veremos como excepción uno de los edificios utilizado como modelo, con una fachada portante que transmite cargas a un forjado de hormigón sustentado por pilares metálicos

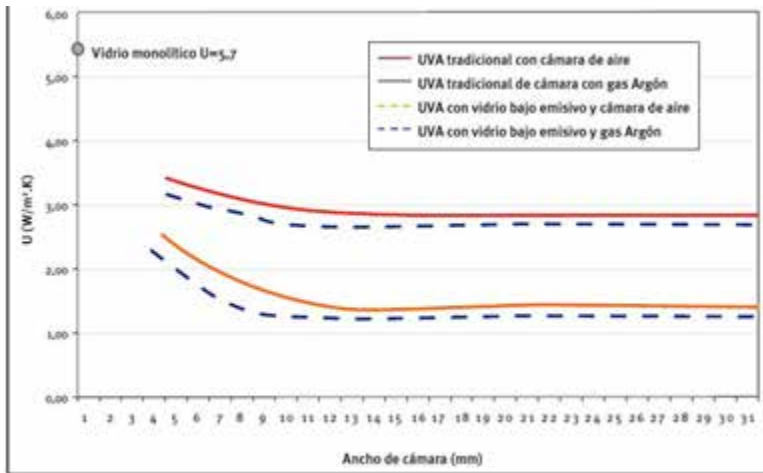


Gráfico 3: Relación entre la transmitancia con el ancho de cámara para distintas UVA.

Figura 3.2.8 Relación entre la transmitancia térmica del vidrio y el ancho de la cámara, dependiendo de la unidad de vidrio aislante -UVA-. (IDAE, 2008)

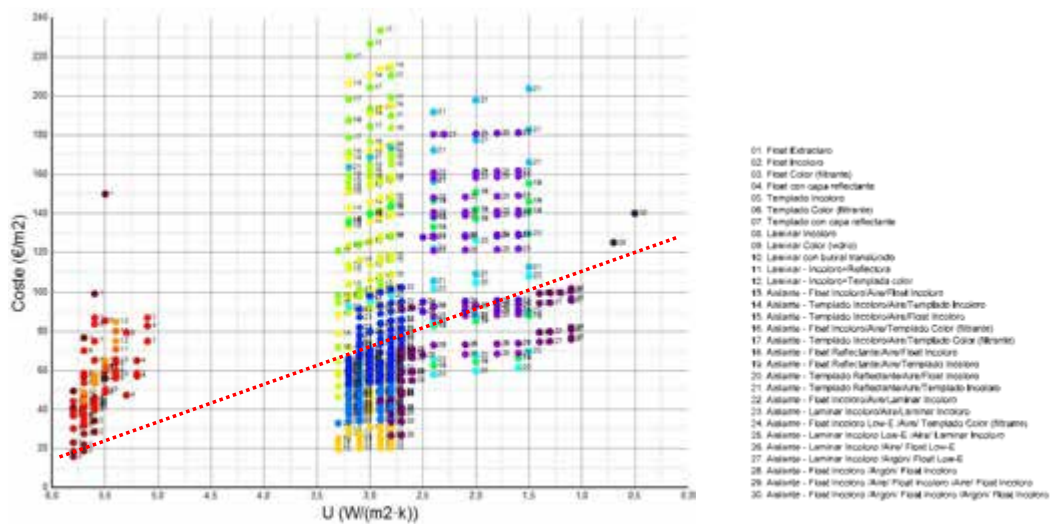


Figura 3.2.9 Relación entre la transmitancia térmica del vidrio y el coste (Boada i Xairó, 2014)

Vidrio y marco componen el hueco. En ocasiones el primero prácticamente solo, forma este elemento y en otras, sofisticados despieces de carpinterías, practicables unas, fijas otras. Los materiales que componen los huecos han evolucionado mucho desde principios del siglo XX. Es posible combinar en un solo vidrio un aislamiento térmico, ganancia solar: conservación y aportación de calor con mayor eficacia.

El vidrio es un mal aislante: su transmitancia térmica es alta y depende de dos factores principalmente:

- La cámara de aire, cuyo espesor y composición determinan las pérdidas por transmisión (valor de U). Hay gases, como el argón o el criptón, que reducen la transmisión térmica cuando sustituyen al aire en la cámara.
- El revestimiento del vidrio, que puede llevar una capa de baja emisividad que reduce las pérdidas por radiación.

Los datos de transmitancia de los huecos dependen fundamentalmente de la incorporación de cámara de aire y de vidrios bajo emisivos (fig. 3.2.8). El caso inicial es un vidrio monolítico de elevada transmitancia térmica U.

Ya Le Corbusier, conociendo de este problema, planteó un sistema de confort de invierno basado en las dobles ventanas de algunos de los edificios industriales de la Chaux de Fonds. En los años 20 del siglo pasado, utilizó acristalamiento doble con calefacción entre los vidrios. Más adelante teorizó "*le mur neutralisant*" (fig. 3.2.7), cámara de aire entre vidrios, que debía climatizarse hasta la temperatura deseada para el interior garantizando así el confort. La propuesta recibió múltiples críticas, por parte de técnicos de fabricantes como Saint-Gobain, por las pérdidas energéticas desde la cámara hacia el exterior. En la Cité Refuge de París, fracasó al intentar implementar el muro neutralizante y su fachada original, con carpinterías fijas -únicamente unas pocas practicables en toda la fachada-, que fueron sustituidas a pesar de sus protestas (Paricio, 2014).

En la actualidad, la tecnología no para de mejorar sus prestaciones: se están desarrollando cámaras al vacío que reduce la transmisión de calor, se añaden a los vidrios capas que modifican su color o transparencia o se incorporan fluidos que absorben parte de la radiación infrarroja incidente. La tesis doctoral de Carmen Giménez plantea una investigación sobre este último y novedoso tipo de vidrio, denominado vidrio, dinámico (Giménez Molina, 2011).

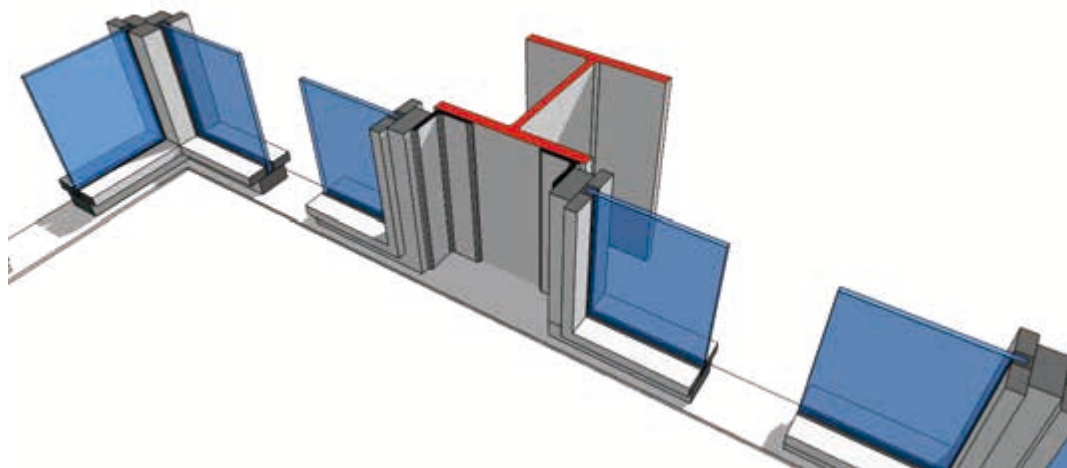


Figura 3.2.10 Perspectiva de la carpintería de la casa Farnsworth, proyectada y construida entre los años 1946 y 1951 por el arquitecto Ludwig Mies van der Rohe en Plano, Illinois (Díaz Guirado, 2013)

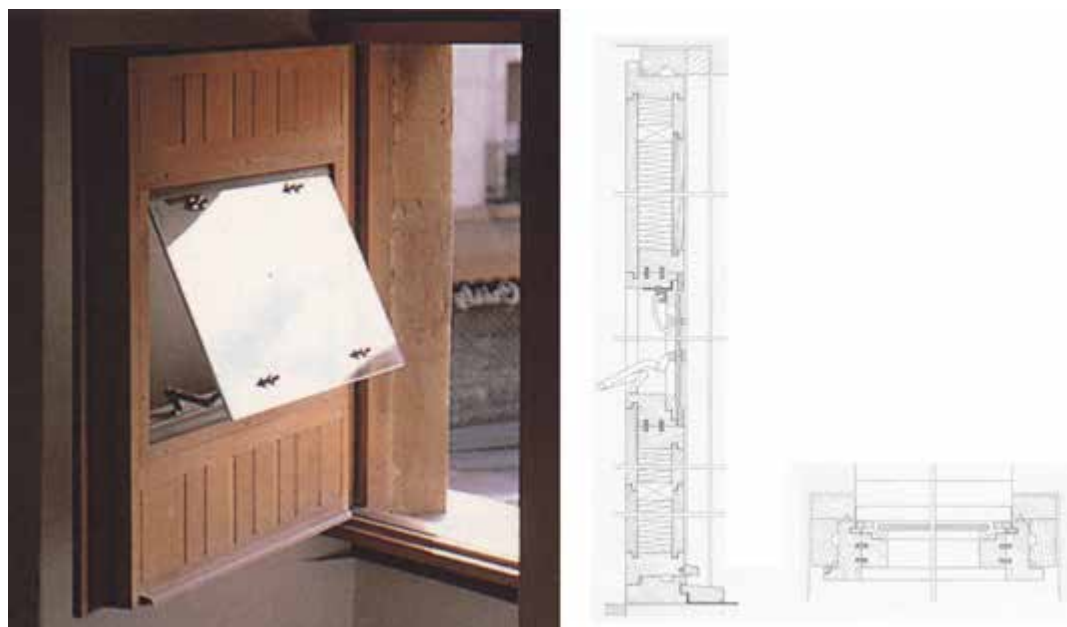


Figura 3.2.11 Solución de ventana en la rehabilitación de la casa de las conchas, del arquitecto Víctor López Coteló. Salamanca (Paricio, 1997)

El valor de la transmitancia térmica del vidrio monolítico -sin que dependa del espesor del mismo, ronda los $5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Al incorporarle cámara de aire o de otro gas, de espesor variable, valor de U desciende.

Será importante relacionar estos valores con el factor solar g , ya que los vidrios monolíticos, de alta transmitancia, tienen un g también alto si son transparentes, lo que provoca ganancias solares en invierno a través de los huecos soleados. Al disminuir el valor de la U del vidrio, añadiendo otra hoja, incorporando capas de baja emisividad o gas distinto al aire -como el argón-, el factor solar del vidrio se modifica. Existe relación entre número de hojas de vidrio y factor solar por lo que habrá que no son parámetros independientes. Lo veremos al describir el parámetro P13 factor solar.

Alcanzar valores muy bajos de transmitancia térmica en los vidrios puede resultar muy costoso y es imposible llegar a las prestaciones de un cerramiento opaco bien aislado.

Sin embargo, a pesar de los límites propios del material, se pueden plantear soluciones como las que ilustra el profesor Ignacio Paricio en su última clase en la Escuela de Arquitectura de Barcelona -tras cuarenta y cuatro años y seis meses de docencia-: unas contraventanas aislantes térmicas, por ejemplo, pueden reducir tamaño de un gran hueco cuando aprieta el frío o ampliarlo cuando se busca el máximo contacto con el exterior puesto que una contraventana cerrada tras un vidrio reproduce las prestaciones de una fachada opaca (Paricio, 2014).

g) P07. Transmitancia térmica del marco

La carpintería permite al usuario decidir sobre como relacionarse con el exterior: permite ventilar de modo natural o combinarse con elementos que filtran la radiación solar. Además, su color relaciona la cantidad de calor que la radiación solar aporta al edificio a través de este elemento.

Puede tener una gran presencia, mediante complejas divisiones que permiten un gran abanico de posibilidades o puede desaparecer, buscando la tersura o la sencillez geométrica.

Lo habitual es que represente entre el 25 y el 35% de la superficie del hueco (IDAE, 2008).

El material utilizado históricamente para construir las carpinterías ha sido, fundamentalmente, la madera hasta la incorporación del acero. Se han ido incorporando otros materiales como el aluminio o polímeros plásticos.

En función de la técnica empleada para su fabricación y de las características del material, encontramos carpinterías con valores de transmitancia térmica bajos -como la madera- o altos - como el acero-, que se combinan con otros parámetros que lo caracterizan, como absorción o permeabilidad al aire.

El primero de ellos, el parámetro P7, depende básicamente de las características de conductividad térmica del material.

Los marcos de madera suelen ser perfiles macizos que aportan un buen nivel de aislamiento térmico por la naturaleza alveolar del material. La madera es un buen aislante dado que su conductividad es baja, variando según la especie utilizada.

El valor de U depende de la densidad de la madera pero, el rango habitual se sitúa entre los 2 W/m²K para maderas de baja densidad -sobre los 500 kg/m³- y los 2.2 W/m²K para maderas de mayor densidad, más duras, -100 kg/m³.

Los marcos metálicos en la actualidad son mayoritariamente fabricados con acero o aluminio. Un valor comúnmente aceptado de la transmitancia térmica U de estos materiales es de 5.7 W/m²/K, debidos, básicamente, a las resistencias térmicas superficiales interior y exterior.

Para solucionar este alto valor de U -y reducirlo-, se fabrican marcos metálicos con rotura de puente térmico, consistente en la incorporación de uno o varios elementos plásticos que separan la parte del marco exterior de la interior. Este elemento tiene poca influencia en la absorción del hueco y mejora las prestaciones frente a la conducción del hueco (IDAE, 2008).

El Policloruro de Vinilo o PVC es el material utilizado para conformar perfiles huecos que aportan unas buenas prestaciones respecto a la transmisión de energía, con un rango de valores que van desde los 1.8 a los 2.2 W/m²K, aunque dependen del número de cámaras que se conformen.

El problema ambiental que generan el uso del cloro (en un 57%) y del etileno, derivado del petróleo (en un 43%) unido a que su reciclaje es prácticamente nulo

(Instituto de Estabilidad, Facultad de Ingeniería, 2004), debe ser considerado dentro de las cuestiones de sostenibilidad, fundamento último de nuestra investigación.

Existen también marcos mixtos, que combinan varios materiales, como aluminio y madera o poliuretanos con núcleos metálicos incluso metálicas rellenas de espumas aislantes.

h) P08. Absortancia de la cubierta

El primer parámetro considerado, relacionado con la radiación solar, es la absortividad de la cubierta. Antes de entrar en los parámetros considerados, procedamos a definir el concepto.

El CTE define absortividad como la fracción de la radiación solar incidente a una superficie que es absorbida por la misma.

Varía entre 0,0 (0%) y 1,0 (100%). El color blanco será el más cercano al 0 y el negro al 1. Variaremos el color de los elementos constructivos con incidencia solar:

Depende fundamentalmente del color de la superficie. Queremos evaluar la influencia de esta variable del edificio en el comportamiento energético. Está relacionado directamente con la radiación solar incidente, por lo que su influencia se relacionará a su vez con la exposición a la misma -orientación, inclinación del cerramiento...etc.

Le Corbusier, en palabras del profesor Ignacio Paricio, envolvió de blancura sus edificios de construcción muy heterogénea como si la materia constructiva fuese un continuo plástico que conformase los volúmenes puros (Paricio, 2014).

El color es uno de los estilemas del Movimiento Moderno, como hemos descrito anteriormente. También es un color asociado a la arquitectura vernácula de climas cálidos, basados en fundamentos prácticos: el blanco refleja la radiación solar incidente.

Ampliando la definición del parámetro, la absortividad es una propiedad del material y determina la cantidad de radiación solar incidente que puede absorber. La absortancia -denominada también absortividad superficial- representa la fracción de radiación absorbida.

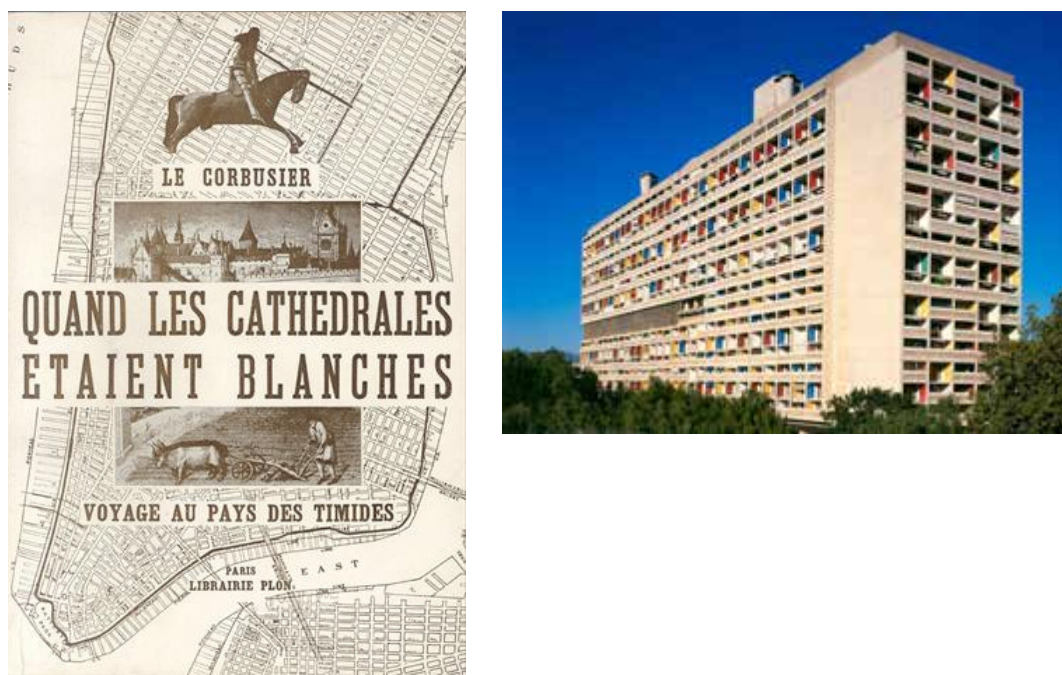


Figura 3.2.12 Izda. Portada del libro *Quand les cathédrales étaient blanches. Voyage au pays des timides.*, Le Corbusier, 1937, dcha. *Unité d'habitation* de Marsella. Fuente: Fundación Le Corbusier

Esta propiedad varía en función de la longitud de onda incidente, siendo la radiación solar visible y la infrarroja -térmica- las relacionadas con los edificios.

La absorptancia solar incluye espectro visible, infrarrojo y ultravioleta. Se utiliza para estimar la incidencia del color de las superficies de los elementos constructivos de la envolvente sobre el balance energético.

También podríamos hablar de absorptancia visible -la que considera únicamente el rango de longitudes de ondas del espectro visible de la luz-, y la térmica -para longitudes de onda larga infrarroja.

La emisividad de un material es la relación entre la energía radiada por el mismo y la energía que radiaría un cuerpo negro ideal, a la misma temperatura y superficie. Mide la capacidad del material para absorber y radiar energía. Depende de la temperatura y las condiciones de la superficie, como la rugosidad, brillo...etc.

En la siguiente tabla se muestran los valores de absorptancia solar y emisividad de algunos materiales comunes en la edificación:

TABLA 3.2.1. ABSORTANCIA SOLAR Y EMISIVIDAD DE ALGUNAS SUPERFICIES CONSTRUCTIVAS. FUENTES: M. EVANS (1980) Y B. GIVONI (1976)

Material (superficie)	Absortancia	Emisividad
Hoja de aluminio brillante	0.05 - 0.10	0.05 - 0.10
Lámina de aluminio con pátina de oxidación	0.30 - 0.50	0.20 - 0.50
Pintura de aluminio	0.40 - 0.55	0.40 - 0.55
Hierro galvanizado con pátina normal	0.30 - 0.50	0.20 - 0.40
Encalado reciente	0.12	0.90
Madera	0.40	0.90
Ladrillo, teja, piedra	0.70	0.90
Concreto aparente	0.45 - 0.60	0.90
Pintura de aceite blanca	0.20	0.90
Pintura verde o gris, clara	0.40	0.90
Pintura verde o gris, oscura	0.70	0.90
Pintura negra, asfalto	0.85	0.90

Volviendo al parámetro P08, consideraremos la absortancia de la cubierta considerando el color superficial de este cerramiento. Según el modelo, la superficie de la cubierta sobre la que incide la radiación solar será inclinada o plana.

La radiación solar incidente en la cubierta es un parámetro de gran relevancia en el balance térmico del edificio. Existen múltiples bases de datos de la energía solar incidente en un plano horizontal. Recientemente Google ha comenzado a desarrollar un nuevo proyecto denominado “Google Project sunroof”, que define como “*your own personalized solar savings estimator, powered by Google Earth imagery*” -su propio estimador de ahorro energía solar personalizado- (fig. 3.2.13) (Google, 2015).

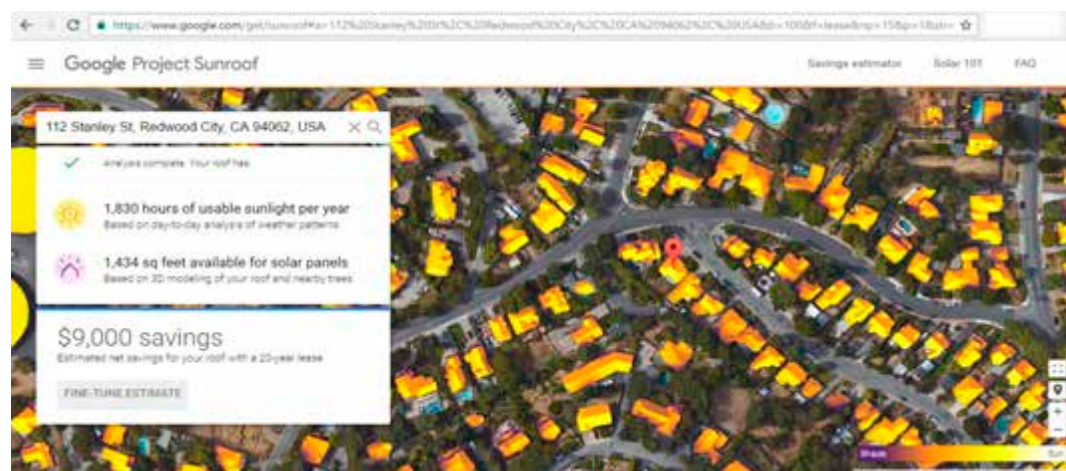


Figura 3.2.13 Google Project Sunroof (Google, 2015)

i) P09. Absortancia del cerramiento opaco de la fachada

Matei Calinescu escribe sobre el prefijo post, que define como “*aparentemente inocuo*” pero que “*pareció eliminar las antiguas restricciones y prejuicios y liberar la imaginación para experiencias nuevas, indefinidas, pero extremadamente emocionantes.*” En referencia al mundo, que denomina de los “*nuevos mutantes*”, cita algunos como post-modernista, post-humanista o, incluso, post-blanco, en clara referencia al color impuesto por la primera arquitectura moderna (Calinescu, 2016).

Las fachadas enfoscadas en color blanco son características en la arquitectura del Estilo Internacional. Maldonado lo denomina “*racionalismo blanco*”, en referencia a la arquitectura europea de los años 20 del siglo pasado (Maldonado, 1990).

Ernst Bloch, citado por Maldonado (1990), realiza un original análisis de la arquitectura moderna:

“Hoy en muchos lugares las casas nos miran como si estuviesen a punto de partir. Aunque estén exentas de adornos, o quizás por ello, se expresa en ellas una despedida. Claras y lisas en el interior como salas de hospital, en el exterior dan el efecto de cajas sobre zancos, pero también de naves.

Tienen cubierta, escotillas, escalerillas de a bordo, pretilas, relucen blancas y meridionales, como las naves tienen placer de desaparecer... Lo que efectivamente se ha intentado en la técnica de la construcción, lo ha sido con el afirmado e incómodo placer del «todo ventanas» y de las casas y de los utensilios desnudamente resplandecientes. Es cierto que todo esto se presentó como purificación del moho del siglo pasado y de sus inenarrables ornamentaciones ... Cuanto más pasa el tiempo tanto más se destaca como inscripción por encima del Bauhaus y de todo cuanto se relaciona con el movimiento: Y vaya, no se nos ocurre nada más”

La arquitectura vernácula del sur de España, blanca para protegerse del sol. La arquitectura moderna, blanca como signo de identidad.

Con el estudio de la absortancia de la fachada pretendemos cuantificar la influencia de esta decisión en el comportamiento energético.

En la Universidad Politécnica de Valencia trabaja sobre este tema el Grupo de Investigación del Color (Grupo de Investigación del Color, 2016). En su comunicación en el IX Congreso Nacional del Color, celebrado en Alicante en 2010 citan la denuncia de Ned Cramer argumentando lo contrario: *“No fue nunca blanca, después de todo”*⁴, en referencia a la arquitectura de Le Corbusier. El blanco es una respuesta al rechazo a la ornamentación que Adolf Loos planteó en su *Ornament und verbrechen* -ornamento y delito-, en 1908, característico de la arquitectura alemana de la época.

Mark Whigley señala que la única explicación posible para el triunfo del blanco en la arquitectura moderna es la ceguera hacia el color *“autoimpuesta”*, *“compartida por muchos de los historiógrafos dominantes”* y cuya consecuencia es que *“el color se separa de la narración principal de la arquitectura”*⁵ (García, et al., 2010).

El valor del parámetro varía del mismo modo que el anterior, entre 0 y 1, siendo el blanco el de valor inferior, en torno a 0,20 y el negro el más próximo a la unidad.

En las obras seleccionadas de Antonio Bonet Castellana veremos fachadas blancas, como el Conjunto Maralet, y también la Torre Hexagonal en color oscuro que fue conocida como la torre negra (fig. 3.8.2.).

j) P10. Absortancia del marco de la carpintería exterior

La absortancia del marco la consideraremos inicialmente en función de su color y material, con los mismos criterios planteados anteriormente: rango entre 0 y 1.

k) P11. Masa de la fachada

“La masividad es una defensa contra el tiempo”

Araujo, 2012

La inercia térmica se define como la capacidad de un material para acumular energía. Depende de la diferencia de temperatura y de las características intrínsecas del material, como calor específico, densidad y volumen (Melero, et al. 2013).

⁴ N. Cramer, *“It was Never White, Anyway”*, Architecture, vol. 88, no. 2 (1999). ISSN: 07460554, citado por García, et al., (2010)

⁵ M. Wigley, *White Walls, Designer Dresses: The Fashioning of Modern Architecture*. (MIT Press: Cambridge, 1995). pp. 424. ISBN: 0262231859, citado por García, et al., (2010)

La inercia térmica es también la dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura y se obtiene cuantificando su masa térmica (Neila González, 2004)

Este es el primer parámetro relacionado con este aspecto en la envolvente de los edificios estudiados.

La inercia térmica tiene una vinculación directa con la acumulación de energía: los cerramientos con gran inercia acumulan mucha energía que actúa de colchón protector ante las fluctuaciones de la temperatura exterior (Neila González, 2004). Reduce la velocidad de variación de la temperatura interior.

Esta capacidad está relacionada con la masa del edificio, pero por el modo de construir, puede quedar anulada si se interponen capas de aislamiento térmico entre el material masivo y el espacio interior: falsos techos suspendidos o trasdosados ligeros con materiales aislantes que anulan el efecto amortiguador de los materiales masivos, como ladrillos u hormigones.

Dietmar Eberle califica esta situación como ridícula y apuesta, cuando interesa aprovechar esta propiedad, por eliminar los falsos techos y dejar las estructuras e instalaciones vistas (Buchanan, 2016).

Fernando de Retes Aparicio, en su premiado Centro de Agroecología y Medio Ambiente de Bullas (fig. 3.2.14) trasdosa únicamente las partes de los muros de hormigón por donde pasan las instalaciones, dejando el resto de los muros y forjados de hormigón armado vistos por esta cuestión. De Retes indica que los *“muros de gran inercia térmica funcionan como acumuladores de calor”* (de Retes Aparicio, 2009).

Un cerramiento convencional, de fábrica de ladrillo de doble hoja con aislamiento situado cerca del ambiente interior aporta entre el 10 y el 20% de su masa térmica a la inercia del local. Si se aísla por el exterior aportará el 90% y si el material no necesita capa de aislante térmico aportará entre el 40 y el 60% de su capacidad máxima (Acha Román, et al., 2013).

Valores altos de inercia térmica favorecen la estabilidad térmica, deseable en climas con variaciones altas de las condiciones exteriores, sobre todo si ocurren en periodos diarios (Neila González & Bedoya Frutos, 1997). Ocurre lo contrario si el uso es ocasional -como una vivienda de fin de semana-, donde interesa que el acondicionamiento térmico sea rápido.

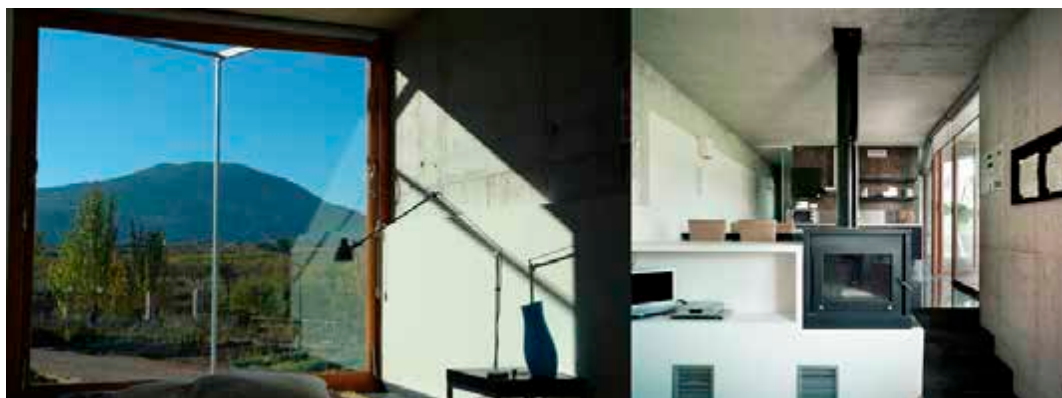


Figura 3.2.14 Centro de agroecología y medio ambiente -CEAMA-, Bullas, 2009. Retes Arquitectos. Interiores, F. de Retes e Iris Tomás. Fotografías: F.de Retes

El profesor Neila González escribe que la influencia de la inercia térmica es muy relevante en condiciones de verano, ya que se produce efecto térmico conocido como *sobrecalentamiento*: en los meses de calor los espacios cerrados pueden alcanzar temperaturas superiores a las del ambiente exterior. La radiación solar, unida a las cargas internas del edificio, incrementan la temperatura interior del edificio. Como la temperatura media diaria en verano se acerca a la de confort, si el edificio posee alta inercia térmica es previsible que el edificio se comporte mejor en esta época del año (Neila González & Bedoya Frutos, 1997).

Por todo esto, incorporamos estos parámetros de masa al estudio.

Trabajaremos con el valor de la densidad del material, adoptando unos valores entre 418 kg/m^3 , correspondiente a una fachada ligera hasta 6092 kg/m^3 , correspondiente a un elemento pesado. Los valores están tomados de valores extremos del catálogo de elementos constructivos del CTE (fachadas como las F10.1 como fachada ligera, F1.2 como fachada equivalente al caso cero o F13.1 como fachada pesada) (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2010).

1) P12. Masa de los forjados de la envolvente

Con el mismo criterio, trabajamos con el parámetro masa de los forjados, elementos horizontales de la envolvente térmica. Veremos cómo combinan radiación solar incidente en cubierta y masa del elemento.

Trabajaremos con el valor de la densidad del material, adoptando unos valores entre 60 kg/m^3 , correspondiente a un forjado ligero hasta 2800 kg/m^3 ,

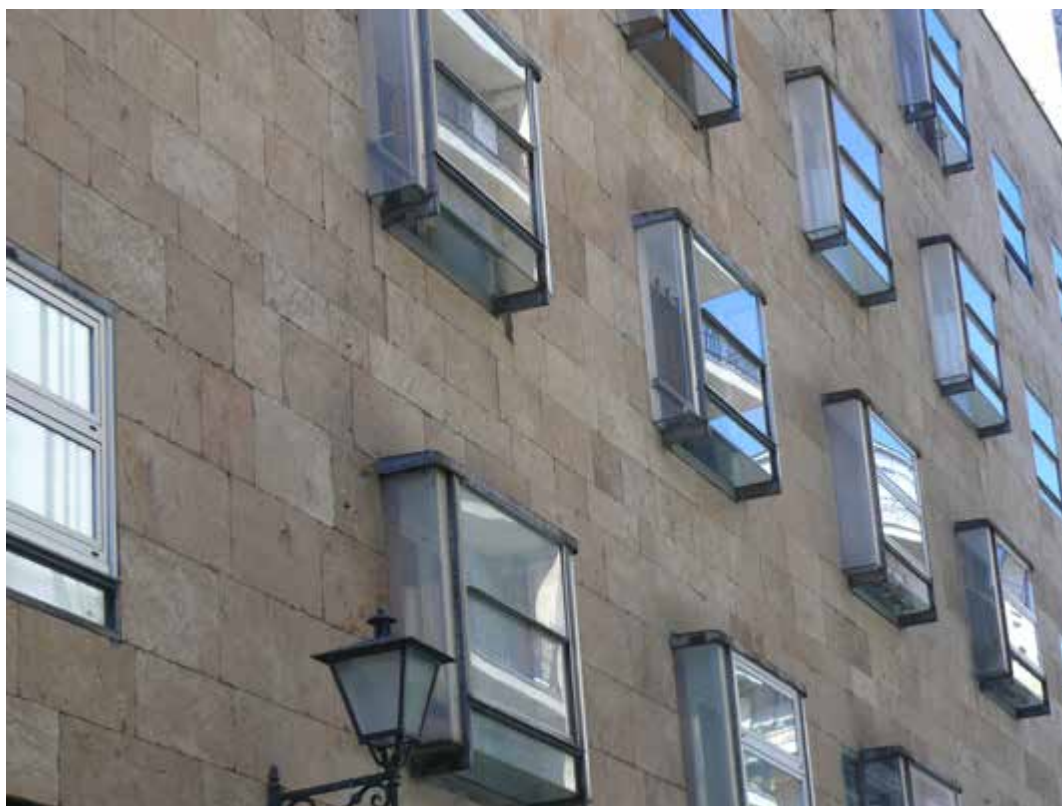


Figura 3.2.15 Edificio en la calle Prior de Salamanca, de Alejandro de la Sota, con carpinterías que sobresalen del plano de fachada. Fuente: Fundación Alejandro de la Sota

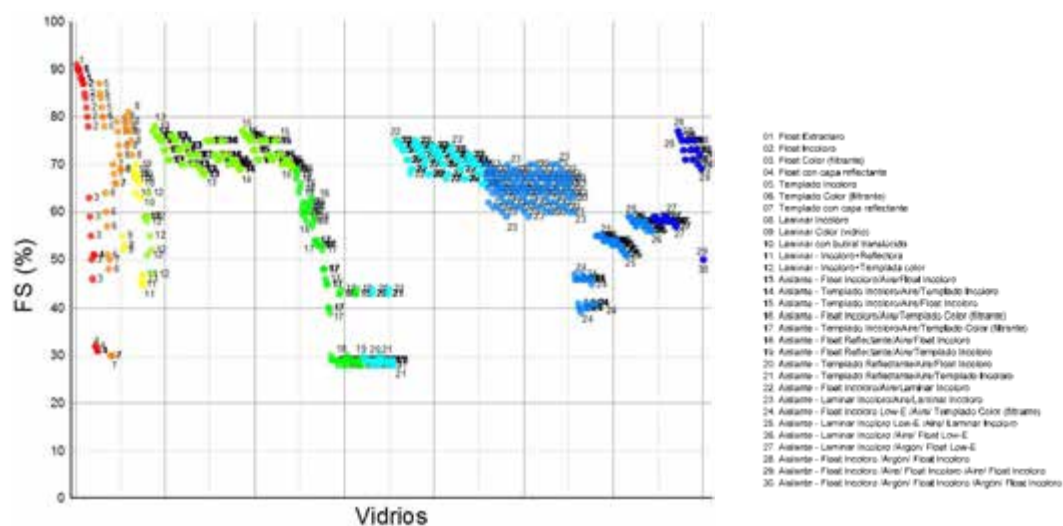


Figura 3.2.16 Relación entre distintos tipos de vidrio en función de su factor solar g . Fuente: (Boada i Xairó, 2014)

correspondiente a una losa de hormigón armado (valores tomados del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, apartado 3.18, forjados y losas alveolares).

m) P13. Factor solar del vidrio

El factor solar de un vidrio (g) es el cociente entre la radiación solar a incidencia normal que se introduce en el edificio a través del acristalamiento y la que se introduciría si el acristalamiento se sustituyese por un hueco perfectamente transparente. Se refiere exclusivamente a la parte semitransparente de un hueco, es decir, a los vidrios.

El factor solar de un vidrio actúa durante todo el año, por lo que un factor solar alto permitirá el acceso más cantidad de radiación solar tanto en épocas de verano como de invierno. Valores de g alto benefician el comportamiento térmico en calefacción, pero deben ser protegidos para no perjudicar en exceso en el periodo de verano. Neila González (1984) escribe que *“la orientación óptima es aquella en la que se obtienen las mayores ganancias en invierno y las menores en verano”*. Estudia las orientaciones óptimas concluyendo que hay que buscar el máximo de huecos a sur, parte al norte y nada al este y oeste.

Se fabrican vidrios con todo tipo de valores de factor solar. Los que encontramos con mayor facilidad en el mercado abarcan entre un g entre 0,30 y 0,90. Se suele aceptar que el valor correspondiente a un vidrio monolítico y transparente ronda los 0,87 y, si tiene cámara -transparente con doble acristalamiento estándar, 0,75.

Combinaciones: g está relacionado con la construcción del vidrio. Se relaciona con el dato de U .

En este caso, el parámetro P13 adquiere un valor entre 0,20 y 1 -valores que introducidos en el programa equivalen a un $g=0,17$ y 0,85. La fórmula que relaciona P3 y g la siguiente:

$$g = P13 / 1,1746471$$

Así pues, un valor de $g=0,85$, correspondiente a un vidrio transparente monolítico, corresponde con $P13=1$.

n) P14. Factor de sombra en verano

Este parámetro corresponde a la incorporación de sistemas que protegen los huecos de la radiación solar pero que únicamente actúan en verano. Son filtros, como toldos, mallorquinas o lamas móviles que protegen del sol cuando las condiciones meteorológicas así lo requieren y lo dejan pasar cuando su efecto es positivo.

El programa de evaluación energética que vamos a utilizar considera por defecto una reducción del 30% por las persianas en verano. Actuaremos sobre el resto de la radiación solar.

La plataforma “*filt3rs*”⁶, dirigida por el profesor Ignacio Paricio, se dedica a investigar y difundir nuevos conocimientos sobre dispositivos de filtrado relacionados con los huecos y los cerramientos vidriados. La Casa Dionisi, de Coderch y Manuel Valls, en 1954 es el primer edificio en la que aparecen toda clase de correderas que más adelante utilizarán en su arquitectura (fig. 3.2.17), como en el edificio de la Barceloneta. Le Corbusier, en la Ville Saboya, diseñó una de las pocas persianas que proyectó en sus primeros años: una protección solar en el estar que no llegó a colocarse por problemas de presupuesto. Está reflejado en sus dibujos (Paricio, 2014).

Evaluamos el filtro solar situado en el exterior del hueco, tratado como un elemento abstracto a través de este parámetro, que corresponde a una protección solar que actúa únicamente en verano -desaparece en invierno para favorecer las ganancias solares en invierno. Es lo que denominamos protección solar estacional.

o) P15. Ventilación. Tasa de renovación de aire

La ventilación del edificio tiene gran influencia en la demanda energética del edificio. Tal es así, que la normativa fija unos valores considerados como estándar para intentar acotar su influencia y trabajar con el resto de parámetros.

Tras iniciar la investigación decidimos no incluir este parámetro P15 en el estudio de casos, dado que desvirtuaría los datos obtenidos. Analizaremos su efecto en el edificio original y en las propuestas de optimización.

Sirva como ejemplo la gráfica de la demanda energética de uno de los casos de estudio, separada por elementos. En azul cian las debidas a la ventilación más las infiltraciones por los huecos (fig. 3.2.18).

6 Disponible en la página web www.filt3rs.net (Paricio et al, 2017)

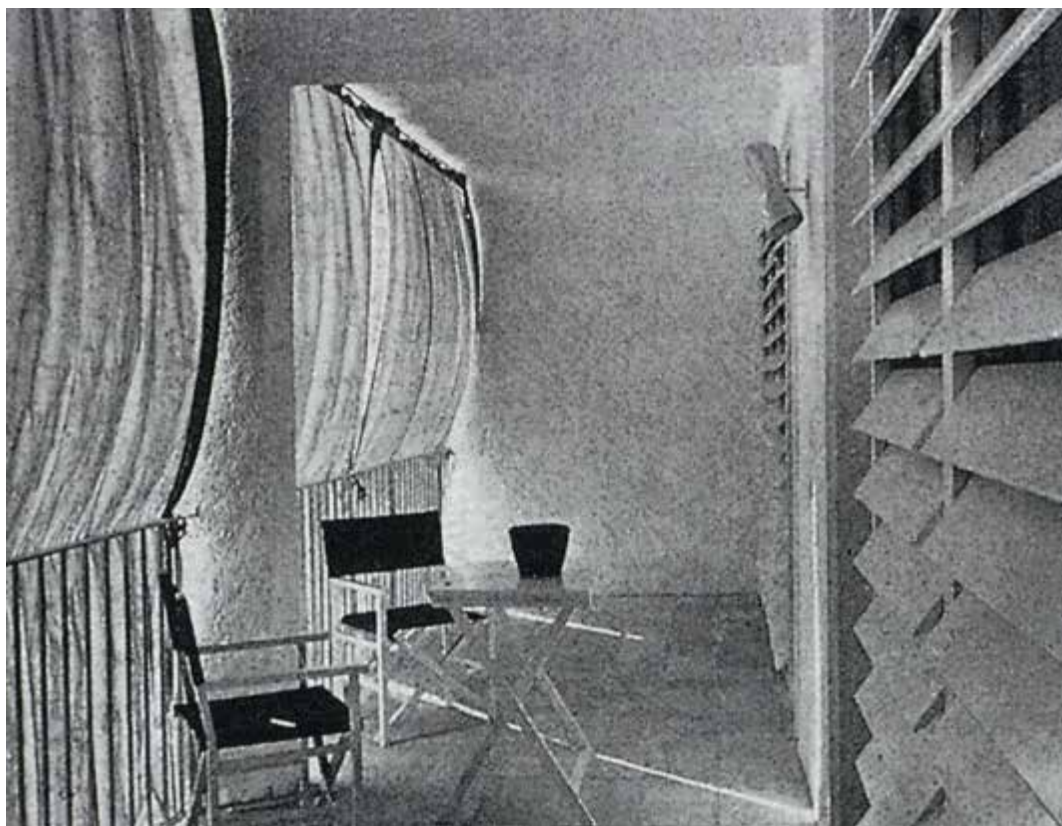


Figura 3.2.17 Casa Dionisi, 1954, de J.A. Coderch y M. Valls. Fuente *filt3rs*

p) P16. Infiltraciones de aire por huecos

La Permeabilidad al aire es propiedad de un hueco de dejar pasar el aire cuando se encuentra sometida a una presión diferencial. La permeabilidad al aire se caracteriza por la capacidad de paso del aire, expresada en m^3/h , en función de la diferencia de presiones.

La guía de condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER define infiltración como *“la cantidad de aire que entra en el edificio directamente desde el exterior. La infiltración depende en principio de muchos factores, entre los que pueden mencionarse las condiciones climáticas (principalmente de la velocidad del viento, que influye en la sobrepresión o depresión creada en diferentes fachadas), el entorno urbano circundante (que puede modificar la velocidad y dirección del viento), la geometría del edificio, el tamaño, la posición y la permeabilidad de las rendijas y aberturas por las que penetra el aire, y el tiro térmico natural o forzado que se pueda producir en el interior del edificio”* (IDAE, 2009).

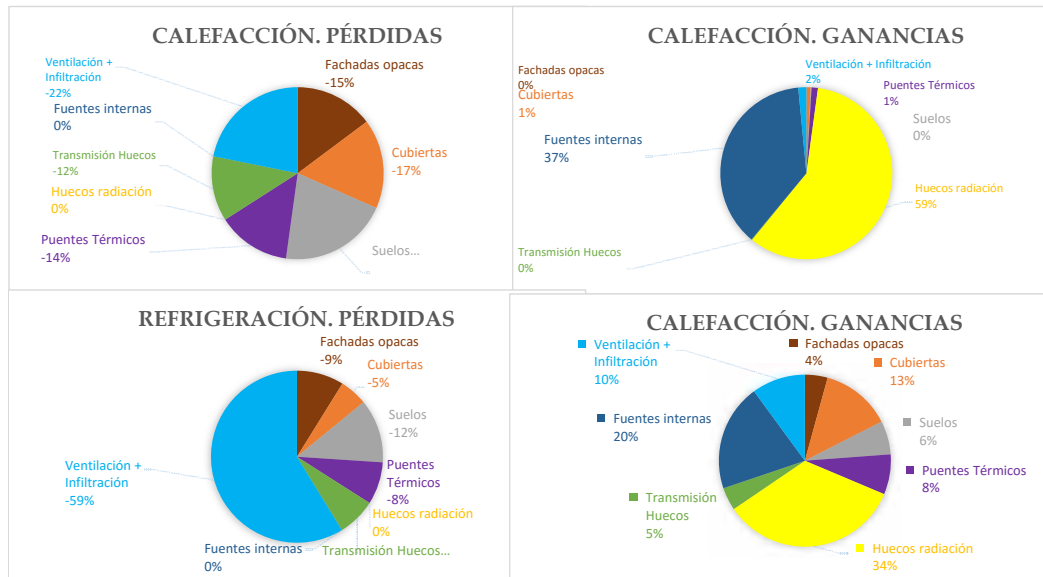


Figura 3.2.18 Gráficas de demanda energética del edificio 1, conjunto de viviendas Maralet, del arquitecto Antonio Bonet Castellana (ver capítulo 4). En azul cian la demanda debida a la ventilación.

El gasto másico, en kg/s, depende de la densidad del aire exterior, que a su vez depende, fundamentalmente, de la altitud sobre el nivel del mar de la localidad de cálculo y de la temperatura del propio aire exterior. De ahí la incorporación del parámetro P2 que se relacionará directamente con éste.

Los huecos se clasifican en función de su permeabilidad al aire en cinco grupos, desde la Clase 0, la más permeable hasta la 4, la menos.

Los valores de estas clases están recogidos en la norma *UNE EN 12207:2000* (fig. 3.2.19). El valor del parámetro P16 corresponde al que recoge la norma UNE para una presión en el ensayo de 100 Pascales. Clase 4 es una ventana con infiltraciones menores a $3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ y los que superan los $50 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ serán Clase 0.

El rango de valores utilizados en la investigación irá desde 0 a $100 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$.

Este parámetro representa la influencia de la ventilación no controlada -accidental- debida a las infiltraciones de aire a través de los huecos.

Está relacionado también con la funcionalidad de los huecos: un hueco fijo es, como norma general, más estanco al aire que uno practicable y entre éstos, una ventana corredera suele ser menos estanca: También está relacionado con el material: una ventana de madera es menos estanca que una de aluminio o PVC.

Sin embargo, el usuario puede hacer que la ventilación natural actúe cuando más le conviene al edificio provocando una mejora sustancial del comportamiento térmico.

El profesor Ignacio Paricio habla de la fragmentación de las carpinterías como una estrategia fundamental para poder disponer de gran variedad de posibilidades y con funcionamientos independientes, como en las proyectadas por Le Corbusier en *Maisons Jaul* (fig. 3.2.20).

q) P17. Transmitancia térmica lineal en los puentes térmicos

El documento básico de ahorro de energía define puente térmico como “la zona de la envolvente térmica del edificio en la que se evidencia una variación de la uniformidad de la construcción, ya sea por un cambio del espesor del cerramiento o de los

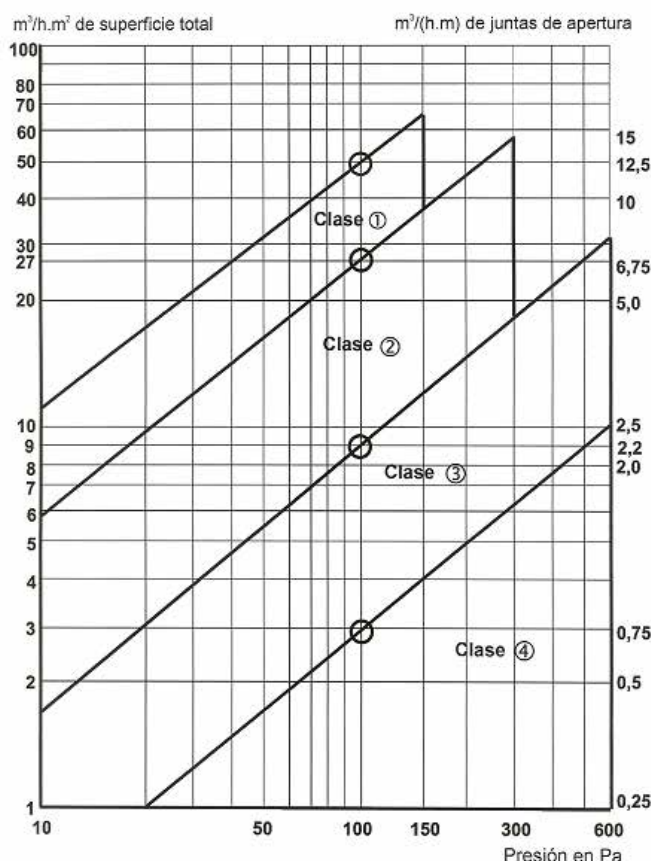


Figura 3.2.19 Clasificación de los huecos en función de su permeabilidad al aire, según la UNE-EN 12207



Figura 3.2.20 Maisons Jaoul, de Le Corbusier. Neuilly-sur-Seine, France, 1951. Hueco exterior. Fuente: Fundación Le Corbusier

materiales empleados, por la penetración completa o parcial de elementos constructivos con diferente conductividad, por la diferencia entre el área externa e interna del elemento, etc., que conllevan una minoración de la resistencia térmica respecto al resto del cerramiento.” (Ministerio de Fomento, 2013)

Este parámetro completa los relacionados con la conducción térmica. Depende del modo de construir el edificio. Hemos comentado que la arquitectura moderna independizó cerramiento y estructura. Este hecho no es del todo cierto dado que, en ocasiones, la estructura se introduce en los cerramientos: fachadas se ven interrumpidas por pilares y forjados que provocan zonas con distintas características en cuanto a la transmisión del calor.

El puente térmico es un punto de fuga de energía y también está directamente relacionado con problemas de humedades, como las condensaciones superficiales en invierno. En edificios existentes son muy fácilmente detectables con tecnologías de termografía infrarroja.

Existen cinco tipos de puentes térmicos considerados: los integrados en los cerramientos, como pilares en fachada, contorno de huecos y lucernarios o cajas de persianas, los formados por encuentro de cerramientos, como frente de formados en las fachadas, uniones de cubierta con fachadas y otros elementos, las esquinas o encuentros entre fachadas, los encuentros de voladizos con fachadas y los de tabiquería interior con cerramientos exteriores (Ministerio de Fomento, 2014).

El último parámetro considerado, por este motivo, son los puentes térmicos existentes en los edificios. Su unidad es la transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos -TTL-, expresada en W/m.K. El rango considerado va desde 0 hasta 1 W/mK.

En la tabla 3.2.2 exponemos los parámetros matéricos considerados en este plan de trabajo, indicando unidades, símbolo y rango de valores considerado.

TABLA 3.2.2. PARÁMETROS MATÉRICOS CONSIDERADOS EN LA INVESTIGACIÓN. DENOMINACIÓN, SÍMBOLO, UNIDADES Y RANGO

	SUBGRUPO	SÍMBOLO	UNIDAD	RANGO CONSIDERADO	
				MÍN	MÁX
	CLIMA Y ENTORNO				
P01	ORIENTACIÓN PRINCIPAL	OP	GRADOS RESPECTO AL NORTE (°)	0	360
P02	ALTITUD	ALT	metros respecto al nivel del mar(m.)	0	100
	CONDICIÓN MATÉRIC				
P03	ESPELOR AISLAMIENTO CUBIERTA	e_c	metros (m.)	0	0.3
P04	ESPELOR AISLAMIENTO SUELO	e_s	metros (m.)	0	0.3
P05	ESPELOR AISLAMIENTO FACHADA OPACO	e_M	metros (m.)	0	0.3
P06	U FACHADA VIDRIOS	U_{HV}	Transmitancia térmica (W/m ² K)	1	5.7
P07	U FACHADA MARCO	U_{HM}	Transmitancia térmica (W/m ² K)	1	5.7
P08	α ABSORTANCIA DE LA CUBIERTA	α_c	índice	0	1
P09	α ABSORTANCIA DE LA FACHADA	α_M	índice	0	1
P10	α ABSORTANCIA DEL MARCO	α_{HM}	índice	0	1
P11	MASA FACHADA	m_M	kg/m ³	418	6092
P12	MASA CUBIERTA Y SUELO	m_{cs}	kg/m ³	60	2800
P13	FACTOR SOLAR VIDRIOS	g	índice	0.2353	1
P14	FACTOR DE SOMBRA EN VERANO	F_s	índice	0	1
P15	VENTILACIÓN	Ren/h	Renovaciones por hora	FIJO	
P16	PERMEABILIDAD AL AIRE HUECOS	PAH	m ³ /h.m ²	0	100
P17	PUNTES TÉRMICOS	PPTT	Transmitancia térmica (W/m ² K)	0.1	0.96

3.3. CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN

En este apartado vamos a establecer los criterios considerados para la optimización de cada uno de los parámetros matéricos descritos.

Para establecer estos criterios de optimización se puede optar por varias vías: podemos relacionar los resultados con el ciclo de vida de los materiales. También con los costes de ejecución material y de mantenimiento. Otra opción sería el análisis del ciclo de vida o consideraciones desde una óptica de sostenibilidad social, como podría ser el impacto en el gasto de un hogar o la evaluación de la pobreza energética.

El coste de ejecución material de un sistema constructivo depende del contexto económico en el que se evalúa.

Todos estos aspectos exceden de los objetivos de esta investigación. No buscamos evaluar un caso concreto sino establecer criterios generales apoyados en el análisis de resultados, que nos ayuden en la toma de decisión al abordar un proyecto de arquitectura.

Establecemos los valores óptimos de cada uno de los parámetros, considerando aspectos generales, como la disponibilidad de sistemas que aporten este valor en el mercado, y arquitectónicos, como la posibilidad de aplicación en un edificio existente o en el espacio ocupado y su relación con la superficie útil.

En algunos casos no existirá un valor óptimo como tal, por lo que seleccionaremos el valor que nos ofrece el mejor resultado de demanda energética.

Para los dos primeros parámetros, relacionadas con el entorno, orientación y altitud, solo seleccionaremos los que aportan los mejores resultados, ya que su elección depende de la decisión del arquitecto unida a factores externos, como la propia ubicación del edificio o el planeamiento.

3.3.1. P01. Orientación. Parámetro

No existe un valor que optimice la orientación del edificio a priori. Seleccionaremos dos situaciones principales:

- a- La orientación que aporta el mejor resultado de demanda en cada periodo
- b- La orientación del edificio original, que no puede ser modificada en un proyecto de rehabilitación.

3.3.2. P02. Altitud

Solo depende de la ubicación del edificio, por lo que no es objeto de decisión del arquitecto, salvo en intervenciones a escala territorial.

Como hemos comentado en el apartado anterior, la seleccionamos para considerar su influencia. Realizaremos las dos situaciones planteadas para el parámetro 1, es decir, buscaremos el edificio optimizado buscando el mejor valor de orientación y altitud en una primera fase y fijaremos sus valores con los del edificio original en una segunda.

3.3.3. P03. Espesor de la capa de aislamiento térmico de la cubierta

El criterio aplicado es geométrico, para minimizar el espacio utilizado, y económico, a menor espesor menor inversión. El valor óptimo de los tres espesores de aislamiento térmico será aquel a partir del cual la demanda energética no varíe sustancialmente.

Como hemos visto en el apartado anterior (fig. 3.2.5), la curva que describe la relación entre demanda energética y espesor de aislamiento térmico es logarítmica, con una asíntota en el valor de demanda cero. Así pues, cuando la pendiente de la gráfica se acerque a la horizontal, consideraremos que el espesor es el óptimo.

Del rango de valores seleccionado consideraremos óptimo el menor espesor a partir del cual la mejora de la demanda esperable no varíe más de un 20%.

3.3.4. P04. Espesor de la capa de aislamiento térmico del suelo

Se aplica el criterio descrito para el P03.

3.3.5. P05. Espesor del aislamiento térmico del cerramiento opaco de la fachada

Se aplica el criterio descrito para el P03.

3.3.6. P06. Transmitancia térmica U del vidrio

En este caso, el criterio es fundamentalmente económico. En principio, a menor valor de U mayor coste. No es una relación directa, ya que la U depende básicamente de la cámara y el coste de aspectos como los espesores de las hojas de vidrio (que no influyen en el valor de U).

Nos apoyamos en los datos aportados en la publicación del arquitecto Salvador Boada (Boada y Xairó, 2014).

Consideramos el valor máximo en $5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, que corresponde al vidrio con prestaciones térmicas más básicas. Por este motivo este valor será el óptimo, aunque a efectos prácticos siempre se irá como mínimo a un doble vidrio básico con cámara de aire, con valores en torno a 3.

El valor mínimo de la U de un vidrio disponible en el mercado (fig. 3.2.9) está en torno a 0.5, correspondiente a un vidrio triple con dos cámaras. Está en la zona de los más caros, por lo que será un valor pésimo. Consideraremos que no nos podemos acercar más al cero.

El rango entre $3,4$ y $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ agrupa la mayor cantidad de vidrios disponibles en el mercado, con un coste que podemos considerar intermedio entre el valor $5,7$ y el 1.

3.3.7. P07. Transmitancia térmica del marco

Consideramos también criterios económicos. Buscaremos el valor que más se acerque al óptimo considerado.

Consultadas bases de precios de fabricantes observamos que a menor transmitancia térmica mayor precio, dado que la calidad del marco aumenta.

El valor máximo de este parámetro es $5,7$, correspondiente a un marco metálico sin rotura de puente térmico. El coste de estos marcos está entre los más bajos, por lo que será el valor óptimo.

El valor pésimo es el que más se acerca a cero, ya que corresponde con marcos de mayor valor económico o a soluciones de más de un elemento (como una doble ventana, por ejemplo).

TABLA 3.3.1. PRECIOS DE CARPINTERÍAS DE ALUMINIO MARCA TECHNAL EN RELACIÓN A SU TRANSMITANCIA TÉRMICA. FUENTE: CATÁLOGOS DEL FABRICANTE

MODELO	RPT	U W/m ² .K	CLASE Permeabilidad aire	PRECIO €
CITAL	NO	3.57	C4	443
UNNO	NO	4.10	C4	671
FORMATHERMIC	SI	2.20	C4	561
OPTICA	SI	1.60	C4	739
UNOTHERMIC	SI	2.20	C4	791
UNICITY	SI	2.50	C4	890
SOLEAL	SI	1.30	C4	1341

NOTA: Valores aportados por el comercial de zona de Levante del fabricante. Fecha de consulta: 4/12/2016

3.3.8. P08. Absortancia de la cubierta

No existe un valor, a priori, que podamos considerar óptimo, ya que la elección de un acabado superficial como el color es un aspecto de diseño que no influye en temas geométricos o económicos.

Así pues, seleccionaremos los valores que nos aporten los mejores resultados.

Sabemos que los extremos son difícilmente alcanzables (absortancia máxima o nula) pero seleccionaremos el valor que minimice la demanda energética dentro del rango propuesto.

3.3.9. P09. Absortancia del cerramiento opaco de la fachada

Se aplica el criterio descrito para el P08

3.3.10. P10. Absortancia del marco de la carpintería exterior

Se aplica el criterio descrito para el P08.

3.3.11. P11. Masa de la fachada

Una masa mayor no implica necesariamente un mayor coste o un mayor consumo de espacio. Aun así, consideraremos óptimo el mínimo valor de masa que aporte los mejores resultados de demanda.

3.3.12. Masa de los forjados de la envolvente

Se aplica el criterio descrito para el P10.

3.3.13. P13. Factor solar del vidrio

Buscaremos el valor que minimice la demanda, manteniendo un mínimo de iluminación natural que debe atravesar el vidrio.

Por ello, limitamos el valor mínimo a 0,35, que corresponde a un g de 0,30. La razón es la disponibilidad de vidrios en el mercado (fig. 4.2.15) y la necesidad de que sigan cumpliendo con su función de iluminación natural.

El valor máximo es 1, correspondiente a un valor de g de 0,85.

3.3.14. P14. Factor de sombra en verano

El parámetro solo es aplicable al verano. Es adimensional.

El valor óptimo es 1, que corresponde a no colocar ninguna protección solar y por tanto el coste es nulo.

El valor pésimo lo establecemos en 0,2 por la misma razón que en el P13: la necesidad de mantener la radiación visible. Corresponde a una protección solar estacional, que únicamente elimina la radiación cuando aumenta la demanda energética.

3.3.15. P15. Ventilación

El parámetro de ventilación ha sido descartado como variable, por lo que su valor permanece constante en todos los edificios y corresponde con la ventilación exigida por el CTE, en el Documento Básico HS3 Calidad de aire interior.

3.3.16. P16. Infiltraciones de aire por huecos

El valor óptimo es $100 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, correspondiente a un hueco con pocas prestaciones de estanqueidad, por lo que tiene una permeabilidad al aire alta. Lo consideramos así porque es el tipo de marco más económico.

Es el considerado Clase 0 (UNE EN 12207, fig. 3.2.19)

El valor pésimo es $3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, correspondiente a un hueco Clase 4. Es la mínima infiltración de aire que consideramos y corresponde a carpinterías muy estancas y de gran calidad, lo que aumenta el coste.

3.3.17. P17. Transmitancia térmica lineal en los puentes térmicos

El valor óptimo es 1 W/mK , con una transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos alta.

El valor pésimo, correspondiente a la eliminación casi total de estos elementos, lo situamos en $0,1 \text{ W/mK}$.

Debemos también precisar que la cuestión meramente económica es coyuntural y sujeta a variaciones no siempre relacionadas con la complejidad en la construcción. Además, los límites tecnológicos actuales serán rotos gracias a la investigación científica, así que dejaremos abiertas la mayor parte de las posibilidades que la física permita.



Figura 3.4.1 Aula de informática del COAMU, utilizada para la realización de las baterías de simulaciones energéticas

3.4. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA DE ANÁLISIS PARAMÉTRICO APE₃

La batería de cálculos que debemos realizar para el análisis paramétrico hace imprescindible la aportación de una aplicación informática que automatice el proceso, reduciendo así los tiempos necesarios, tanto para la modificación de los modelos digitales de los edificios o casos, como de cálculo y almacenamiento de resultados.

Con ese objetivo creamos una herramienta informática que denominamos Análisis Paramétrico de Eficiencia Energética de Edificios, o APE₃, y que sirve como aportación a esta investigación.

El lenguaje de programación de la herramienta es Java¹ y utiliza el motor de cálculo de demanda energética de edificios de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (HULC), versión 1.0.1528.1109 (fecha de actualización 12 de julio de 2016)²

Esta herramienta ha sido elaborada por el autor en colaboración con el Colegio Oficial de Arquitectos de Murcia (COAMU), con su Ingeniero Informático D. Antonio Ros Rivas, responsable de la programación de APE₃.

Los cálculos han sido realizados en el aula de informática del COAMU, que dispone de 16 equipos PC, como vemos en la figura 3.4.1.

La herramienta modifica los valores de los 16 parámetros seleccionados de un modo automatizado partiendo del modelo digital del edificio original, que denominamos “semilla”. Cada batería de cálculos puede tener 10.000 casos, resultado de la variación combinada de todos los parámetros descritos en el apartado 3.2. Los tiempos de cálculo demanda energética por caso varían entre 30 segundos y 5 minutos, dependiendo fundamentalmente de la complejidad y tamaño del modelo.

Seguidamente exponemos las líneas generales del funcionamiento de la aplicación informática:

1 Disponible en <https://www.java.com/es>

2 Disponible en la web del CTE, en el siguiente enlace: <http://www.codigotecnico.org/index.php/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener>

El programa APE3 obtiene en formato Excel los resultados según el cálculo de demanda energética que realiza la herramienta HULC, en base a unos parámetros de cambio, una semilla y unos valores de entrada proporcionados por las combinaciones planteadas en los test uniparamétricos, las combinaciones según el Método Markof-Chain Monte Carlo o las combinaciones para la optimización del edificio.

Para ello, la herramienta realiza los siguientes pasos:

- 1.- Lee los parámetros de cambio.
- 2.- Lee los valores de la semilla asignados a los parámetros.
- 3.- Lee los valores de un caso que se quiere resolver.
- 4.- Crea una carpeta para el caso en ejecución.
- 5.- Crea, dentro de esta carpeta, un fichero donde realiza los cambios en los parámetros según los valores del caso.
- 6.- Ejecuta el cálculo en base al fichero que contiene los cambios indicados.
- 7.- Obtiene los resultados y los guarda en un fichero general de resultados.

Los pasos 1 y 2 los realiza una vez mientras que los pasos del 3 al 7 los realizara por cada caso de entrada proporcionado. El programa lee dos ficheros de entrada y devuelve una carpeta con varios ficheros por cada caso resuelto.

Ficheros de entrada

El primer fichero de entrada es el que contiene la estructura de archivo informático completa, según la herramienta HULC, con los valores de la semilla en los parámetros de cambio.

El segundo fichero de entrada es un fichero Excel (.xlsx), donde como primera línea establecemos en cada columna los parámetros de cambio, en la segunda línea están los valores de la semilla para cada uno de los parámetros y a partir de la tercera línea establecemos cada caso que queremos resolver asignado bajo cada columna el valor para el parámetro indicado en la primera línea.

Este segundo fichero también tendrá en la primera fila y tras las columnas de los valores de los parámetros (input) las columnas asignadas para los resultados que estarán inicialmente vacías.

Carpeta de Salida

Tras la ejecución de cada uno de los casos indicados, en el segundo fichero de entrada el programa crea una carpeta con el número del caso donde guarda los siguientes ficheros:

- Una copia del primer fichero de entrada que contenía la estructura completa según la herramienta HULC pero en vez de los valores de la semilla los parámetros tienen asignados los valores que tengan declarados en su fila de la Excel de entrada.
- El fichero de proyecto de HULC (.ctehexml) asociado para poder abrir un caso concreto con la herramienta y poder estudiarlo.
- Los ficheros que se obtienen tras el cálculo de la herramienta, incluido el que contiene los resultados.
- Otros ficheros temporales requeridos por la aplicación HULC.

Resultados

Una vez que ha finalizado la ejecución de un caso y creada su carpeta, el programa lee el fichero con los resultados obtenidos y los copia al segundo fichero de entrada (Excel) en la línea del caso ejecutado tras los valores de los parámetros asignados. De esta forma se identifica rápidamente los resultados según los valores de entrada.

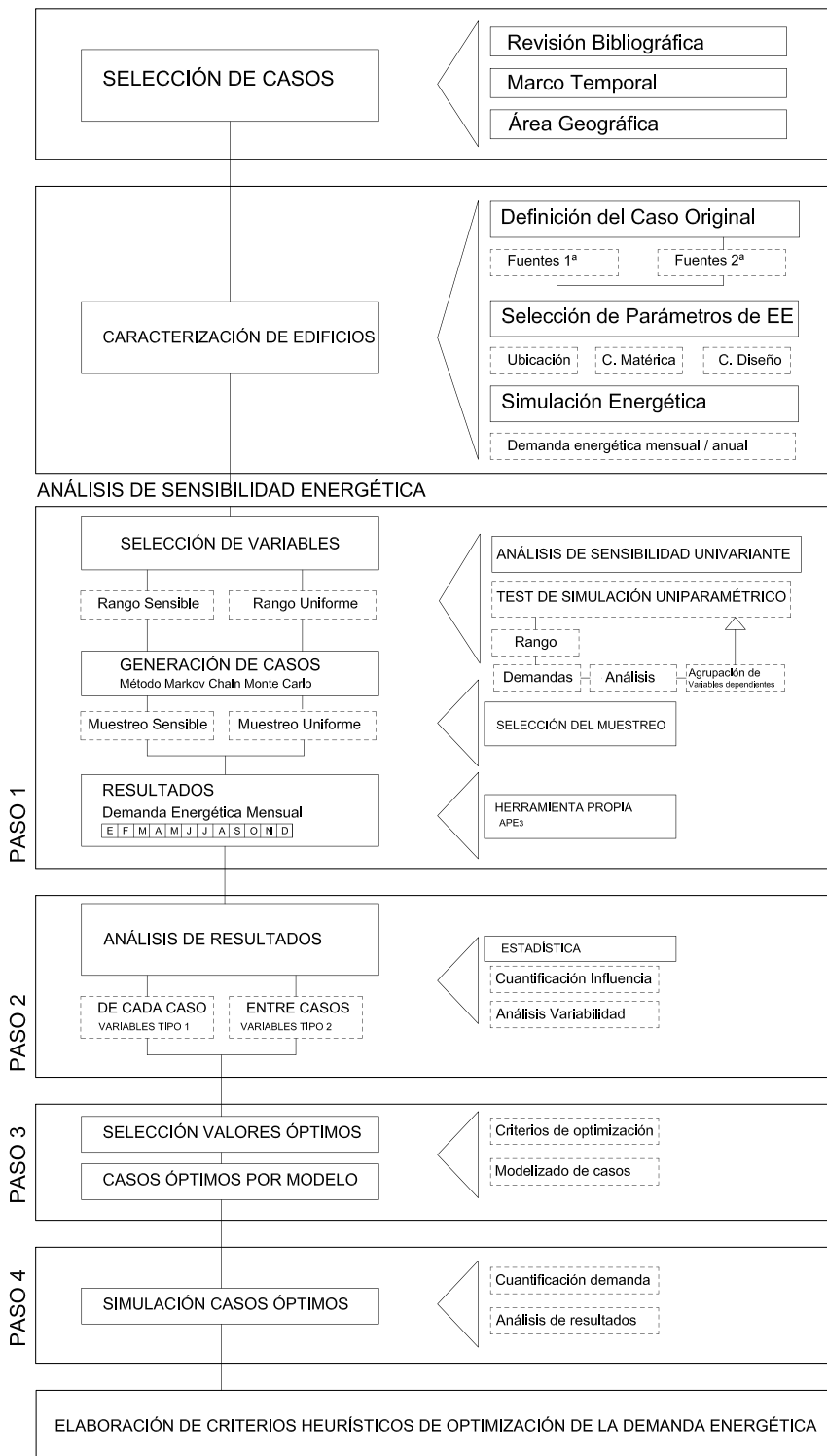


Figura 3.5.1 Esquema del procedimiento aplicado a la investigación. Elaboración propia

3.5. PROCEDIMIENTO

A continuación planteamos el procedimiento seguido para:

- Determinar la sensibilidad de la demanda energética de un edificio a la variación de los parámetros matéricos propuestos
- Buscar las combinaciones óptimas de los parámetros que minimicen la demanda energética del edificio.

Los edificios estudiados son cuatro modelos distintos del arquitecto Antonio Bonet Castellana, edificios originales a partir de los que hemos generado 20.420 edificios -que denominamos casos- distintos combinando al azar los valores de los parámetros en estudio mediante el Método de Monte Carlo.

Se han analizado en total más de 81.000 casos generados a partir de los cuatro edificios seleccionados.

El análisis lo realizamos en los tres periodos temporales que plantea el Código Técnico de la Edificación: invierno o calefacción (comprende los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre), verano o refrigeración (comprende los meses de junio, julio, agosto y septiembre) y un ciclo anual completo (comprende de los doce meses del año).

La cuantificación de la demanda de los casos se ha realizado con la herramienta aportada para esta investigación, APE3, descrita en el apartado 3.4. Utiliza el motor de cálculo de demanda energética de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER, El análisis estadístico se ha llevado a cabo con el software libre de análisis estadístico R, versión 3.2.4.

Previamente a iniciar el procedimiento para evaluar la influencia procedemos a la cuantificación y análisis de la demanda energética del edificio original con la aplicación informática de simulación energética de edificios seleccionada, la Herramienta Unificada LIDER-CALENER.

Exponemos y representamos los resultados.

3.5.1. Procedimiento aplicado a la investigación

El procedimiento se estructura en cuatro pasos (fig. 3.5.1):

- Paso 1. Generación de los casos utilizados en el análisis tras combinar al azar diferentes valores de los 16 parámetros de interés. Muestreo multiparamétrico.
- Paso 2. Cuantificación de la influencia de cada parámetro en la demanda energética del edificio.
- Paso 3. Selección de los valores (rango de valores) de cada parámetro que minimizan la demanda energética del edificio.
- Paso 4. Simulación de los casos con valores de los parámetros incluidos en los rangos obtenidos en el Paso 3 y optimización.

Paso 1. Generación de los casos utilizados en el análisis tras combinar al azar diferentes valores de los 16 parámetros de interés. Muestreo multiparamétrico

Para de elegir al azar el valor de un parámetro entre todos sus valores posibles consideramos dos opciones:

- i. Mediante muestreo uniforme: Cada valor del parámetro tiene la misma probabilidad de ser elegido
- ii. Mediante muestreo sensible: Cada valor del parámetro tiene una probabilidad de ser elegido proporcional a la variación de la demanda energética del edificio original a su alrededor.

Este segundo método muestreará más intensamente valores del parámetro para los que la demanda varía más. Sin embargo, con el muestreo uniforme es posible elegir muchos valores del parámetro en zonas donde no varía la demanda energética. Esto último daría lugar a generar una muestra de casos poco interesantes para comparar, que no ayudarían a ver el efecto del parámetro sobre la demanda. Por esta razón, pensamos que sería más útil comparar casos con valores de parámetros en zonas críticas que afectarían mucho a la demanda y propusimos el muestreo sensible. Dicho muestreo lo llevamos a cabo como sigue:

En primer lugar, variamos el valor del parámetro, manteniendo fijo el de los 15 parámetros restantes del edificio original y calculamos la demanda energética para cada valor. De esta forma obtenemos la función (f) que relaciona la demanda

energética del edificio original con el valor del parámetro. Observamos el sentido en el que se comporta la demanda en función de la variación del parámetro.

Dichas funciones se ilustran en las gráficas tipo 1 a (ver fig. 3.5.2, como ejemplo).

En segundo lugar, calculamos para cada valor (x) del parámetro la variación de la demanda energética del edificio original a su alrededor, $V(x)$, como sigue:

$$V(x_i) = \frac{|f(x_i) - f(x_i + 1)| + |f(x_i) - f(x_i - 1)|}{2}$$

y relativizamos dicha variación obteniendo el denominador peso, $p(x)$, del valor en el muestreo:

$$p(x_i) = \frac{V(x_i)}{\sum_i x_i}$$

En tercer lugar, calculamos la distribución de frecuencias de los valores del parámetro de forma que dicha frecuencia fuera proporcional a su peso. Estas son las denominadas gráficas Tipo 1b, (ver figura 3.5.3 como ejemplo).

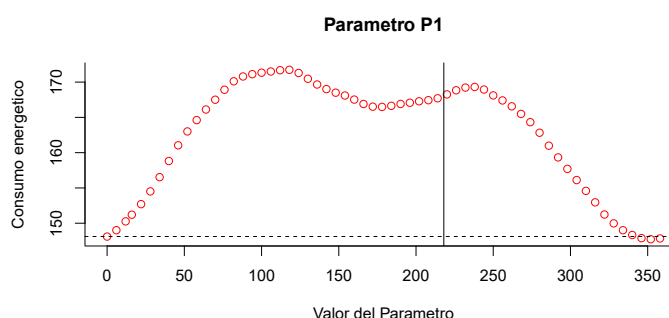


Figura 3.5.2 Ejemplo de la gráfica 1a de estimación de la demanda energética anual de los casos (edificios) correspondientes a distintos valores del parámetro 1 manteniendo fijos los valores de los 15 parámetros restantes del edificio original

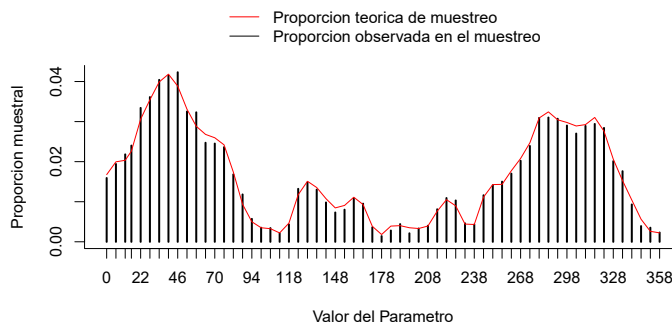


Figura 3.5.3 Ejemplo de gráfica 1b, con la distribución de frecuencias de los valores del parámetro 1 en el muestreo realizado para la obtención de 10.000 casos por cada modelo, en el muestreo sensible

Por último generamos una muestra de 10.000 casos combinando al azar los valores de los 16 parámetros de interés con el muestreo sensible. Además, generamos otros 10.000 casos con el muestreo uniforme y comparamos los resultados obtenidos con ambos muestreos.

Tras calcular la demanda energética media en función de la variación de cada parámetro en cada uno de los dos muestreos, observamos que, con el muestreo sensible, las zonas del parámetro con poca muestra (con menos número de casos) el modelo se estimaban mal, produciendo irregularidades de difícil explicación. Para corregirlo se optó por trazar una curva de regresión que ajustara las demandas energéticas medias pero esta opción arrojó irregularidades parecidas (ver figura 3.5.6 como ejemplo).

Por el contrario, con los casos del muestreo uniforme se cubría bien todo el rango del parámetro y los modelos resultaban más estables y parsimoniosos (ver figuras 3.5.4 y 3.5.5).

Por esta razón, a partir de ese momento, decidimos utilizar para nuestro análisis los 10.000 casos generados con el muestreo uniforme e ignoramos los casos generados con el muestreo sensible, que si nos sirven para ver en detalle el comportamiento del edificio en las zonas de máxima variabilidad.

Paso 2. Cuantificación de la influencia de cada parámetro en la demanda energética del edificio

En primer lugar, cuantificamos la influencia de cada parámetro por separado, sobre la demanda energética del edificio original en cada periodo temporal con un modelo de regresión simple de la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2$$

en el que la variable explicada (y) es la demanda energética y la variable explicativa (x) el parámetro.

El coeficiente de determinación del modelo (R^2) mide cuanto de las diferencias observadas entre las demandas energéticas puede explicar el parámetro. Su escala original está comprendida entre 0 y 1 y lo mostraremos en porcentaje.

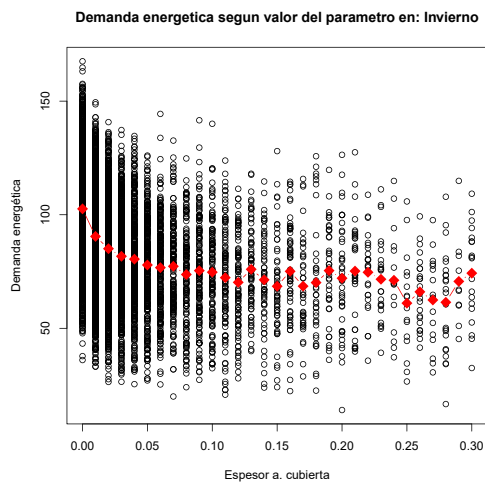


Figura 3.5.4 Muestreo sensible: Estimación de la demanda energética de calefacción y demanda energética media de calefacción de los 10.000 casos simulados para distintos valores de espesor del aislamiento térmico de la cubierta (parámetro 3) y los valores del edificio original en los 15 parámetros restantes. Valor del coeficiente de determinación igual a 16.6%.

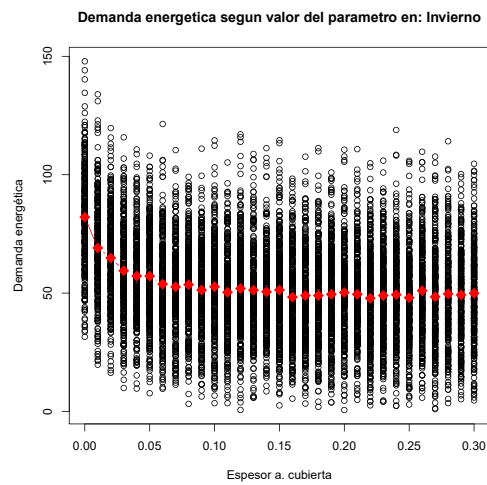


Figura 3.5.5 Muestreo uniforme: Estimación de la demanda energética de calefacción y demanda energética media de calefacción de los 10.000 casos simulados para distintos valores de espesor del aislamiento térmico de la cubierta (parámetro 3) y los valores del edificio original en los 15 parámetros restantes. Valor del coeficiente de determinación igual a 9.1%.

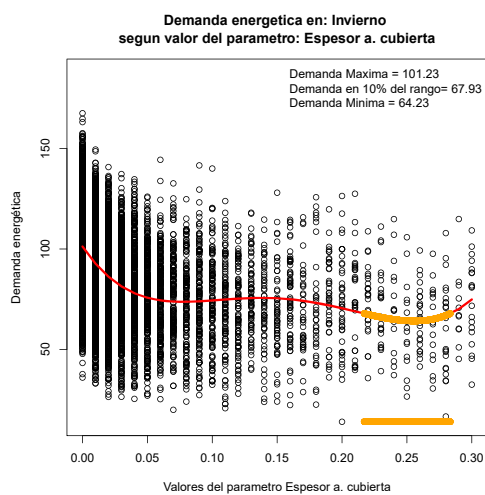


Figura 3.5.6 Muestreo sensible: curva de regresión de los valores medios de demanda energética en calefacción variando el parámetro P03

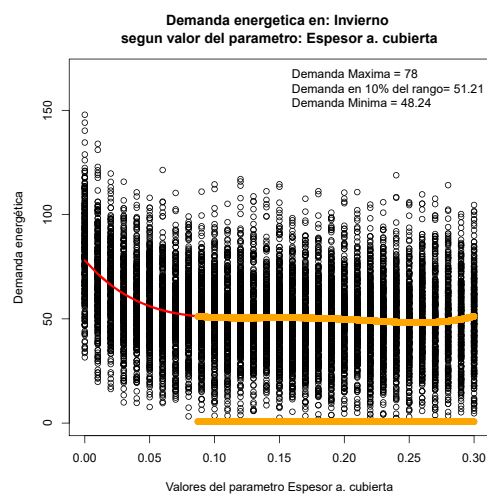


Figura 3.5.7 Muestreo uniforme: curva de regresión de los valores medios de demanda energética en calefacción variando el parámetro P03

Se calcula como el cociente entre la variabilidad de las demandas energéticas medias correspondientes a cada valor del parámetro (V_E) y la variabilidad total de las demandas energéticas (V_T), es decir:

$$R^2 = \frac{V_E}{V_T} \times 100$$

Un R^2 próximo a 100% indica que casi todas las diferencias encontradas entre las demandas de los casos se podrían explicar por la variación de ese parámetro. Por tanto la demanda energética de un edificio dependería mucho del valor que tomara dicho parámetro en él.

Un R^2 próximo a 0% indica que las diferencias encontradas entre las demandas de los casos no se podría explicar por la variación del parámetro. Por tanto el valor que tomara dicho parámetro en un edificio no influiría prácticamente en su demanda energética. Veamos un par de ejemplos gráficos:

En el primer ejemplo (figuras 3.5.8 y 3.5.9), el parámetro seleccionado es el espesor de aislamiento térmico en cubierta, con valor del coeficiente de determinación R^2 del modelo de regresión es igual a 28.5%. Esto indica que el 28.5% de las diferencias existentes en la demanda energética anual se debe a este parámetro, o lo que es lo mismo, que si todos los casos tuvieran el mismo espesor de aislamiento en cubierta las diferencias existentes en su demanda energética anual se reduciría en un 28.5%.

En el segundo ejemplo, (figuras 3.5.10 y 3.5.11) el parámetro seleccionado es la absorción α de fachada, con valor del coeficiente de determinación R^2 del modelo es igual a 0.2%, lo que indica que el 0.2% de las diferencias existentes en la demanda energética anual se debe a la absorción de la fachada, o lo que es lo mismo, que este parámetro no influye en la demanda energética anual del edificio original. Nótese en esta gráfica que, aunque la demanda energética anual de casos varía bastante de unos a otros, la demanda energética media anual es prácticamente la misma para los distintos valores del parámetro.

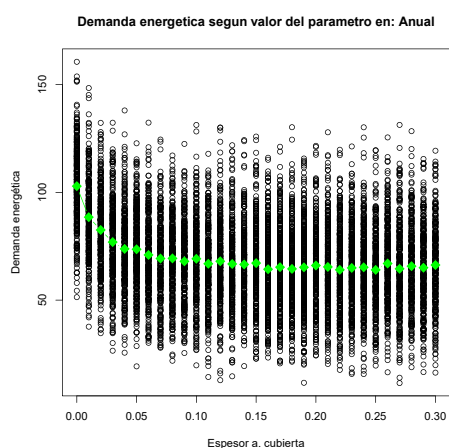


Figura 3.5.8 Estimación de la demanda energética anual y demanda energética media anual de los 10.000 casos simulados para distintos valores de espesor del aislamiento térmico de la cubierta (P03) y los valores del edificio original en los 15 parámetros restantes. Valor del coeficiente de determinación R^2 igual a 28.5%.

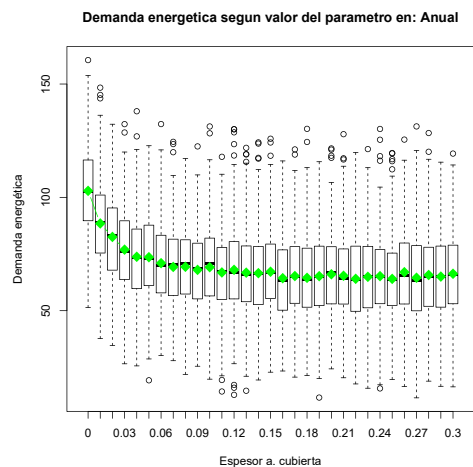


Figura 3.5.9 Boxplot -diagrama de caja- de la demanda energética anual y demanda energética media anual de los 10.000 casos simulados para distintos valores de espesor del aislamiento térmico de la cubierta (P03) y los valores del edificio original en los 15 parámetros restantes. Valor del coeficiente de determinación R^2 igual a 28.5%.

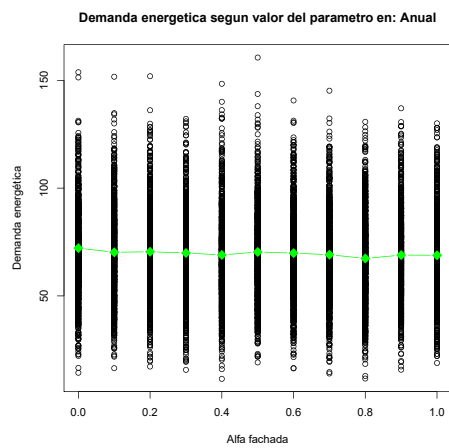


Figura 3.5.10 Estimación de la demanda energética anual y demanda energética media anual de los 10.000 casos simulados para distintos valores de alfa de fachada -absortividad- (P09) y los valores del edificio original en los 15 parámetros restantes. Valor del coeficiente de determinación igual a 0.2%.

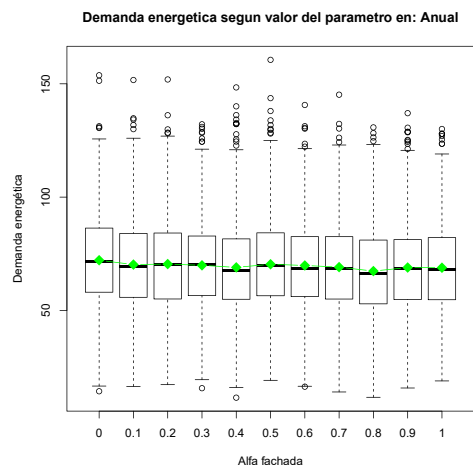


Figura 3.5.11 Boxplot de la demanda energética anual y demanda energética media anual de los 10.000 casos simulados para distintos valores de alfa fachada -absortividad- (P09) y los valores del edificio original en los 15 parámetros restantes. Valor del coeficiente de determinación igual a 0.2%.

En segundo lugar cuantificamos la influencia de cada parámetro, controlado por los 15 parámetros restantes, sobre la demanda energética del edificio original en cada periodo temporal. De esta forma nos aseguramos que la relación encontrada entre la demanda energética y el parámetro no está confundida por el resto de parámetros, lo que podría ocurrir si tanto la demanda energética como el parámetro estuvieran relacionados de alguna forma con el resto de parámetros.

Para ello planteamos dos modelos de regresión múltiple de la forma:

$$y_i = \beta_0 + \sum_i \beta_{i1} x_i + \sum_i \beta_{i2} x_i^2$$

en el que la demanda energética es la variable explicada (y) y las variables explicativas (x_i) son, en el primer modelo, los 16 parámetros en estudio y, en el segundo modelo, los 15 parámetros restantes. El coeficiente de determinación del primer modelo menos el del segundo medirá cuanto de la diferencia existente en demanda energética se puede explicar por el parámetro seleccionado, sin que esta cuantificación pueda estar confundida por el resto de parámetros.

Paso 3. Selección de los valores (rango de valores) de cada parámetro que minimizan la demanda energética del edificio

Buscamos la combinación de valores de los parámetros que minimiza la demanda energética del edificio en cada periodo temporal establecido.

Seleccionado un parámetro y un periodo temporal, y aplicamos el siguiente criterio de selección de la combinación de valores óptima

- En primer lugar calculamos la curva regresión que estima la demanda energética media para cada valor del parámetro (ver figura 3.5.8, como ejemplo).
- En segundo lugar, seleccionamos el valor del parámetro que minimiza la demanda energética media.
- Por último seleccionamos los valores del parámetro que dan lugar al 10% y al 20% de las demandas energéticas más próximas a la demanda energética mínima. De éste modo obtenemos dos rangos de valores óptimos (ver figura 3.5.12, como ejemplo). Los criterios de optimización que complementan este análisis están descritos en el punto 3.3.

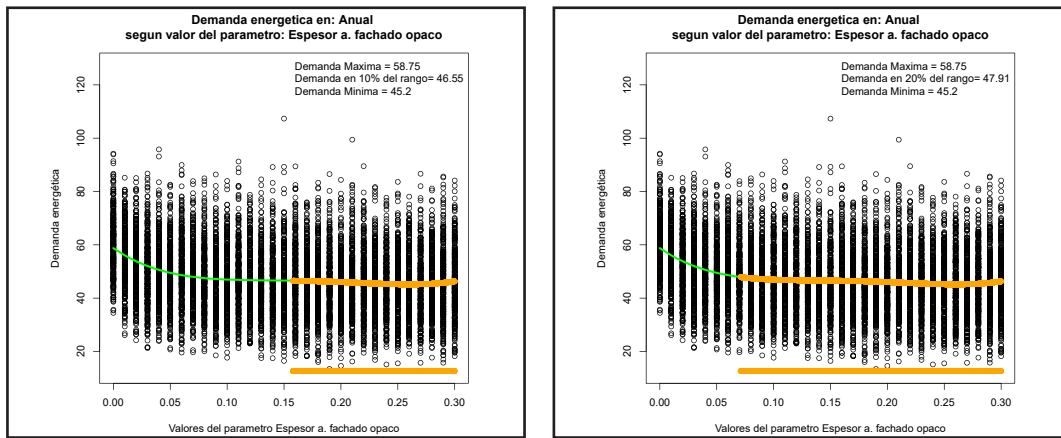


Figura 3.5.12 Selección de los dos valores óptimos de espesor de aislamiento térmico en fachada (P5). Izquierda variación máxima 10% (P5=15.5 cm), derecha variación máxima 20% (P5=7 cm)

Paso 4. Simulación de los casos con valores de los parámetros incluidos en los rangos obtenidos en el Paso 3 y optimización

En función del tipo de proyecto, los valores que optimizan la propuesta pueden variar. Si en un edificio a rehabilitar, por ejemplo, no disponemos de altura libre suficiente para aumentar aislamiento térmico por el interior de un forjado, el valor óptimo será el que minimice su espesor. En ese mismo caso será difícil aumentar la masa de los elementos constructivos, por lo que no será un parámetro que podamos modificar. En obra nueva es posible que la orientación nos venga impuesta por el planeamiento.

Con la combinación de los dieciséis valores óptimos de los parámetros construimos un modelo de edificio optimizado procedemos a la simulación energética y obtención de resultados.

Tras analizar los resultados extraemos los criterios heurísticos para la optimización matérica de los edificios.

3.5.2. Proceso de análisis de los resultados

Realizaremos los siguiente análisis:

- Analizar cuáles son los rangos de valores más sensibles a la variación energética del edificio

De cada uno de los parámetros en estudio mostrar y comentar las gráficas que ilustran los rangos de valores más sensibles a la variación energética del edificio. Lo haremos con las gráficas 1a y 1b (figuras 3.5.2 y 3.5.3)

- Analizar la influencia de cada parámetro en la variación de la demanda energética del edificio original durante todo el año, en verano y en invierno

1. Mostrar todas las gráficas de la estimación de la demanda energética y demanda energética media anual, en invierno y en verano de los 10.000 casos simulados para los distintos valores de cada uno de los parámetros y los valores del edificio original en los 15 parámetros restantes (fig. 3.5.13).

2. Mostrar los boxplot de la demanda energética y demanda energética media anual, en invierno y en verano de todos los parámetros (fig. 3.5.14).

3. Mostrar y comentar la tabla con los coeficientes de determinación R^2 de cada parámetro, indicando cuáles son más importantes optimizar para minimizar la demanda energética del edificio original (fig. 3.5.15).

4. Mostrar las gráficas complementarias (fig. 3.5.16).

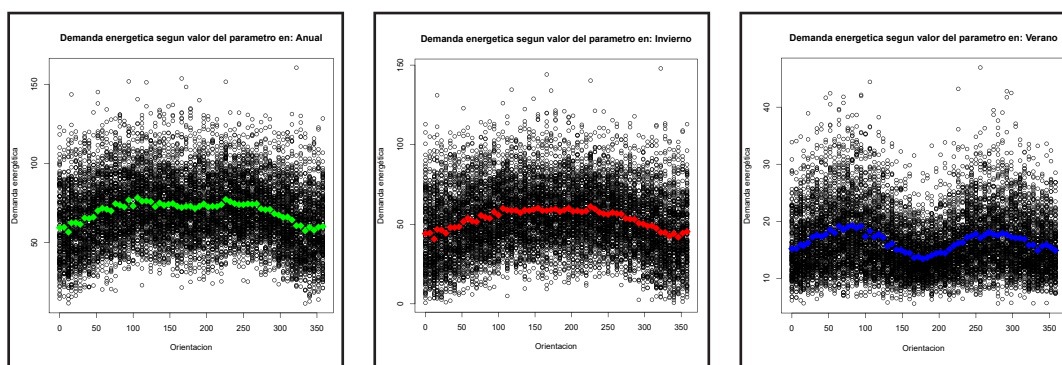


Figura 3.5.13 Ejemplo de gráficas de estimación de la demanda energética anual y demanda energética media anual de los 10.000 casos simulados para distintas orientaciones (parámetro P01) y los valores del edificio original en los 15 parámetros restantes.

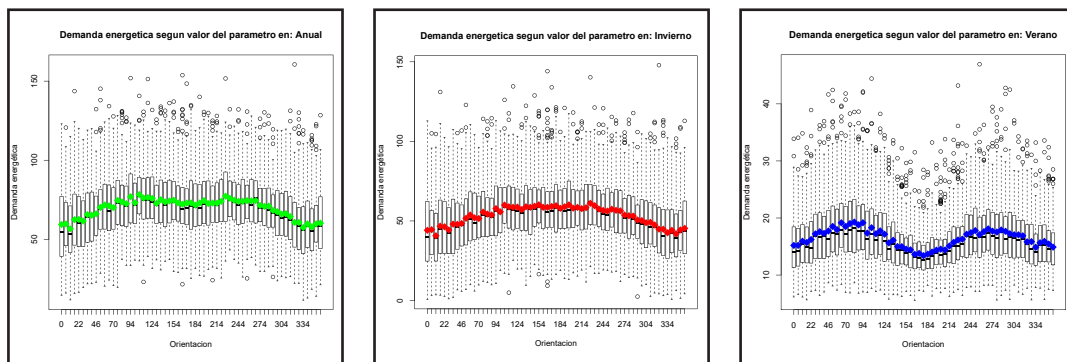


Figura 3.5.14 Ejemplo de diagramas de cajas o Boxplot de la demanda energética anual y demanda energética media anual de los 10.000 casos simulados para distintas orientaciones (parámetro P01) y los valores del edificio original en los 15 parámetros restantes.

	Par	CALEu	REFRu	ANUAu	CALEa	REFRa	ANUAa
ORIENTACION	P1	8.2	8.1	8.5	7.4	0.3	7.1
ALTITUD	P2	0.4	0.3	0.4	0.1	0.1	0.1
E CUB	P3	12.0	4.0	15.8	9.1	2.6	11.9
E SUELO	P4	13.0	0.3	13.1	9.6	0.1	9.8
E FACHADA	P5	5.8	0.4	5.9	5.8	0.1	5.8
U VIDRIO	P6	15.6	2.2	12.8	14.7	2.2	12.0
U MARCO	P7	2.8	0.5	2.3	2.7	0.4	2.2
g CUBIERTA	P8	1.0	7.6	0.2	1.0	7.8	0.1
g FACHADA	P9	1.0	3.6	0.3	0.9	4.1	0.2
g MARCO	P10	1.4	6.6	0.4	0.9	6.4	0.1
m FACHADA	P11	0.4	0.2	0.4	0.1	0.1	0.1
m FORIADO	P12	0.8	2.6	1.5	0.4	2.2	1.1
g VIDRIO	P13	18.8	16.7	10.7	17.2	15.4	9.8
FS VERANO	P14	0.0	25.3	2.0	0.0	25.3	1.9
INF. HUECOS	P16	0.6	0.3	0.8	0.6	0.1	0.7
PPTT	P17	19.6	6.6	26.1	19.4	7.2	26.3

Figura 3.5.15 Ejemplo de tabla de valores de los coeficientes de determinación (%) por separado (u) y ajustados por los demás parámetros en los periodos de calefacción, refrigeración y anual.

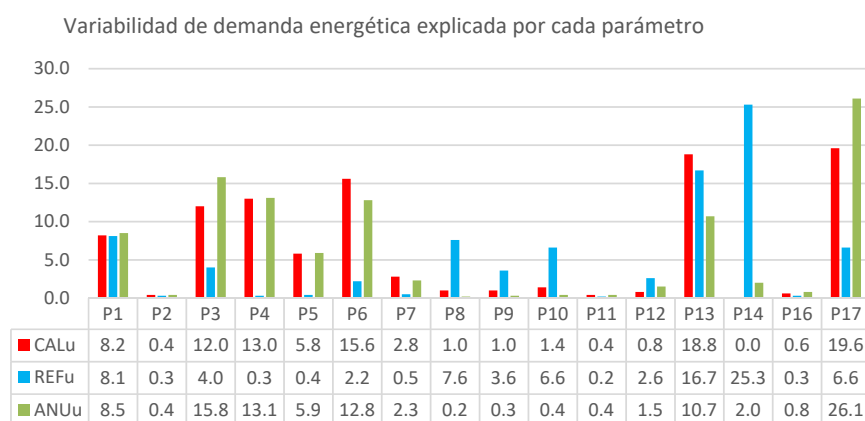


Figura 3.5.16 Ejemplo de representación gráfica de los coeficientes de determinación R² por separado (u)



3.6. SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Seleccionamos como modelos tres conjuntos residenciales proyectados por el arquitecto de la tercera generación del Movimiento Moderno en España, Antonio Bonet Castellana, ubicados en la costa de la Región de Murcia, que fueron proyectados y construidos entre los años 1960 y 1970.

Los tres conjuntos residenciales están situados en los primeros kilómetros de La Manga del Mar Menor, en el municipio de Cartagena. El plano de situación está reproducido en la figura 3.6.6.

3.6.1. Criterios de selección

Los motivos que nos llevan a seleccionar estos tres conjuntos residenciales son los siguientes:

- **El Arquitecto:** son obras proyectadas y construidas por Antonio Bonet Castellana, arquitecto que mostró, en sus propuestas y escritos, un claro interés por las cuestiones relacionadas con la arquitectura y el clima. Como hemos desarrollado en el apartado 2.4, desde sus inicios, Bonet estudió y expuso la relación entre la tipología arquitectónica y el clima y pertenece a la tercera generación, que fue la que se distanció de los inicios del movimiento y volcó su interés en la adecuación al entorno natural, el clima y el medio ambiente: *introdujeron con fuerza definitiva la relación de la arquitectura con el lugar* (Montaner, 2011)

- **El Movimiento Moderno.** Los tres conjuntos residenciales seleccionados siguen ciertas características propias de la arquitectura moderna, que recoge el manifiesto de Le Corbusier *“los cinq points d’une architecture nouvelle”*. Veremos propuestas de edificios sobre pilotes, fachadas blancas (también negras), libertad en el diseño de los huecos en muros constituidos por *“una fina membrana de ladrillos...”* como planteaba Le Corbusier (1924), o el uso de cubiertas planas, así como una preocupación por el lugar, las vistas y la relación con el sol, como apreciamos en el uso de protecciones solares móviles.

- **La época en la que se construyeron.** Los tres fueron construidos en la década de los 60. Han pasado más de cincuenta años desde su construcción y, o

se ha intervenido en los edificios o se intervendrá a corto plazo, ya que su vida útil está próxima a finalizar. El problema de estas intervenciones es que se hacen al margen del interés, de la obra como parte del patrimonio arquitectónico, y los tímidos intentos de protegerlo se ven truncados por acciones llevadas a cabo sin el necesario criterio arquitectónico en su rehabilitación. Para respetar y mantener las piezas queremos aportar criterios de intervención que aporten al arquitecto herramientas para mejorar el comportamiento del edificio sin arruinar la obra.

- **La tecnología constructiva. Las técnicas constructivas empleadas son similares en los tres conjuntos residenciales.** El escaso aislamiento térmico característico de esos años en zonas climáticas como la costa murciana -sin capas específicas en la envolvente o con vidrios monolíticos y huecos poco estancos-, nos servirá para contrastar los resultados de demanda energética con las críticas marcadas a esta construcción, para rebatir o confirmar su mal comportamiento térmico (véase Maldonado, 1990).

- **El uso estacional de las viviendas.** El uso al que está destinado un edificio es clave en lo que a energía se refiere. Hemos seleccionado conjuntos de viviendas de segunda residencia para uso turístico, enfocado principalmente al verano. Este programa marcadamente estacional fue considerado como un requisito básico a la hora de resolver el proyecto. Buscamos evaluar comportamientos energéticos tanto en condiciones de invierno y de verano.

A partir de esta selección, generamos los casos de estudio a partir de estos tres conjuntos, de los que obtenemos cuatro modelos que servirán para generar unos veinte mil casos de estudio cada uno.

Un modelo es un edificio seleccionado, tal como fue construido, entendido como un sistema integrado en funcionamiento. Un caso de estudio es una variación o modificación del modelo.

3.6.2. Fuentes

Obtenemos datos de los edificios mediante observación y experimentación, estudiando el contenido de las publicaciones, los proyectos originales y la obra construida, con visitas y trabajos de campo.

Fuentes primarias: realizamos inspecciones de los edificios construidos, realizando mediciones para el levantamiento gráfico y fotografías del edificio en la situación actual.

Fuentes secundarias: realizamos un estudio de publicaciones de la época, como la revista A.C., Documentos de Arquitectura Contemporánea o la revista Austral, así como bibliografía específica. Estudiamos los proyectos originales a través de las copias existentes en archivos históricos. Obtenemos información de los siguientes:

- El Arxiu Historic del Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña

Custodia fondos profesionales de cerca de cien arquitectos relevantes para la historia de la arquitectura. Desde 1969 se encarga de recuperar patrimonio documental relacionado con la arquitectura. Cuenta con cerca de 1.850.000 piezas documentales y posee fondos bibliográficos y proyectos originales del arquitecto Antonio Bonet Castellana. Contacto:

Web: <https://www.arquitectes.cat/es/arquitectes/departaments/arxiu>

Teléfono: 93 306 78 05

Fax 93 412 0 88

Correo electrónico: arxiuhistoricbcn@coac.cat

Horario: de lunes a jueves de 10 a 13 h.

Dirección: C/Arcs, 1-3, 4ª planta, 08002 Barcelona (España)

- Archivo Municipal de Cartagena

Nace con el propio ayuntamiento de Cartagena, en 1245. El primer documento conservado en el archivo es del año siguiente, en 1246. Conserva los proyectos arquitectónicos de los edificios que fueron sometidos a licencia. Hemos podido acceder a los proyectos originales de Antonio Bonet Castellana en La Manga del Mar menor. Contacto:

Web: <http://archivo.cartagena.es/>

Teléfono: +34 968 128 855

Fax: +34 968 508549

Correo electrónico: archivo@ayto-cartagena.es

Dirección: Parque de Artillería. Plaza del General López Pinto, s/n.
30201-Cartagena (España).

- Archivo de la Fundación DOCOMOMO Ibérico

DOCOMOMO es la sigla de *Documentation and Conservation of buildings, sites and neighbourhoods of the Modern Movement*. La fundación DOCOMOMO Ibérico tiene sede en Barcelona. Es una entidad creada en 1994 y dedicada a la documentación y conservación de la arquitectura del Movimiento Moderno en los territorios ibéricos, desarrollando una labor de investigación y documentación. Es parte de la fundación DOCOMOMO-internacional, fundada en 1990. Los registros tienen catalogadas un total de 23 obras en la Región, de las cuales 10 son edificios de viviendas, 11 de equipamientos y 2 industriales. Contacto:

Web: <http://www.docomomoiberico.com/>

Teléfono : 933 067 859

Correo electrónico: fundacion@docomomoiberico.com

Dirección: Plaza Nova, 5 2ª. Planta. 08002 Barcelona

- Archivo del Colegio Oficial de Arquitectos de la Región de Murcia

Encontramos las fichas de los expedientes colegiales de los proyectos originales. No se conservan copias de proyectos de ese año. Contacto:

Web: <http://www.coamu.es>

Teléfono : 968 213 268

Correo electrónico: coamu@coamu.es

Dirección: C/ Poeta Jara Carrillo nº 4. 30004 Murcia

- Web sobre el arquitecto y sobre La Manga del Mar menor.

Obtenemos información histórica de páginas web que recopilan datos y fotografías de la época. Destacamos las siguientes:

- El apartado *Banco de la memoria*, de la web www.lamangaturismo.com,
<http://www.lamangaturismo.com/bancodelamemoria/antonio-bonet/>

- Archivo fotográfico de La Manga del Mar Menor, con fotografías históricas de los años 1964 y 65, cuando se construyeron los edificios.

<http://www.archivofotograficodelamanga.com/>

- Antonio Bonet, web dedicada al arquitecto y dirigida por su hija Victoria.
<http://arquitectobonet.blogspot.com.es/>

- Nos apoyamos también en trabajos previos de investigación realizados y publicados por el autor.

3.6.3. Edificios seleccionados como modelo

Los conjuntos residenciales seleccionados son los siguientes:

Modelo 1. Apartamentos Maralet



Figura 3.6.1 Conjunto de viviendas Maralet. Arquitecto Antonio Bonet Castellana. Imagen de octubre de 1965. Fuente: Archivo fotográfico La Manga del Mar Menor

56 viviendas pareadas en planta primera. Planta baja diáfana.

Año de proyecto: 1964

Año de construcción: 1965

Situación: La Manga del Mar Menor km 0, salida 2, Cartagena

Fuentes: Archivo del Colegio de Arquitectos de Murcia N^o Gral.16.485

Arxiu historic del Colegio de Arquitectos de Cataluña

Archivo Municipal de Cartagena. Expediente CA 02565-18¹

Catálogo de Elementos Protegidos del PGMCO Cartagena². F. 160909

DOCOMOMO Ibérico. Referencia MU 03

1 No localizado

2 Anulado por sentencia TS de 29/12/2011

Modelo 2. Conjunto Hexagonal. Torre de viviendas

Del conjunto hexagonal vamos a obtener dos modelos: uno que estará basado en la torre de viviendas y otro en uno de los módulos del basamento.

El segundo modelo es la torre de viviendas de dieciséis plantas.



Figura 3.6.2 Imagen histórica del conjunto hexagonal. Arquitecto Antonio Bonet Castellana. Imagen de la época de construcción, en 1965. Fuente Docomomo Ibérico

Edificio de vivienda colectiva. 14 plantas más ático más planta baja diáfana.

Año de proyecto: 1963

Año de construcción: 1965

Situación: La Manga del Mar Menor km 0, salida 3, Cartagena

Fuentes: Archivo del Colegio de Arquitectos de Murcia N° Gral.16.868

Arxiu Historic del Colegio de Arquitectos de Cataluña

Archivo Municipal de Cartagena. Expediente CA 01146-48

Arxiu historic del Colegio de Arquitectos de Cataluña

DOCOMOMO Ibérico. Referencia MU 02

Catálogo de Elementos Protegidos del PGMO Cartagena. Ficha 160873

Modelo 3. Conjunto Hexagonal. Basamento

El tercero es uno de los hexágonos del basamento, módulo base de un sistema de agregación concatenada de piezas hexagonales de dos alturas, con planta baja diáfana, que va girando apoyándose en uno de sus lados.



Figura 3.6.3 Imagen histórica del conjunto hexagonal. Arquitecto Antonio Bonet Castellana. Fuente Docomomo Ibérico

Edificio de vivienda colectiva. Planta baja diáfana más dos plantas de viviendas.

Año de proyecto: 1963

Año de construcción: 1965

Situación: La Manga del Mar Menor km 0, salida 3, Cartagena

Fuentes: Archivo del Colegio de Arquitectos de Murcia N° Gral.16.868

Arxiu Historic del Colegio de Arquitectos de Cataluña

Archivo Municipal de Cartagena. Expediente CA 01146-48

Arxiu historic del Colegio de Arquitectos de Cataluña

DOCOMOMO Ibérico. Referencia MU 02

Catálogo de Elementos Protegidos del PGMCO Cartagena. Ficha 160873

Modelo 4. Edificio escalonado Babilonia

El cuarto es el módulo base de un edificio escalonado, de planta baja más tres plantas, pensado para repetirse linealmente a lo largo de la costa, en la dirección de la avenida principal de La Manga.



Figura 3.6.4 Imagen histórica del edificio escalonado Babilonia. Arquitecto Antonio Bonet Castellana. Imagen de la época de construcción. Fuente Docomomo Ibérico

Edificio de vivienda colectiva en bloque exento. 48 viviendas

Año de proyecto: 1964

Año de construcción: 1967

Situación: La Manga del Mar Menor, salida 18, Cartagena

Fuentes: Archivo del Colegio de Arquitectos de Murcia N^o Gral.44.092

Archivo Municipal de Cartagena. Expediente CA 00443-3

DOCOMOMO Ibérico. Referencia MU 04

Catálogo de Elementos Protegidos del PGMCO Cartagena. Ficha 160910



Figura 3.6.5 Situación de los tres conjuntos residenciales sobre una ortofoto de 1981. Elaboración propia sobre fotografía de www.cartomur.com



3.7. EDIFICIO 1. CONJUNTO DE VIVIENDAS MARALET

3.7.1. Antecedentes

Las viviendas Maralet son un conjunto de 56 viviendas unifamiliares pensado como frente de un complejo más ambicioso que podría extenderse en horizontal hasta el límite de las salinas del Mar Menor (Parra Martínez, s.f.). Proyectadas en 1964 y construidas en 1965, han llegado a la actualidad con múltiples alteraciones, aunque el conjunto se conserva completo.

Forman parte del repertorio arquitectónico ideado por Bonet para cada conjunto residencial que debían pautar la Manga. Los pequeños prismas pareados se desplazan e invierten su orientación.

El conjunto se sitúa al sur de La Manga del Mar menor, frente al conjunto de viviendas Hexagonal, que comenzó a construirse un año antes, finalizando ambos en 1965. Las viviendas avanzan hacia el Norte de la Manga y se orientan en el Noreste-Suroeste, con dos fachadas que miran una a levante, al Mediterráneo, y otra a poniente, al Mar Menor, alternativamente (fig. 3.7.1). Bonet duplica de forma simétrica la disposición de las piezas a ambos lados de un edificio comercial situado en el centro.

La agrupación de viviendas Maralet se compone de un módulo de dos viviendas tipo de unos sesenta metros cuadrados, orientados de modo alterno este-oeste para favorecer la privacidad y potenciar las vistas a los dos mares (fig. 3.7.5).

El módulo es un prisma compacto, desarrollado en planta primera: se separa del terreno sobre pilotis de acero, dejando la planta baja diáfana como un espacio sombreado, lo que permite el desarrollo de gran parte de la vida en verano en un espacio exterior que libera toda la parcela. Recuerda al tipo planteado en su etapa argentina, en el anteproyecto para viviendas rurales en zona cálida (fig. 2.6.3).

Una escalera exterior metálica individual, sirve de acceso a la vivienda y la conecta con la parcela.

Documentamos el conjunto mediante observación y experimentación, estudiando el proyecto original, el contenido de publicaciones relacionadas y la obra construida, con visitas y trabajos de campo.

Como fuentes primarias realizamos inspecciones del edificio construido, realizando mediciones para el levantamiento gráfico y fotografías del edificio en la situación actual (fig. 3.7.10).

Como fuentes secundarias, realizamos un estudio de publicaciones de la época, como la revista A.C., bibliografía específica y datos de archivos históricos, obteniendo planos del proyecto original en el Arxiu Historic del Colegio de Arquitectos de Cataluña, no pudiendo ser localizado en el Archivo Histórico de Cartagena, aunque si encontramos el número de expediente. La Fundación DOCOMOMO Ibérico¹ tiene el edificio catalogado, con la referencia MU03² (figuras 3.7.3 y siguientes)

Nos apoyamos también en trabajos previos de investigación realizados por el autor (Díaz Guirado, 2013).



Figura 3.7.1 Foto histórica del conjunto hexagonal. Fuente Docomomo Ibérico

1. Docomomo Ibérico es una entidad creada en 1994 y dedicada a la documentación y conservación de la arquitectura del Movimiento Moderno en los territorios ibéricos, desarrollando una labor de investigación y documentación. Es parte de la fundación DOCOMOMO-internacional, fundada en 1988.

2. Los registros del DOCOMOMO ibérico tienen catalogadas un total de 23 obras en la Región, de las cuales 10 son edificios de viviendas, 11 de equipamientos y 2 industriales.

3.7.2. Definición gráfica

Procedemos a realizar un levantamiento de planos para el estudio del edificio seleccionado. Utilizamos como base los planos originales de proyecto, redactado por Antonio Bonet Castellana, en febrero de 1964. Están representados en las figuras 3.7.7 y siguientes.

Este trabajo será la base del modelizado energético en el programa de simulación seleccionado. Para ello utilizamos la descripción gráfica completa del edificio y la definición de su envolvente térmica.

Encontramos la ficha original del expediente del Colegio de Arquitectos, del año 1965, con número general 16.485 (fig.3.7.2.). En observaciones indica que el proyecto fue visado en Madrid.

N.º General	16.485	N.º Part.	1
		AÑO	1965
Arquitecto autor	D. Antonio BONET CASTELLANA		
Director D.	" "		
Aparejador	D.		
Propietario D.	RIBENOR		
Domicilio			
Close de la obra	Proyecto de 56 Bungalows		
Emplazamiento	Mar del Mar Menor. -Cartagena.-Murcia		
Presupuesto	8.993.151'83	Ptas	
Los honorarios, en caso de no alterarse el presupuesto, ascienden a 505.864'77 Ptas.			
que se percibirá según tarifa	1.º Grupo	5.º %	4'50
			404.691'82
		Honorarios proyecto	202.345'91
		dirección	202.345'91
		50% Fuera Residencia	101.172'95

Figura 3.7.2 Ficha nº 16.485 del registro histórico del Colegio de Arquitectos de Murcia, del proyecto de 56 Bungalows, de Antonio Bonet Castellana

El promotor es RIBENOR S.A. y el presupuesto es de 8.993.151,83 ptas.

Reproducimos los planos originales de proyecto (escalados) en las figuras 3.7.3 y siguientes, con plantas que llegan a estar definidas a escala 1/20, con gran definición constructiva (fig. 3.7.4).

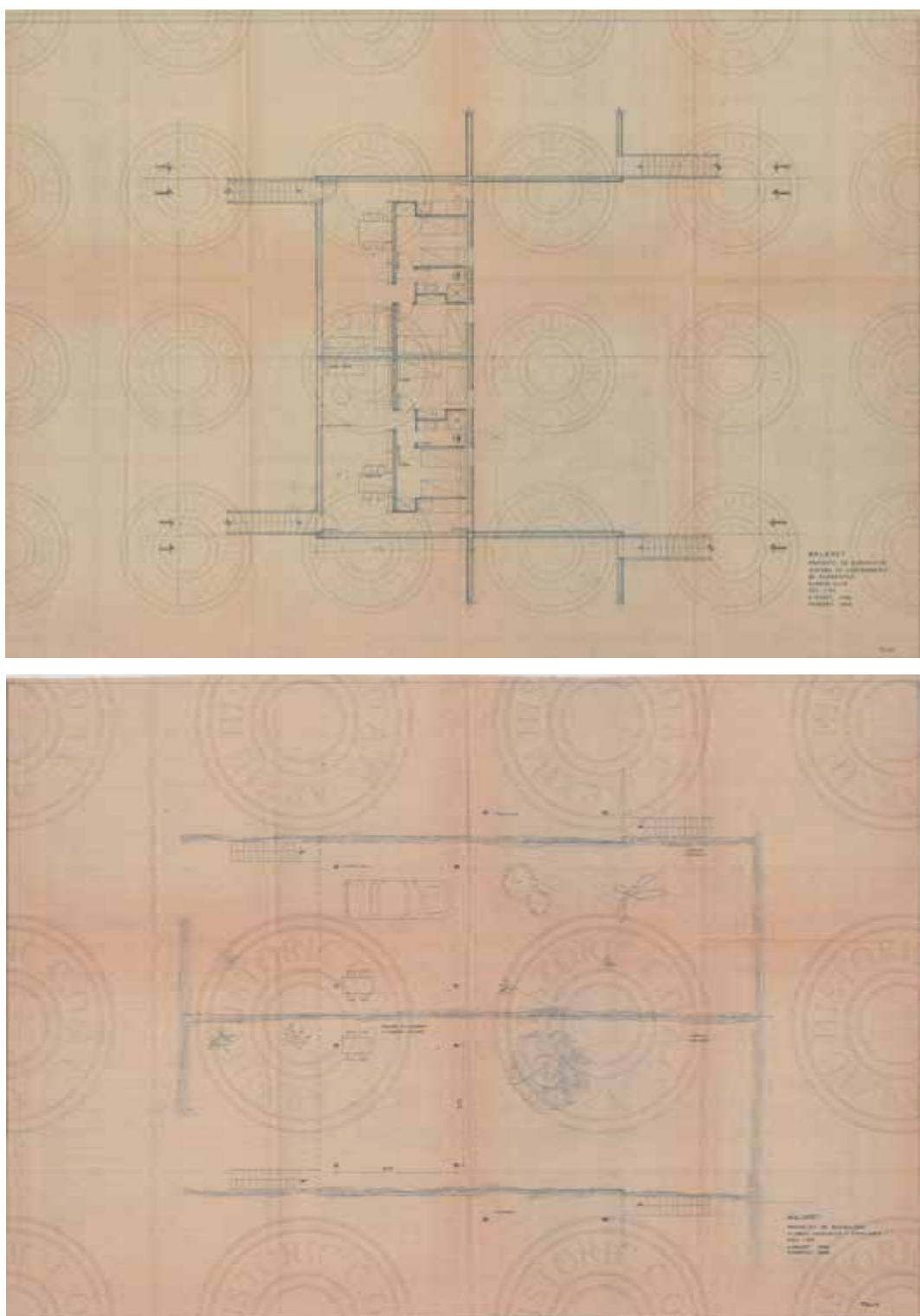


Figura 3.7.3 Planos del proyecto original del conjunto Maralet. Planos de planta alta y planta baja. Escala original 1/50. Fecha febrero 1964. Fuente: Arxiu Historic COAC

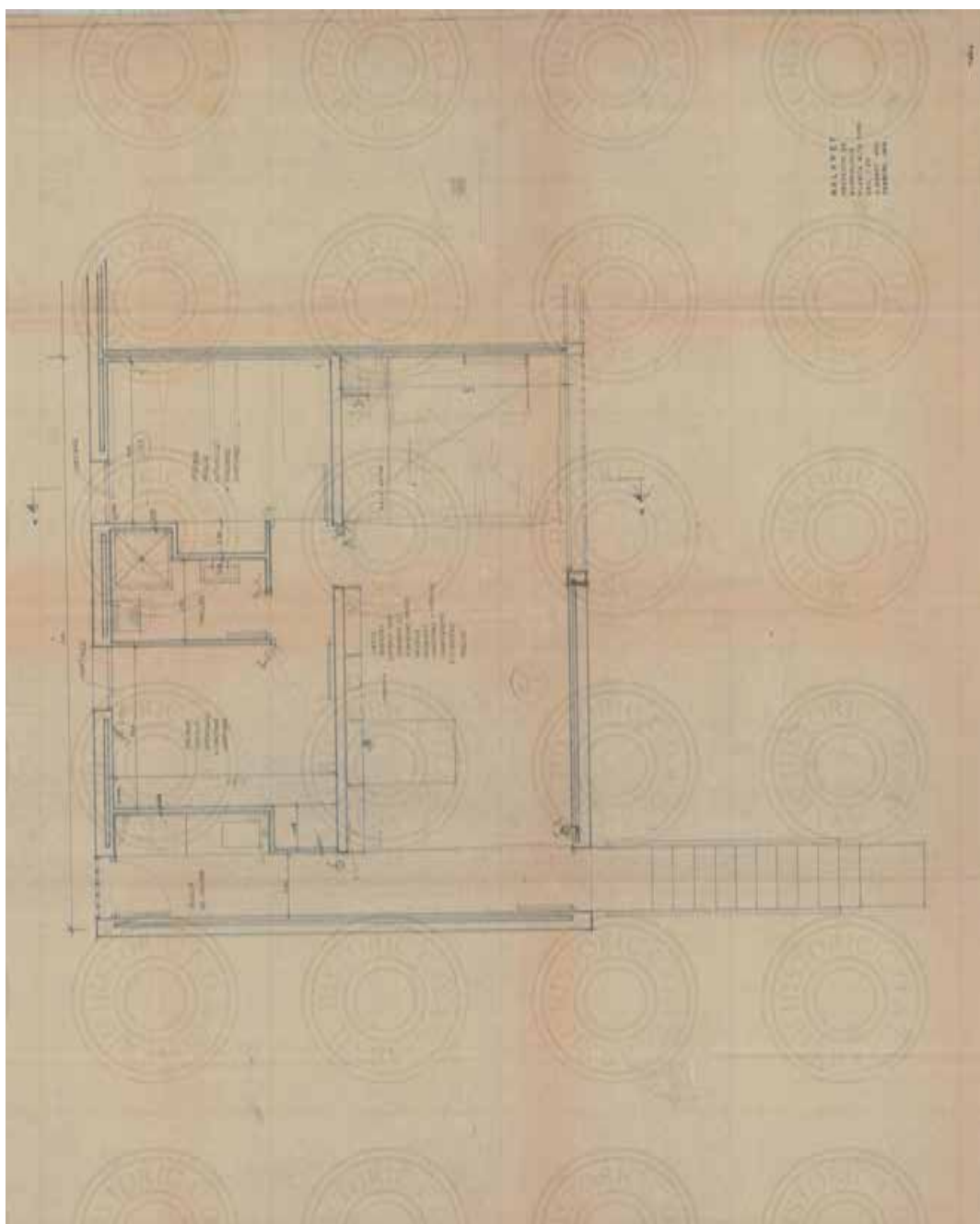


Figura 3.7.4 Plano del proyecto original del conjunto Maralet. Planta de una vivienda tipo. Escala original 1/20. Fecha febrero de 1964. Fuente: Arxiu Historic COAC

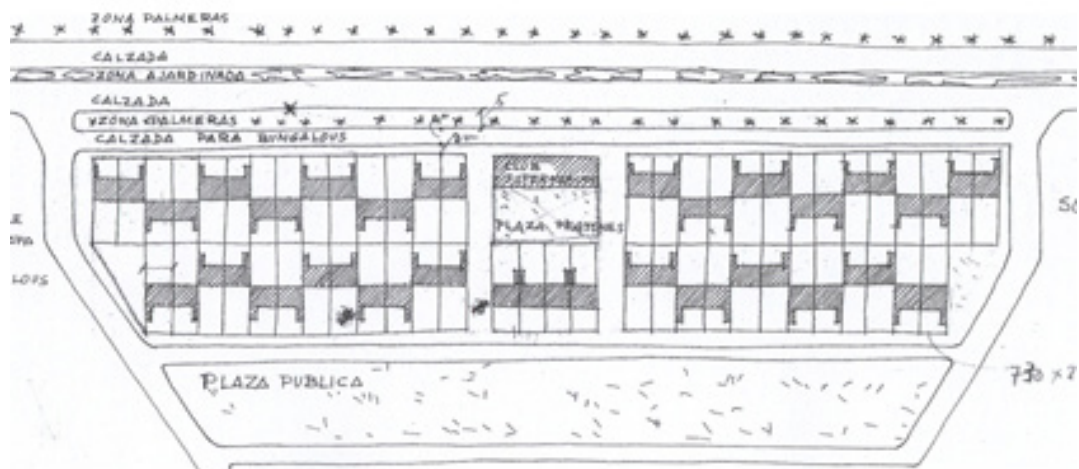


Figura 3.7.5 Plano de situación del conjunto de 57 bungalows y centro comercial. Fuente Docomomo Ibérico



Figura 3.7.6 Fotografía aérea de la agrupación, junto a la Torre Hexagonal. La Manga del Mar Menor. Fuente: Docomomo Ibérico

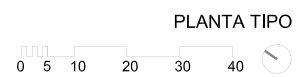
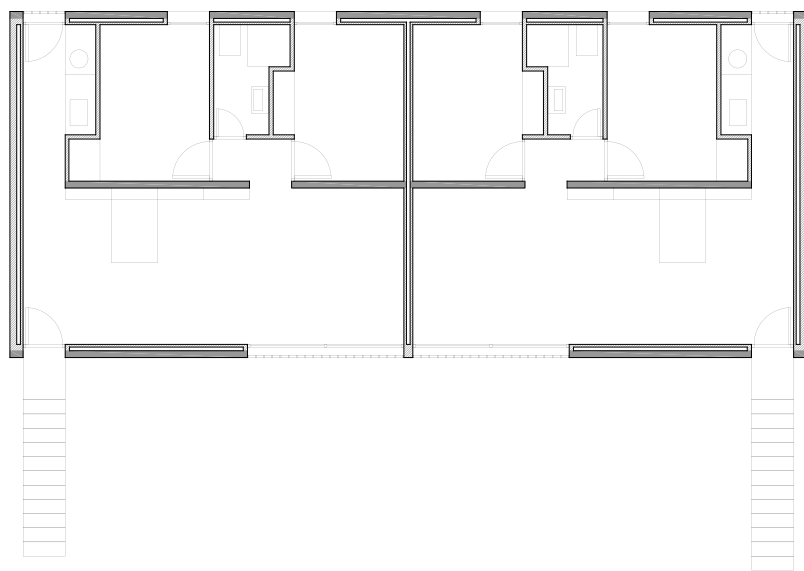
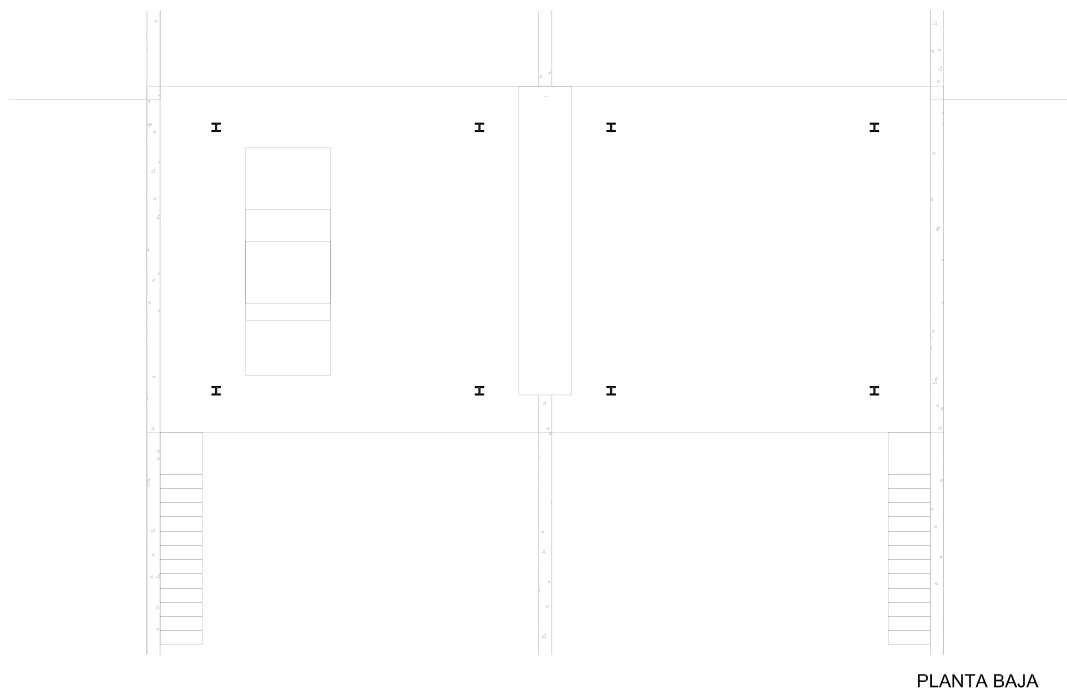


Figura 3.7.7 Planta baja y planta tipo de la agrupación de dos viviendas. Elaboración propia

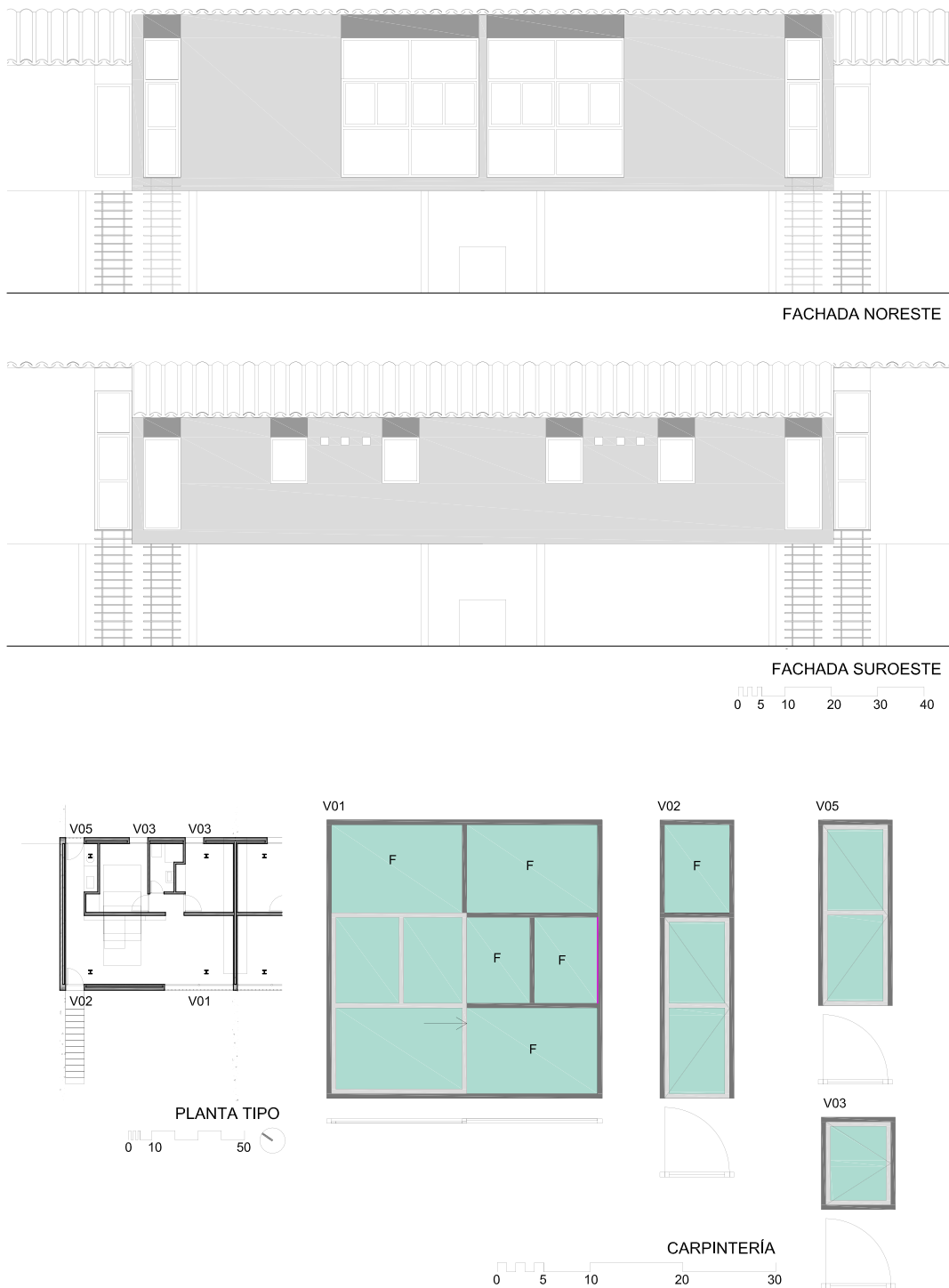
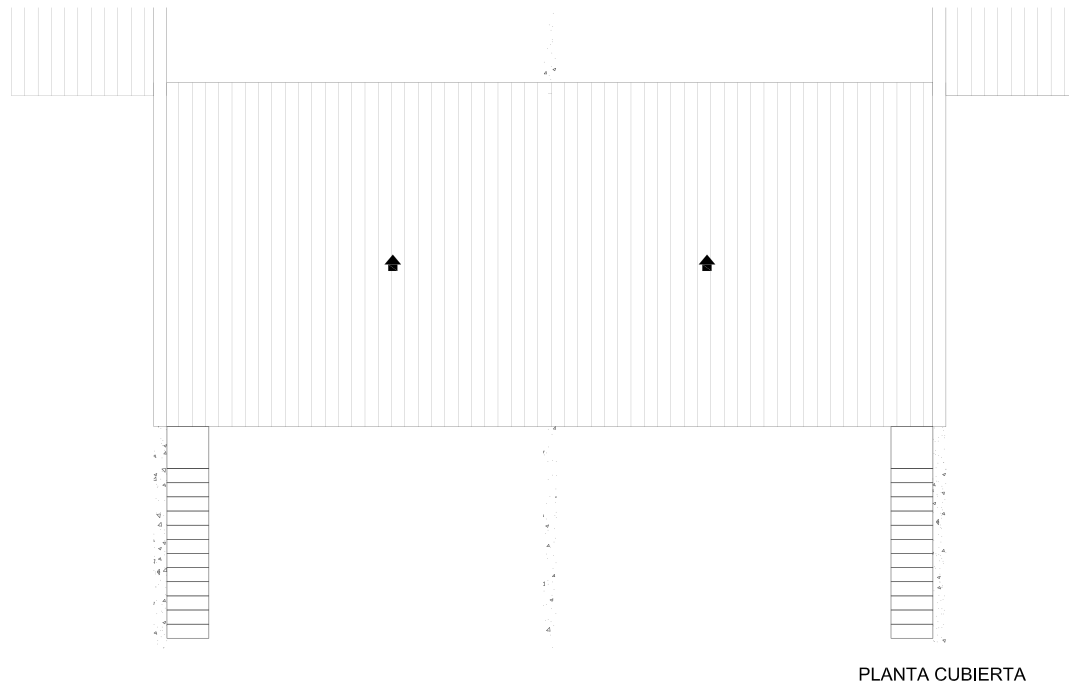
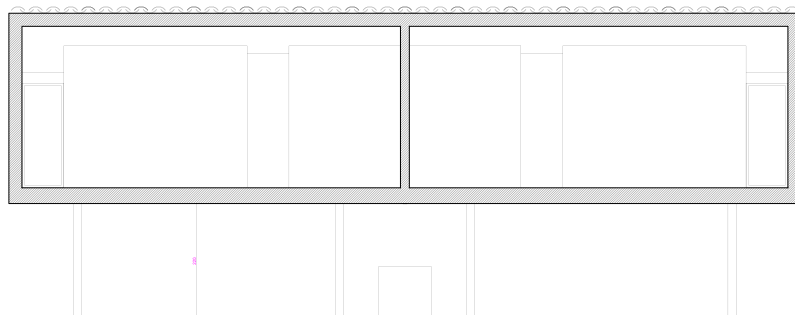


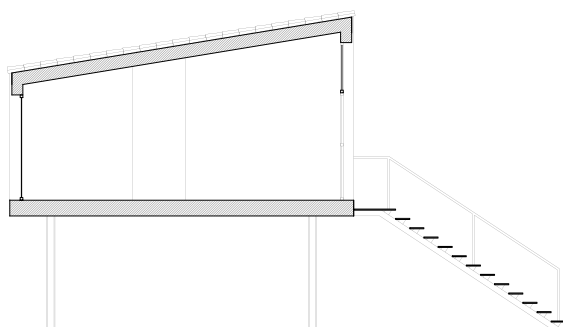
Figura 3.7.8 Planta de cubiertas, sección longitudinal y transversal. Elaboración propia



PLANTA CUBIERTA



SECCIÓN LONGITUDINAL



SECCIÓN TRANSVERSAL

Figura 3.7.9 Alzados y estadillo de carpintería. Elaboración propia a partir de los planos originales, fotografías históricas y estado actual.



Figura 3.7.10 Fotografías históricas del conjunto de viviendas Maralet. Fuente: Archivo fotográfico de La Manga del Mar menor y Docomomo Ibérico (superior izda.)



Figura 3.7.11 Fotografías de la toma de datos llevada a cabo por el autor en mayo de 2013

3.7.3. Definición constructiva

La toma de datos in situ completa la definición constructiva que hacemos a continuación (fig. 3.7.11.). El módulo tipo es un prisma compuesto por forjados unidireccionales de hormigón aligerados con bovedilla de hormigón.

La cubierta es inclinada a un agua, con una altura libre que va de 2,20 a 3,20 metros (fig. 3.7.9). El acabado es de teja curva sobre forjado plano de hormigón sin capa específica de aislamiento térmico y apoya en tres muros de fábrica cerámica, uno interior que separa zona de día de zona de noche y servicios y dos exteriores que conforman las fachadas que miran a los dos mares (orientaciones NE y SO). No es esa cubierta-jardín que preconizó Le Corbusier.

Los muros están contruidos con ladrillo de medio pie formato catalán de 15 cm de espesor, reforzado en las esquinas y extremos con trabas de un pie de espesor. Estos muros apoyan en el forjado de suelo de planta primera que es soportado por seis pilares de acero HEB 140, lo que levanta el edificio sobre una planta baja diáfana de 2,20 metros de altura libre. La fachada, apoyada sobre el forjado, permite un espacio interior diáfano, sin pilares en su zona de día. Se construye mediante dos hojas de ladrillo, el exterior es portante, trasdosado con ladrillo hueco simple y cámara de aire sin aislamiento.

Los soportes verticales de planta baja se retiran del perímetro, lo que otorga autonomía a los prismas de las viviendas. Estos pilotis no tienen continuidad en la planta primera. La solución constructiva busca aplicar los principios modernos pero comprometidos con las técnicas constructivas disponibles, ya que probablemente, por a escasa entidad de las piezas, optaron por hacer trabajar las fachadas de ladrillo y apoyar ahí el forjado de cubierta. Es de resaltar, por tanto, que no hay una libertad o independencia a completa entre la estructura portante y los cerramientos, al contrario que ocurre en el conjunto hexagonal, donde la estructura es independiente.

Es posible que la investigación desarrollada para argentina (publicado en la revista Austral), aconsejase evitar los excesos del soleamiento directo sobre los ocupantes de la vivienda, generando un espacio sombreado en planta baja (Díaz Guirado & Allepuz Pedreño, 2014).

El plano de planta a escala 1/20 de una de las viviendas, reproducido en la figura 3.7.4. y la inspección del edificio en su estado actual nos sirve para definir la construcción del modelo para la simulación.

TABLA 3.7.1. CONJUNTO MARALET. 57 BUNGALOWS. CARACTERIZACIÓN DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA DEL EDIFICIO ORIGINAL.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	U (W/m ² K)
FACHADA	Hoja exterior medio pie de ladrillo perforado, mortero de cemento 1cm, cámara de aire 5 cm y hoja interior de ladrillo hueco simple. Revestimientos continuos, exterior revoco color claro, interior enlucido de yeso.	U=1,27
CUBIERTA	Inclinada no ventilada revestimiento teja	U=1,89
SUELO	Forjado unidireccional de hormigón armado, con solado de terrazo sobre base tradicional	U=2,10
CARPINTERÍA	Madera	U=2,2
VIDRIOS	Monolítico transparente de 5 mm.	U=5,7 g=0,85

Compacidad 0.63. Volumen 118,8 m³, Sup. util una vivienda 44 m²

3.7.4. Estudio del caso. Procedimiento de obtención de datos aplicado

Aplicamos el procedimiento propuesto al primer edificio seleccionado. Buscamos analizar la influencia de los dieciséis parámetros matéricos propuestos para optimizar la demanda energética de un edificio determinado durante tres periodos: anual, calefacción -invierno-, refrigeración -verano-.

En primer lugar, cuantificamos la demanda energética del edificio original con la aplicación informática de simulación energética de edificios seleccionada. Para ello realizamos un modelizado digital. Utilizamos este primer edificio para calibrar y perfeccionar el procedimiento propuesto.

El archivo informático base del modelizado original lo denominamos Archivo semilla que es el Caso 0. La versión 22 es la que consideramos definitiva para llevar a cabo el procedimiento (fig. 3.7.12).

En la siguiente tabla expresamos los valores de los parámetros aplicados en el caso 0, edificio original, para la simulación.

TABLA 3.7.2. VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL CASO 0, MODELO 1
CONJUNTO DE VIVIENDAS MARALET, EDIFICIO ORIGINAL.

	ORIENTACIÓN	ALTITUD	e CUBIERTA	e Suelo	e FACHADA	U VIDRIO	U MARCO	α CUBIERTA	α FACHADA	α MARCO	m FACHADA	m FORJADOS	δ VIDRIO	FS VERANO	INF. HUECOS	PP.TT.
CASO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P16	P17
0	218	5	0	0	0	5.7	2.2	0.5	0.2	0.2	1140	1330	1	1	100	0.96

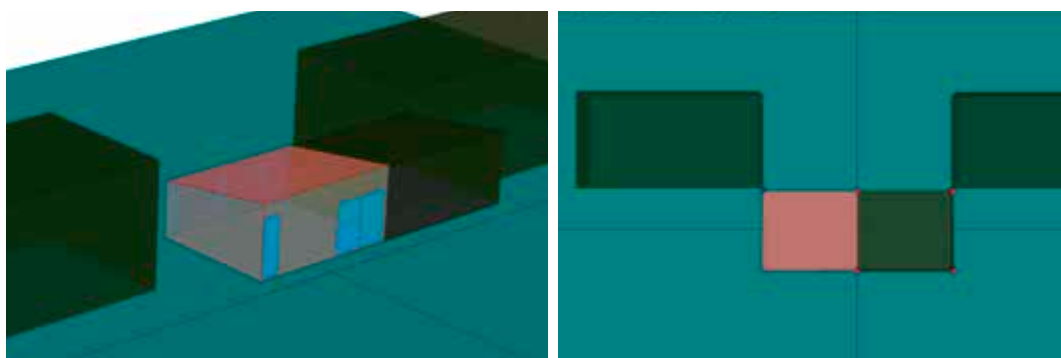


Figura 3.7.12 Modelizado en la herramienta de simulación HULC. Vista en planta y perspectiva.
Fuente: Elaboración propia

Paso 1. Generación de los casos utilizados en el análisis tras combinar al azar diferentes valores de los 16 parámetros de interés. Muestreo multiparamétrico

De cada uno de los parámetros en estudio determinamos los rangos de valores en los que el edificio se muestra más sensible a la variación de su demanda energética.

Realizamos los cálculos por medio de la aplicación informática aportada para la investigación, APE_3 , que utiliza el motor de cálculo de demanda energética de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER -HULC-.

Se realizan dieciséis test, donde variamos cada vez un parámetro, según se describe en el procedimiento, siendo un total de 417 casos. Los resultados se almacenan en una hoja de cálculo, reproducida en el anejo A2.1.1. y se ilustran en las figuras 1a del anejo A1.1. Obtenemos la demanda energética en función de la variación de cada parámetro seleccionado.

En primer lugar, generamos al azar 10.000 casos mediante el método de Markov-Chain Monte Carlo, asignando un mayor peso a los rangos de valores donde la pendiente es mayor (muestra mayor sensibilidad a la variación, por lo que lo denominamos *muestreo sensible*.)

Los casos generados se listan en el Anejo A.2.1.1. Son 10.000 casos con 16 variables, que son los valores asignados a los parámetros, y doce resultados mensuales, que agrupamos en anual, sumando los doce meses, calefacción, sumando los ocho meses de invierno y refrigeración, con la suma de los cuatro meses de verano.

En segundo lugar generamos un segundo muestreo donde la distribución de los valores de las variables se hace de modo uniforme (Anejo A.2.1.2). Se realiza también con el método Markov-Chain Monte Carlo y lo denominamos *muestreo uniforme*.

Paso 2. Cuantificación de la influencia de cada parámetro en la demanda energética del edificio

Cuantificamos la demanda energética de los 10.000 casos del muestreo sensible y los 10.000 del uniforme, con la herramienta APE_3 .

Se calcula la batería de casos propuesta para obtener las demandas energéticas de todos los casos. Se ha asignado un tiempo de cálculo por caso de 30 segundos, ya que el tiempo de cada caso es siempre menor, resultando un tiempo total de 166.67 horas en una computadora. Se utilizan multiprocesadores para optimizar el tiempo de obtención de resultados, dividiendo el tiempo por 16 procesadores, obteniendo los resultados en 10,41 horas.

Se obtienen los resultados en una hoja de cálculo con las 10.000 líneas de inputs y resultados por muestreo. Los reproducimos en el tomo de resultados, Anejo A2.1.

Cuantificamos, por separado y controlados por los demás, la influencia de cada parámetro, expresando numérica y gráficamente los resultados.

Reproducimos las tablas de resultados en el capítulo 4.1

Obtenemos los coeficientes de determinación R^2 de cada parámetro, de modo individual: se representan en los gráficos 3a y 3b del anejo A.1.1. (sufijo u: CALEu, REFu, ANUAu)

Obtenemos los coeficientes de determinación R^2 de cada parámetro controlado por los restantes: se representan en los gráficos 4a y 4b del anejo A.1.1., (sufijo a: CALEa, REFa, ANUAa), varianza explicada con Analysis of variance, ANOVA.

En el muestreo sensible apreciamos que las medias son menos continuas en la zona donde la selección de valores del parámetro fue menor, es decir, donde existen menos casos propuestos por el método MCMC. Parece que esa dispersión variará si acumulamos más resultados por lo que revisamos la metodología de análisis para corregirlo. Este hecho provocó, como hemos explicado, el planteamiento de un segundo muestreo uniforme.

Paso 3. Selección de los valores (rango de valores) de cada parámetro que minimizan la demanda energética del edificio.

Tras el análisis de los resultados seleccionaremos las combinaciones paramétricas más favorables.

Paso 4. Simulación de los casos con valores de los parámetros incluidos en los rangos obtenidos en el Paso 3 y optimización.

Una vez realizados los casos óptimos, los calcularemos y evaluaremos los resultados en el apartado 4.5.1.

3.8. EDIFICIO 2. CONJUNTO HEXAGONAL. TORRE

3.8.1. Antecedentes

El conjunto hexagonal es un complejo residencial que consta de una torre de dieciséis plantas y siete bloques de tres plantas, resueltos a través de una trama de hexágonos que van uniéndose por una de sus caras.

Bonet proyecta dos tipos de agrupaciones de vivienda en altura, resultado del primitivo Plan de Ordenación de La Manga del Mar Menor: la Torre Triangular y la Hexagonal. Ante la ausencia de condicionantes previos en un paisaje de dunas entre dos mares, Bonet se impone una fuerte condición geométrica.

La Torre Triangular utiliza mecanismos expresionistas para que el edificio se construya en base a la agregación de cédulas que constituyen el cuerpo del conjunto. Para la Torre Hexagonal y los edificios que forman todo el conjunto, plantea el crecimiento por agregación de piezas bajas que *“se engarzan con naturalidad y sirven de compensación a otras en altura”* (Cánovas & Amann, 2002).

Con proyecto de octubre del 63 (fig. 3.8.1), comenzó a edificarse poco antes que el conjunto Maralet, en el verano de 1964, terminándose en 1965. La torre, de planta hexagonal, se levanta sobre la parcela dejando la planta baja diáfana, descrita por el arquitecto en la memoria del proyecto como jardines cubiertos, en referencia a uno de los cinco puntos LeCorbusieranos del Movimiento Moderno europeo.

La fachada tiene una zona muy abierta y aterrazada, con un estar al aire libre y otra zona muy maciza, con paños verticales de huecos más contenidos. Bonet describe expresamente las protecciones solares que requieren estas terrazas para aprovechar los vientos dominantes y protegerse del soleamiento:

De la memoria del proyecto: *“COMPOSICIÓN EXTERIOR”*

“En su aspecto estético se tiende a una edificación con amplias terrazas de estar y otras terrazas cerradas mediante celosías, (...) contrastan con la forma de edificación abierta amplios paños verticales sin huecos. Las plantas bajas se han tratado a base de jardines cubiertos, vestíbulos amplios, zonas de vestuario, locales comerciales tipo supermercado y aparcamientos con un Bar y Cafetería.”

Figura 3.8.1 Izda. Cajetín del plano 1 y sello de visado del proyecto original, firmado por el arquitecto autor, Antonio Bonet Castellana. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena



Figura 3.8.2 Fotografía aérea histórica de la Torre Hexagonal. La Manga del Mar Menor. Fuente: Docomomo Ibérico



Figura 3.8.3 Fotografía histórica octubre de 1965. Vista de la Torre Hexagonal desde una vivienda del conjunto Maralet. Fuente: archivo fotográfico de La Manga del Mar Menor



Figura 3.8.4 Fotografía histórica octubre de 1965. Vista de la Torre Hexagonal desde el conjunto Maralet. Fuente: archivo fotográfico de La Manga del Mar Menor

“Resguarda de los vientos de levante por los cuerpos exagonaes (sic) que componen las viviendas de edificación baja,...

Los huecos de fachada van previstos de persianas pivotantes.”

Bonet prevé un original sistema de ventilación cruzada entre viviendas, mediante la colocación de puertas de acceso a cada vivienda con doble hoja, que permite una apertura parcial, a modo de celosía de madera, dejando pasar el aire. Al abrir parcialmente dos o tres puertas de viviendas en un rellano se crea un flujo de aire que ventila naturalmente las viviendas entre sí (fig. 3.8.5).



Figura 3.8.5 Arriba, fotografía del rellano, con puertas de acceso a viviendas y ascensores. Abajo, fotografía de la puerta de acceso a la vivienda desde el interior, cerrada y abierta para ventilación cruzada. Fuente: el autor

3.8.2. Definición gráfica

Procedemos a realizar un levantamiento de planos para el estudio del edificio seleccionado. Utilizamos como base los planos originales de proyecto original, consultado en el Archivo Municipal de Cartagena (fig. 3.8.12 y siguientes).

En el Arxiu Historic del Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña encontramos también planos de planta, alzados y de la estructura (fig. 3.8.19 y 20).

Estos planos serán la base del modelizado energético en el programa de simulación seleccionado. Definimos su geometría y su envolvente térmica.

La Fundación DOCOMOMO Ibérico tiene catalogado el edificio, con la referencia MU02.

Encontramos la ficha original del expediente del Colegio de Arquitectos, del año 1965 con número general 16.868 (fig.3.8.6.). En observaciones indica que el proyecto fue visado en Madrid el 8 de enero de 1964, con el número 25.491/63.

El promotor es RIBENOR S.A. y tiene un presupuesto de 26.208.820 ptas.

Reproducimos en primer lugar los planos del proyecto original, escalados, con fecha de octubre de 1963 (fig. 3.8.7 y siguientes).

N.º General 16.868	N.º Part. 2
AÑO 1965	
Arquitecto autor D. Antonio BONET CASTELLANA	
* Director D. " " "	
Aparejador D.	
Propietario D. RIBENOR S.A.	
Domicilio	
Clase de la obra Proyecto de torre exagonal.	
Emplazamiento La Magga del Mar Menor.-Cartagena.-Murcia.	
Presupuesto 26.208.820'00 Ptas.	
Los honorarios, en caso de no alterarse el presupuesto, asciende a 1.474.246'12 Ptas.	
que se recibirá según tarifa 1ª Grupo 5ª %4'50 1.179.396'90	
Honorarios proyecto 589.698'45	
50% Fuera de Residencia? dirección 589.698'45	
294.849'22	

Figura 3.8.6 Anverso de la ficha nº 16.485 del registro histórico del Colegio de Arquitectos de Murcia, del proyecto de la torre hexagonal, de Antonio Bonet Castellana

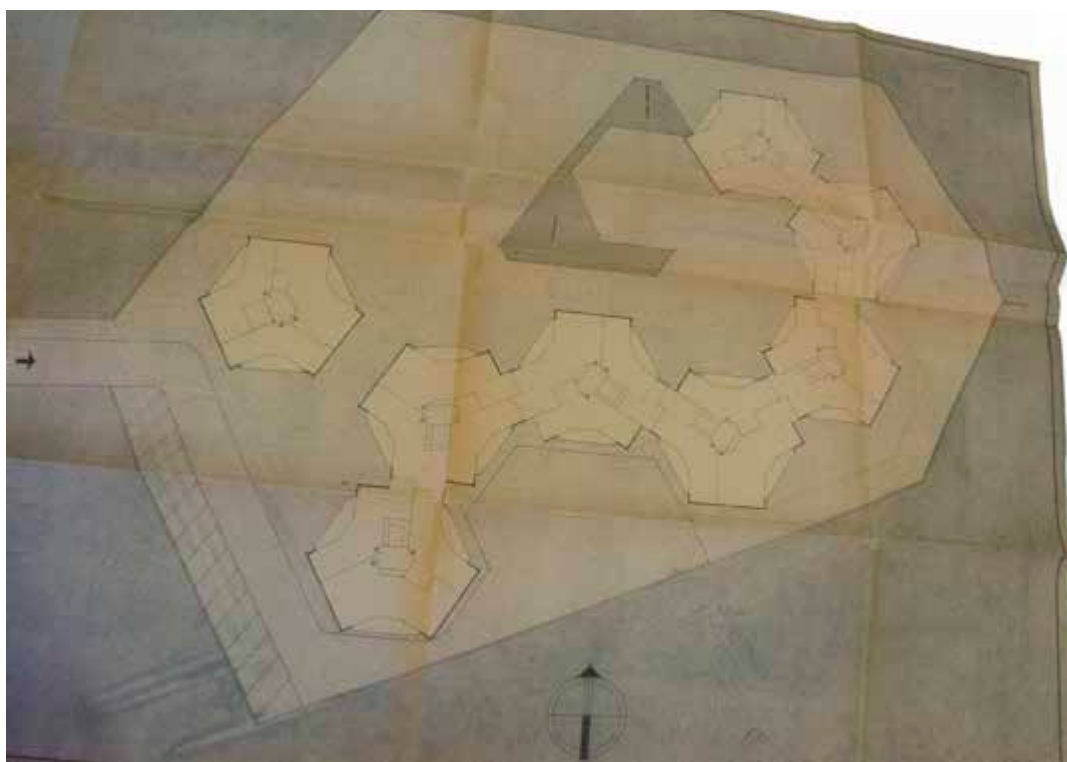
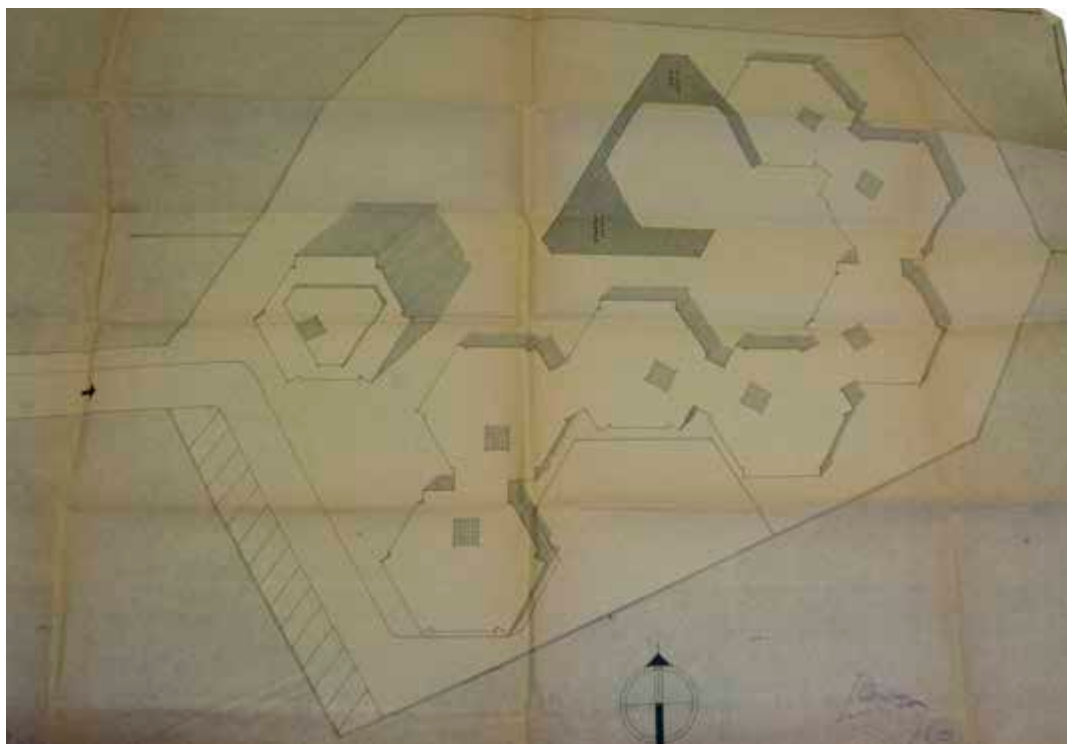


Figura 3.8.7 Plano del proyecto original edificio Hexagonal. Antonio Bonet Castellana. Plano de cubiertas y general de plantas bajas. Escala original 1/200. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

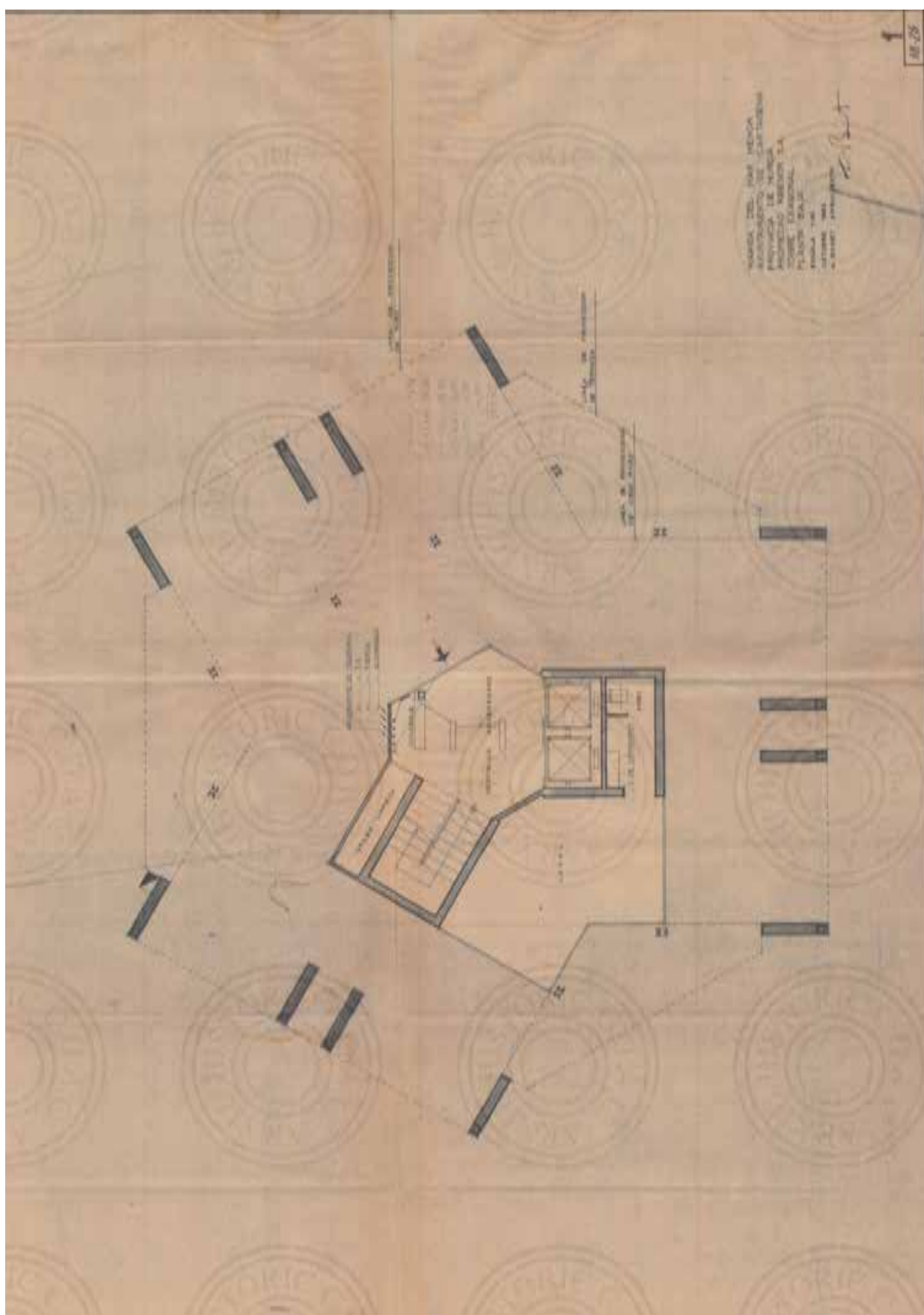


Figura 3.8.8 Planos del proyecto original de la Torre Hexagonal. Antonio Bonet Castellana. Plano de planta baja. Escala original 1/50. Fecha octubre de 1963. Fuente: Arxiu Historic COAC

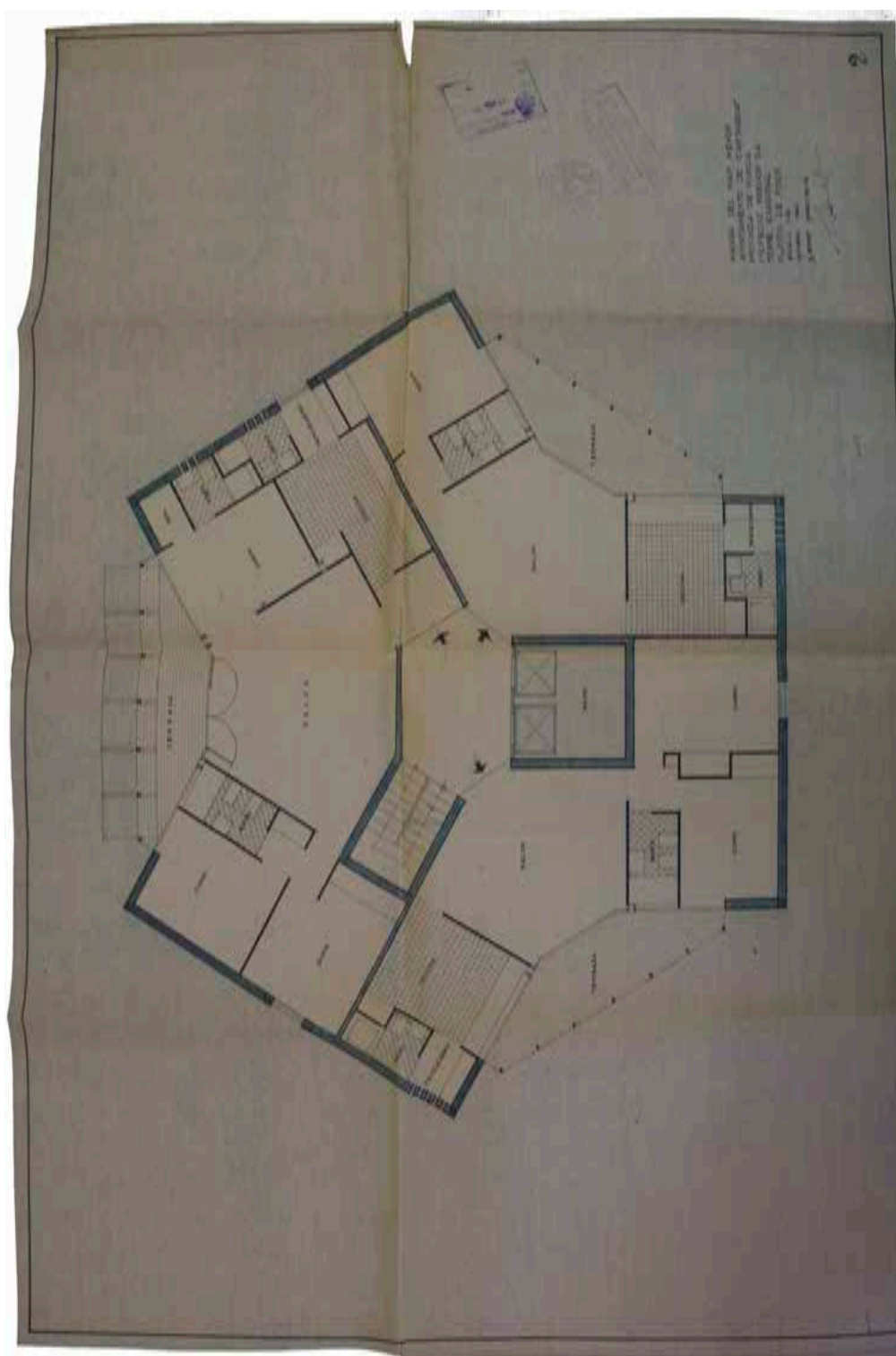


Figura 3.8.9 Planos del proyecto original de la Torre Hexagonal. Antonio Bonet Castellana. Plano de planta tipo. Escala original 1/50. Fecha octubre de 1963. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena

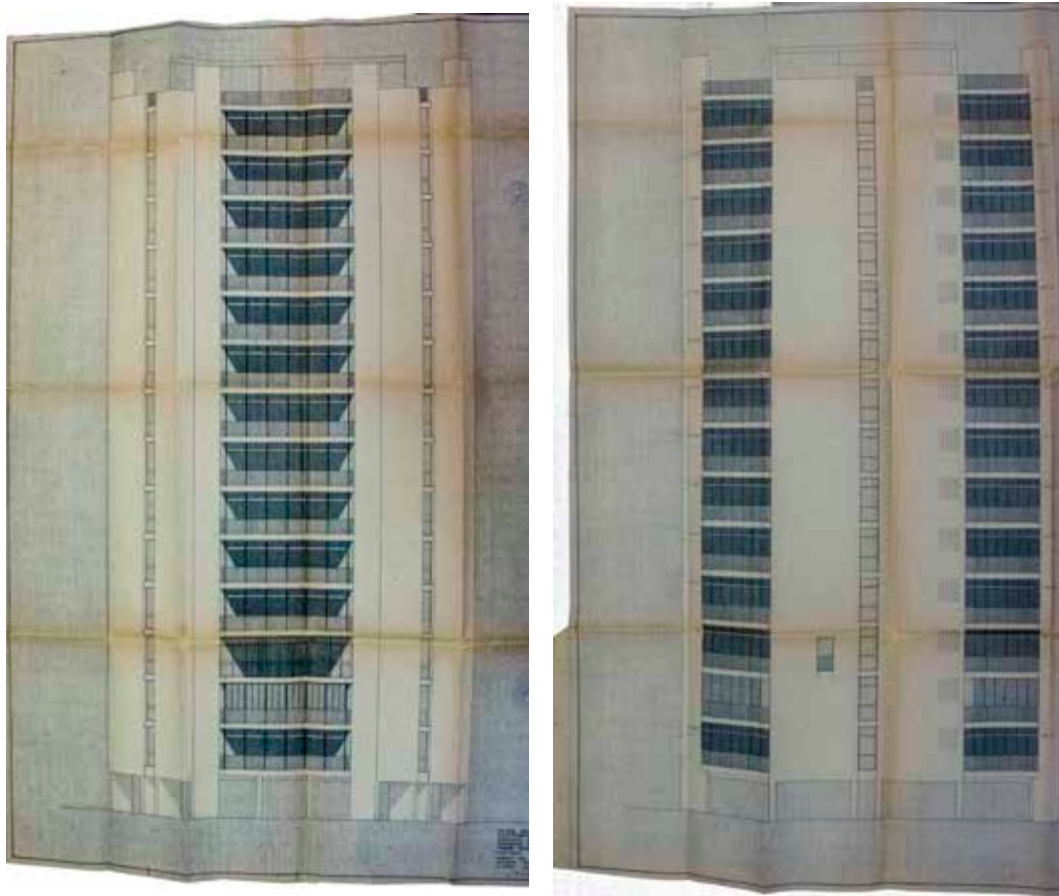


Figura 3.8.10 Planos del proyecto original de la Torre Hexagonal. Antonio Bonet Castellana. Planos de alzado. Escala original 1/50. Fecha octubre de 1963. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

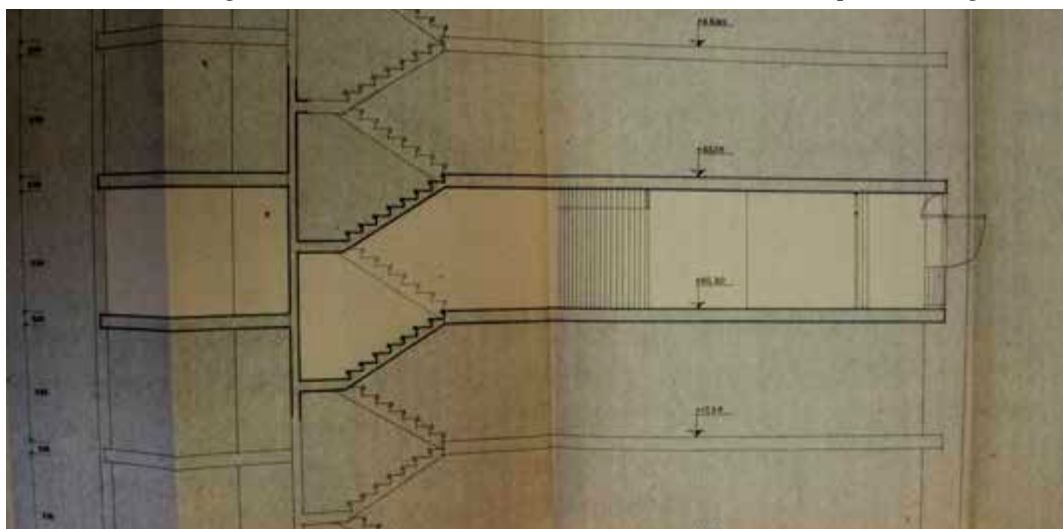


Figura 3.8.11 Planos del proyecto original de la Torre Hexagonal. Antonio Bonet Castellana. Extracto de un plano de sección acotada. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

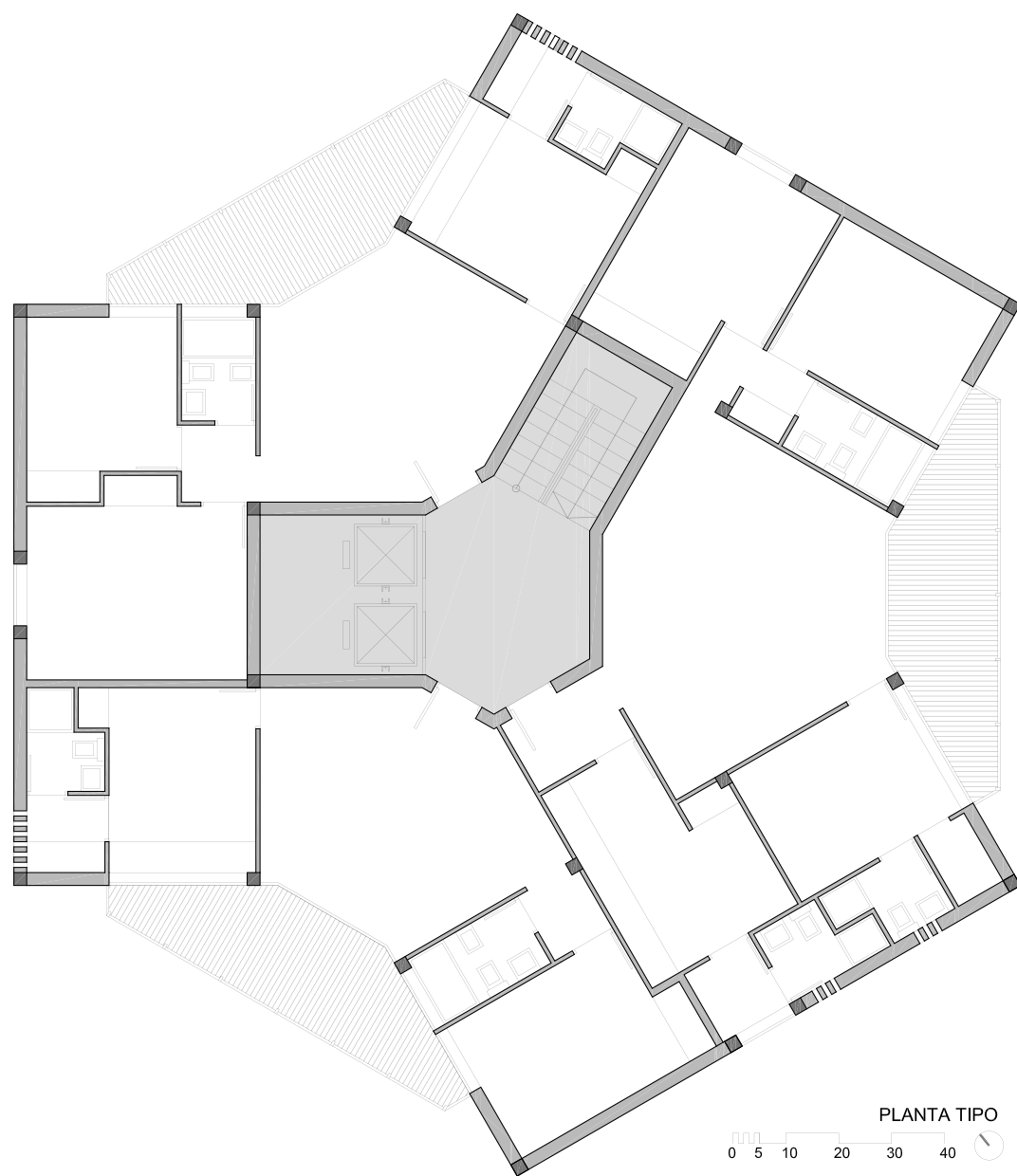


Figura 3.8.12 Planta tipo de la Torre Hexagonal. Elaboración propia

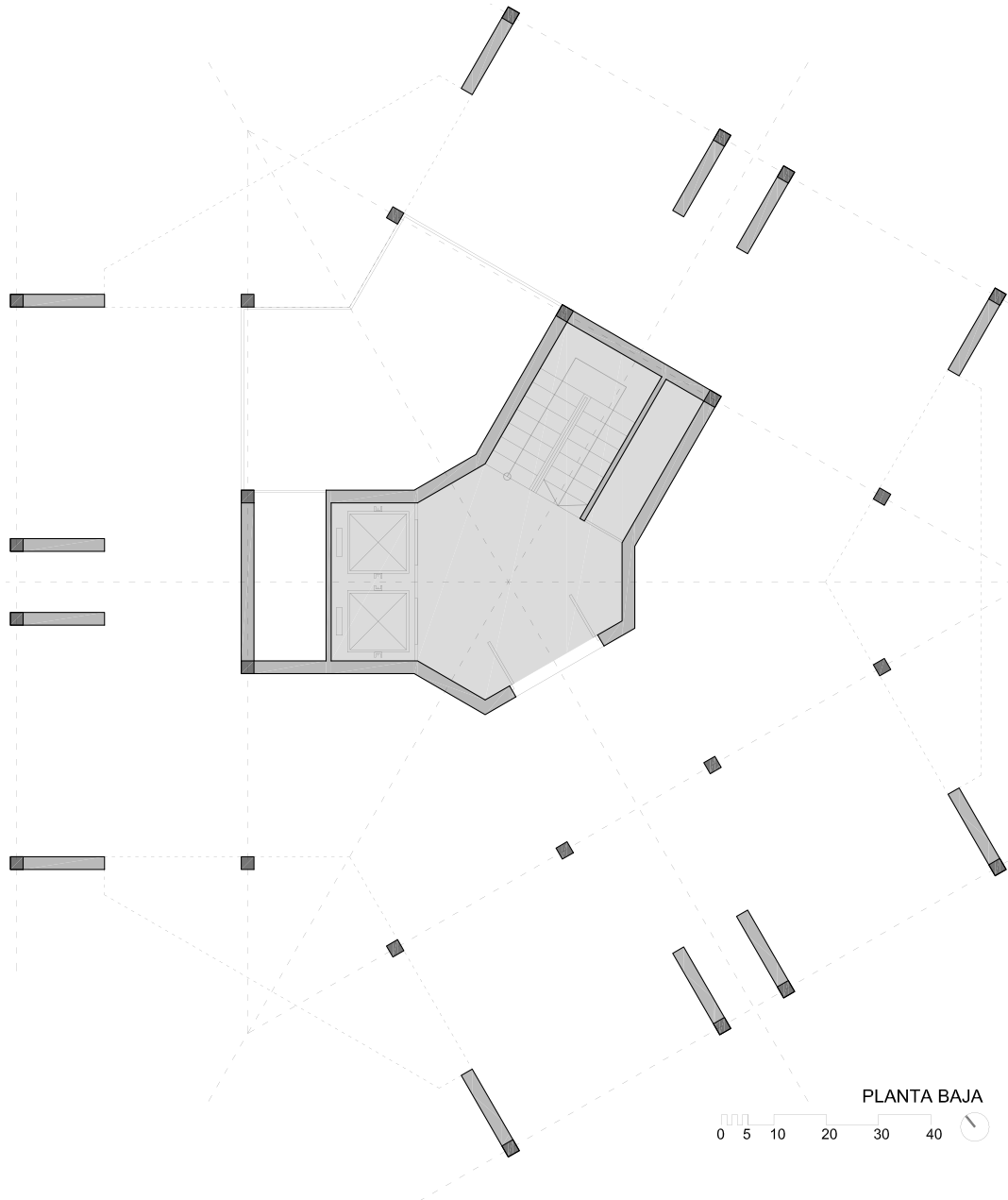


Figura 3.8.13 Planta baja de la Torre Hexagonal. Elaboración propia

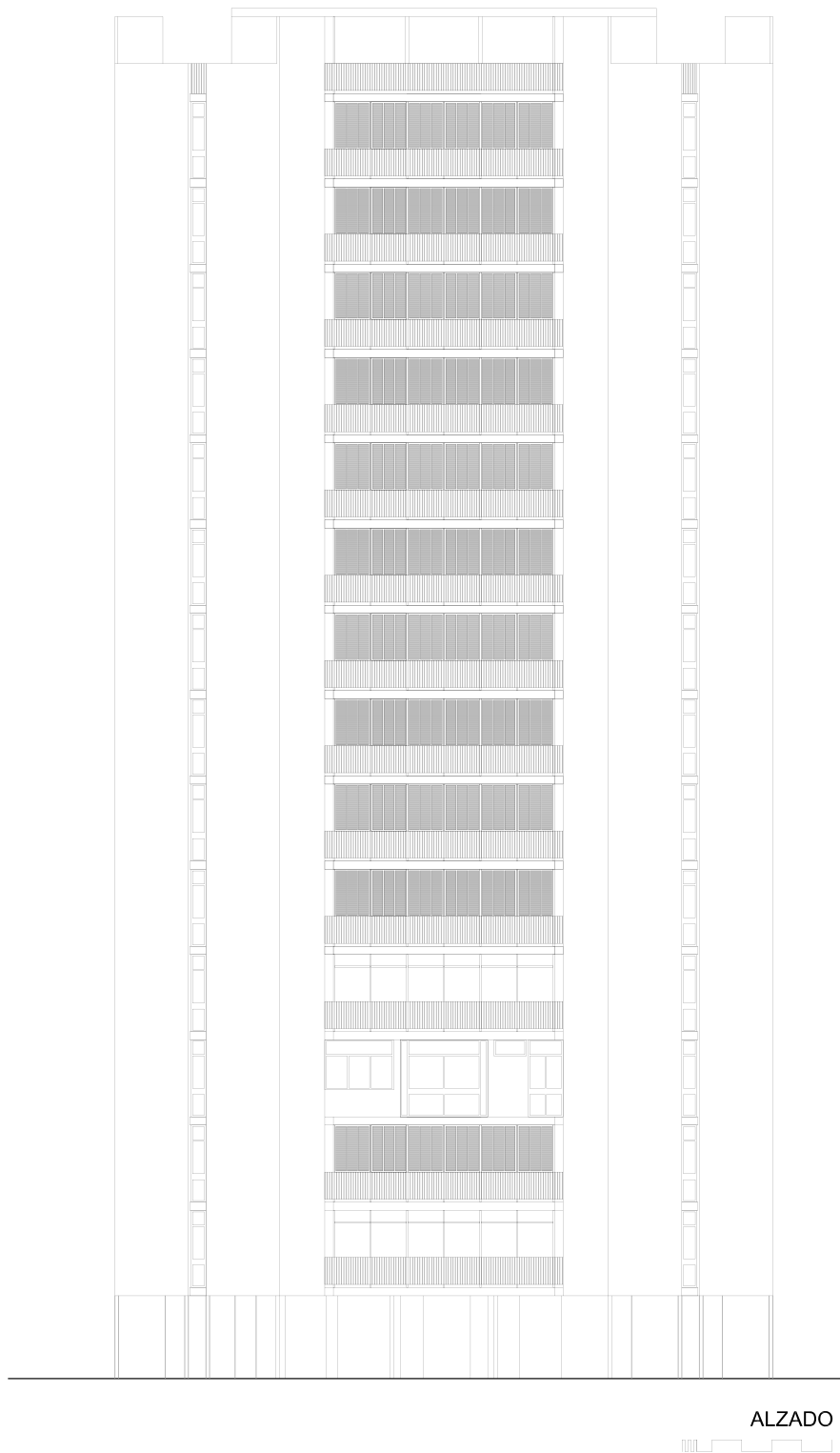


Figura 3.8.14 Alzado 1 de la Torre Hexagonal. Elaboración propia

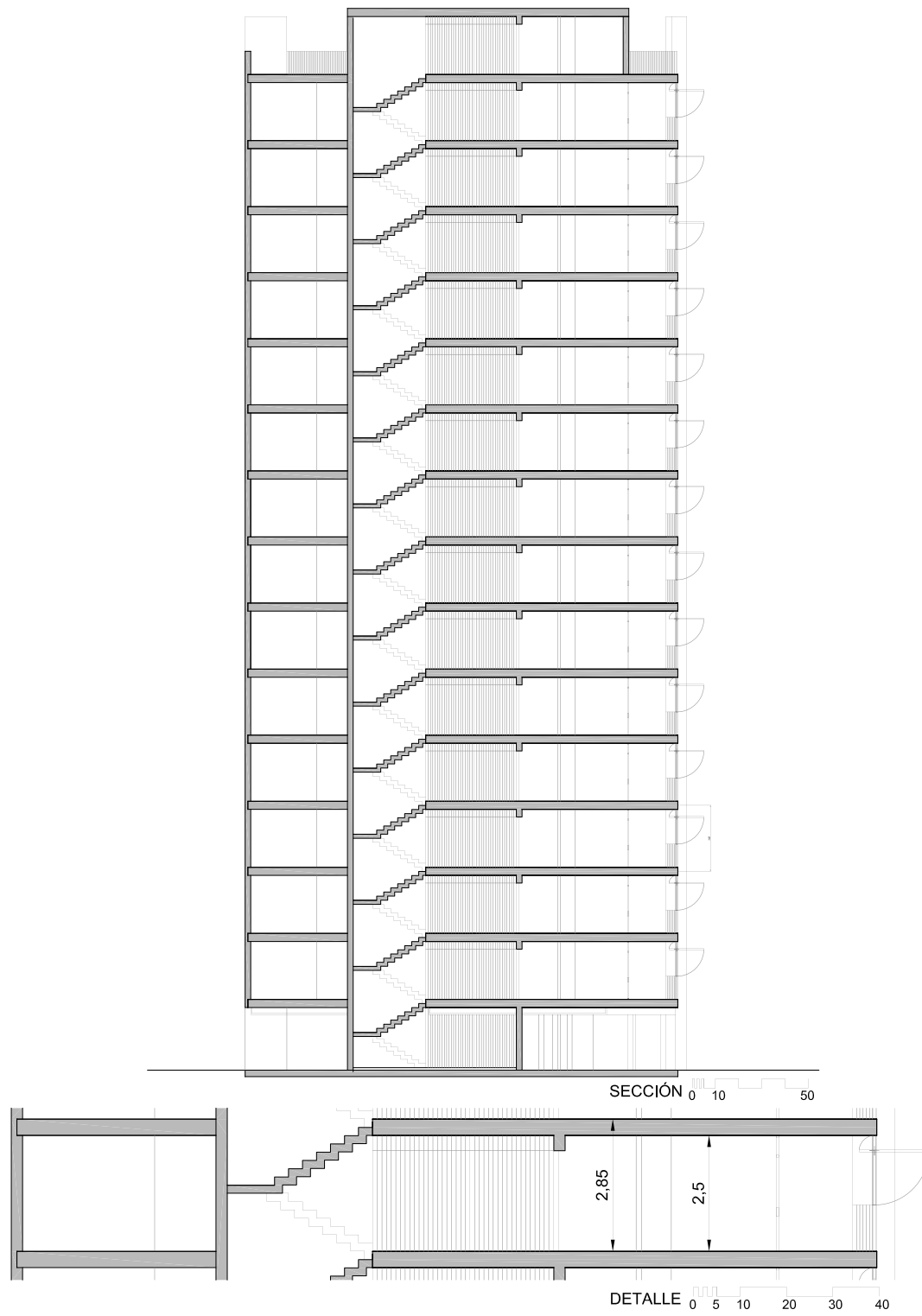


Figura 3.8.15 Sección de la Torre Hexagonal. Elaboración propia

En cuanto a la organización de las viviendas, existen tres tipos distintos por planta más la del conserje, situada en planta de cubiertas, sumando un total de 43 viviendas: (Memoria del proyecto, página 4).

Los tres tipos de vivienda por planta varían, siendo cada uno de un tamaño distinto, lo que rompe la simetría estricta de la planta hexagonal. Los tipos son los siguientes:

- Tipo A. 14 unidades. 99,01 m² construidos, 93,60 m² útiles.
- Tipo B. 14 unidades. 77,33 m² construidos, 66,93 m² útiles.
- Tipo C. 14 unidades. 55,98 m² construidos, 48,72 m² útiles.
- Vivienda del conserje: 40.12 m² construidos, 36,57 m² útiles.

La superficie total construida según proyecto es la siguiente:

- Superficie total construida en viviendas: 3 208,60 m²
- Escalera: 96.75 m²
- Rellanos y vestíbulos 211.05 m²

3.8.3. Definición constructiva

Nos apoyamos en la descripción del proyecto para realizar la definición constructiva del edificio. Tanto la torre como los módulos del basamento se construyen con la misma tecnología, por lo que servirá también para la definición del modelo 3.

De la memoria del proyecto:

“El complejo estructural se ha resuelto con una hincada de pilotes cuyas cabezas soportan una serie de vigas de atado, en las cuales se fijan los anclajes de los pilares.”

“Los pilares serán metálicos formados por perfiles laminados, unidos mediante soldaduras.”

“Los forjados se proyectan a base de una cuadrícula de hormigón armado formando una losa aligerada (sistema FERCA aprobado por la D.G. de Arquitectura).”

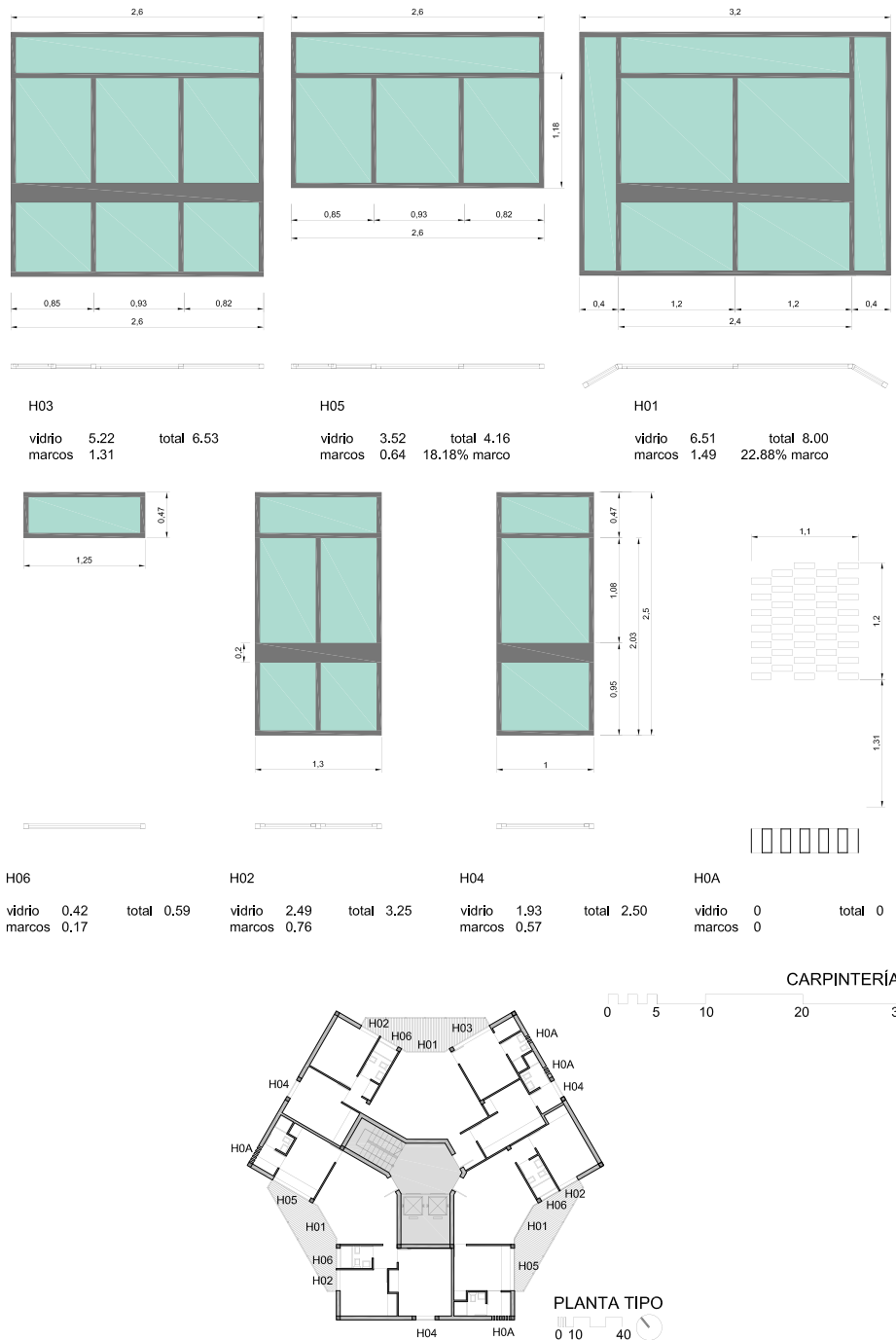


Figura 3.8.16 Descripción de la carpintería de la Torre Hexagonal. Elaboración propia a partir de los planos de proyecto y la inspección del edificio contruido.

“Los huecos de escalera y caja de ascensores se han aprovechado para efectuar con sus muros de cerramiento, a base de hormigón armado, pantallas absorbentes del efecto eólico.”

“Los cierres exteriores son de ladrillo y forman una cámara de aire mediante un tabicado aislante interior.”

Vemos en este párrafo que trasdosa con una cámara de aire que considera como aislamiento interior.

“Las terrazas se construirán colocando sobre el último forjado una capa impermeabilizante y sobre ella una cubierta a la catalana, incluyendo un aislamiento térmico.”

Este aislamiento térmico que se describe no ha sido ni descrito en planos, ni en medición, no realizándose en la obra realmente ejecutada. Es un aspecto que, aunque no se realizó, denota el inicio de un interés por el aislamiento térmico de la envolvente, que no llegó a los edificios hasta más de una década después.

“Los tabiques interiores irán guarnecidos y enlucidos con yeso. Los muros exteriores van protegidos por plaquetas vitrificadas.”

“Los aseos van dispuestos para inodoro, lavabo y ducha con su plato correspondiente y los cuartos de baño irán también provistos de ducha.”

“La fumistería se resuelve mediante cocinas y calentador de gas butano o eléctricos.”

“Los aparatos sanitarios, carpinterías y cerrajería se especifican en una serie de planos con espesores, dimensiones y tipos, además en los planos de planta se indican con claridad donde van colocados cada uno de ellos y, para ello, se ha numerado incluso, la cantidad de unidades repetidas de los mismos.”

“Los ascensores llevarán la maquinaria en su parte inferior y el sistema de poleas irá dispuesto en una serie de jácenas con aislamiento de vibraciones. Los pulsadores serán para subida y desembarco en cada una de las plantas. Asimismo, ambos serán de subida y bajada capaces, como mínimo, para cuatro personas o carga de 350 kgs.”

“La instalación eléctrica irá toda ella bajo tubo BERGMANN empotrado y dispondrá de tomas de tierra para evitar cortocircuitos o voltajes altos debido a la humedad intensa del emplazamiento. Se dispondrá de un pararrayos con toma a tierra mediante un conductor exterior debidamente aislado y de una antena colectiva de televisión.”

“El vidrio será doble. Los chapados de azulejo. La pintura a base de temple liso, temple picado, óleo y pintura plástica.”

Este aspecto tampoco se llegó a realizar. El vidrio en todo el conjunto, y en toda la obra de esa época realizada por Bonet en La Manga, es monolítico transparente, como se refleja en el capítulo XII de la medición, que reproducimos más abajo. El vidrio doble con cámara no se generalizará en la construcción de viviendas española hasta más de una década después¹.

Del pliego de condiciones:

“7.-Albañilería.- Los cierres de fachada se harán con arreglo a los planos correspondientes. En donde haya cámaras de aire se cerrarán los huecos con tabique en todo su perímetro. Será registrada la cámara de aire antes de cerrarse para evitar que queden encerrados en ella escombros o residuos de yeso, que producirían humedades en el interior, quedando perfectamente limpias para lo que serán previstos mechinales de limpieza.

El mortero a emplear en el exterior será de cemento y arena en la proporción 1:3.

Los áridos serán de igual calidad a la que haya sido aprobada

Los tabiques serán de ladrillo hueco sencillo de panderete.

En las separaciones de viviendas se hará doble tabique o tabicón de ladrillo hueco doble y lo mismo se hará en donde vayan las distribuciones de agua para evitar, con las rozas, una solución de continuidad en los tabiques.

Los revestidos interiores se harán con un mortero adecuado maestreando los paños verticales con las correspondientes maestras que disten unas de otras 1.50 ml como máximo.

Se cuidará de que el revestimiento no exceda de 1.50 cms de espesor debiendo quedar los paramentos perfectamente planos sin ondulaciones ni arrugas.”

De la medición:

“CAPÍTULO IV.- Albañilería

2188 m2 Fábrica de ladrillo Toch-n- de 0,15, cámara de aire, tabique

¹ El vidrio doble fue patentado en 1865 (IMPROVEMENT IN WINDOW-GLASS THOMAS D. STETSON et al. US-Patent No 49167, 1 de agosto de 1865:) pero no fue hasta 1938 cuando empieza a comercializarse en Estados Unidos, de modo no generalizado.

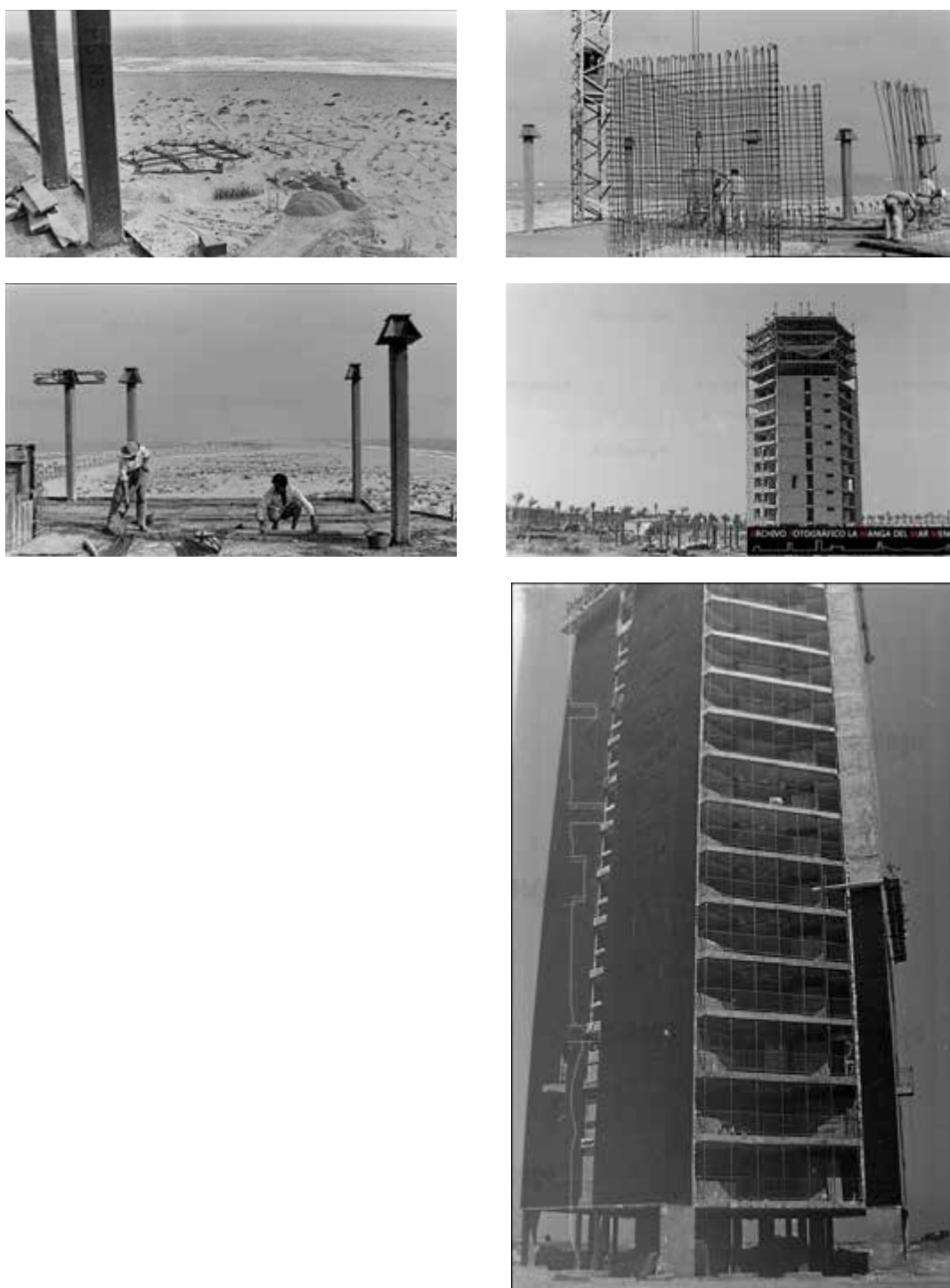


Figura 3.8.17 Fotografías históricas de distintos momentos de la construcción de la Torre Hexagonal. Arriba, cimentación del conjunto hexagonal, en julio de 1964, abajo, revestimiento negro de la fachada, octubre de 1965. Fuente: Archivo fotográfico de La Manga del Mar Menor

“CAPÍTULO V.- Solados y alicatados

Solado con rasilla Vendrell 14x28

m². Pavimento ruleteado

“CAPÍTULO IX.- Carpintería metálica

“m². Carpintería metálica en ventanas y puertas balconeras con perfil Mondragón de 40 mm.”

CAPÍTULO XII.- Vidriería

“m². Cristalina de 4/5mm en carpintería metálica ventanales”

Con todo esto realizamos la siguiente definición constructiva de la envolvente de la torre hexagonal:

TABLA 3.8.1. MODELO 2, EDIFICIO HEXAGONAL. TORRE DE VIVIENDAS.
CARACTERIZACIÓN DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA DEL EDIFICIO ORIGINAL

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	U (W/m ² K)
FACHADA	Hoja exterior medio pie de ladrillo perforado, mortero de cemento 1cm, cámara de aire 5 cm y hoja interior de ladrillo hueco simple. Revestimientos continuos, exterior revoco color claro, interior enlucido de yeso.	U=1.27
CUBIERTA	Plana a la catalana	U=1.89
SUELO	Forjado unidireccional de hormigón armado, con solado de terrazo sobre base tradicional	U=2.10
CARPINTERÍA	Madera	U=2.2
VIDRIOS	Monolítico transparente de 4/5 mm.	U=5.7 g=0.85

3.8.4. Estudio del caso. Procedimiento de obtención de datos aplicado

Aplicamos el procedimiento propuesto al segundo edificio seleccionado. Buscamos analizar la influencia de los dieciséis parámetros matéricos propuestos para optimizar la demanda energética del edificio durante tres periodos: anual, calefacción -invierno-, refrigeración -verano-.

En primer lugar, cuantificamos la demanda energética del edificio original con la aplicación informática de simulación energética de edificios seleccionada. Para ello realizamos un modelizado digital del edificio.

El archivo informático base del modelizado original lo denominamos Archivo semilla que es el Caso 0. La versión 10 es la que consideramos definitiva para llevar a cabo el procedimiento (fig. 3.8.18).

En la siguiente tabla expresamos los valores de los parámetros aplicados en el caso 0, edificio original, para la simulación.

TABLA 3.8.2. VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL CASO 0, MODELO 2
CONJUNTO DE VIVIENDAS MARALET, EDIFICIO ORIGINAL.

	ORIENTACIÓN	ALTITUD	e CUBIERTA	e Suelo	e FACHADA	U VIDRIO	U MARCO	α CUBIERTA	α FACHADA	α MARCO	m FACHADA	m FORJADOS	g VIDRIO	FS VERANO	INF. HUECOS	PP.TT.
CASO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P16	P17
0	338	5	0	0	0	5.7	2.2	0.6	0.96	0.2	1140	1330	1	1	100	0.96

Como diferencia principal con el modelo anterior, consideramos la orientación de partida, con un ángulo de 338° y la absorción de la fachada negra la consideramos con un valor de $\alpha=0.96$, frente al blanco de las Maralet.

De cada uno de los parámetros en estudio determinamos los rangos de valores en los que el edificio se muestra más sensible a la variación de su demanda energética. Realizamos los cálculos por medio de la aplicación informática aportada para la investigación, APE_3 .

Se realizan dieciséis test, donde variamos cada vez un parámetro, según se describe en el procedimiento. Los resultados se almacenan en una hoja de cálculo, reproducida en el anejo A2.2.1. y se ilustran en las figuras 1a del anejo A1.2.

Obtenemos la demanda energética en función de la variación de cada parámetro seleccionado.

En primer lugar, generamos al azar 10 000 casos mediante el método de Markov-Chain Monte Carlo, asignando un mayor peso a los rangos de valores donde la pendiente es mayor (muestra mayor sensibilidad a la variación, por lo que lo denominamos *muestreo sensible*.)

Los casos generados se listan en el Anejo A2.2.2. Son 10 000 casos con 16 variables, que son los valores asignados a los parámetros, y 12 resultados mensuales, que agrupamos en anual, sumando los doce meses, calefacción, sumando los meses de invierno y refrigeración, con la suma de los meses de verano.

En segundo lugar generamos un segundo muestreo donde la distribución de los valores de las variables se hace de modo uniforme. Se realiza también con el método Markov-Chain Monte Carlo y lo denominamos *muestreo uniforme*, listados en el anejo A2.2.3.

Paso 2. Cuantificación de la influencia de cada parámetro en la demanda energética del edificio

Cuantificamos la demanda energética de los 10 000 casos del muestreo sensible y los 10 000 del uniforme, con la herramienta informática propia, APE_3 .

Se calcula la batería de casos propuesta para obtener las demandas energéticas de todos los casos. Se ha asignado un tiempo de cálculo por caso de 5 minutos, ya que el tiempo de cada caso es siempre menor, resultando un tiempo total de 1.666.67 horas en una computadora. Se utilizan multiprocesadores para optimizar el tiempo de obtención de resultados, dividiendo el tiempo por 16 procesadores, a un total de 104,17 horas.

Se obtienen los resultados en una hoja de cálculo con las 10 000 líneas de inputs y resultados por muestreo. Los reproducidos en el anejo A2.2.2.

Cuantificamos, por separado y controlados por los demás, la influencia de cada parámetro.

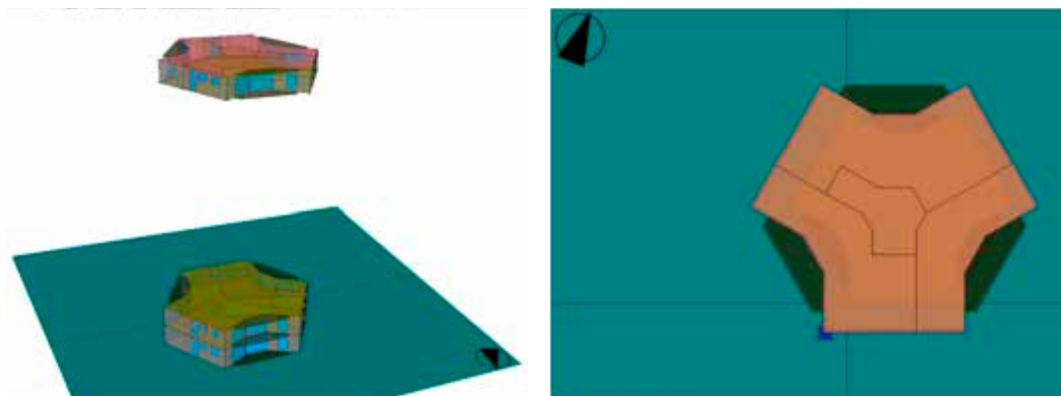


Figura 3.8.18 Modelizado en la herramienta de simulación HULC. Vista en planta y perspectiva. La planta tipo se define como una planta con multiplicador 12, de ahí la separación representada con la última planta. Fuente: Elaboración propia

Reproducimos las tablas de resultados en el capítulo 4.2. Obtenemos los coeficientes de determinación de cada parámetro de modo individual: se representan en los gráficos 3a y 3b del anejo A1.2 (sufijo u: CALEu, REFu, ANUAu).

Obtenemos los coeficientes de determinación de cada parámetro controlado por los restantes: se representan en los gráficos 4a y 4b del anejo A1.2 (sufijo a: CALEa, REFa, ANUAa) (varianza explicada con ANOVA)

Paso 3. Selección de los valores (rango de valores) de cada parámetro que minimizan la demanda energética del edificio

Tras el análisis de los resultados seleccionaremos las combinaciones paramétricas más favorables.

Paso 4. Simulación de los casos con valores de los parámetros incluidos en los rangos obtenidos en el Paso 3 y optimización

Una vez realizados los casos óptimos, los calcularemos y evaluaremos los resultados en el apartado 4.5.2.

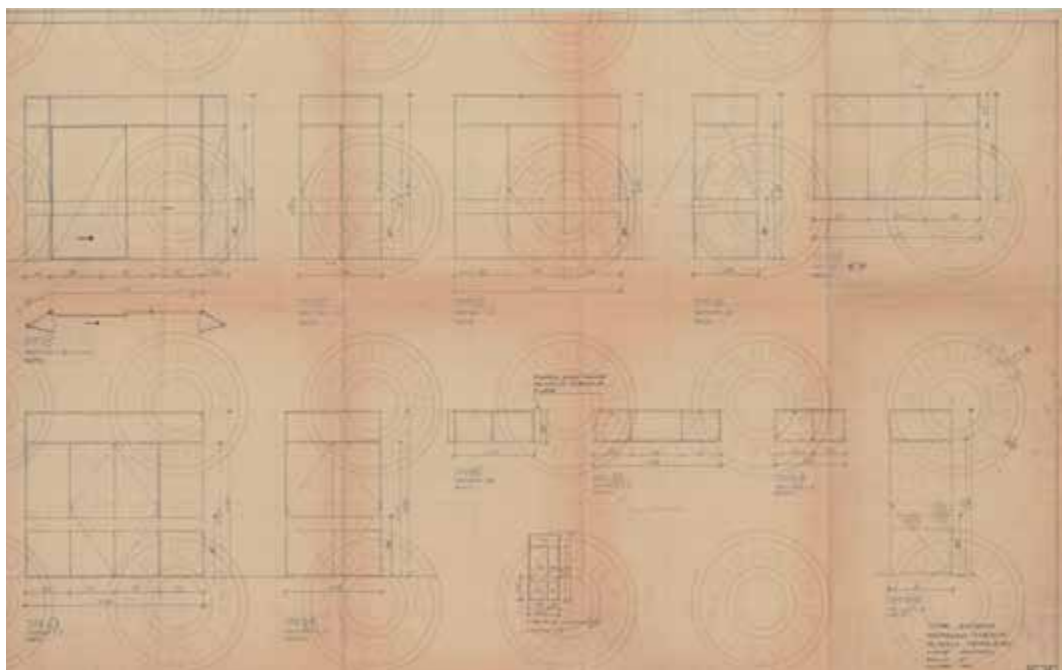


Figura 3.8.19 Reproducción del plano de carpinterías del Edificio Hexagonal. Arquitecto Antonio Bonet Castellana. Fuente: Arxiu Historic del COAC,

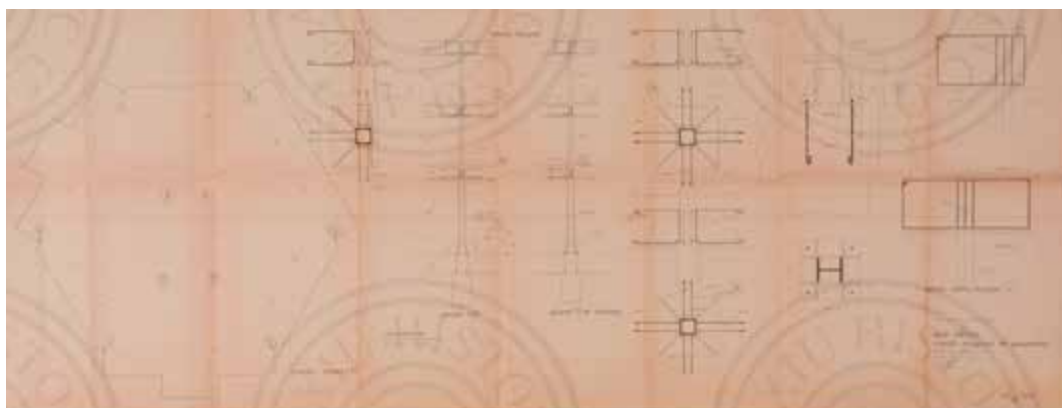


Figura 3.8.20 Reproducción del plano de detalles de estructura de la Torre Hexagonal. Antonio Bonet Castellana, 1963. Fuente Arxiu Historic COAC

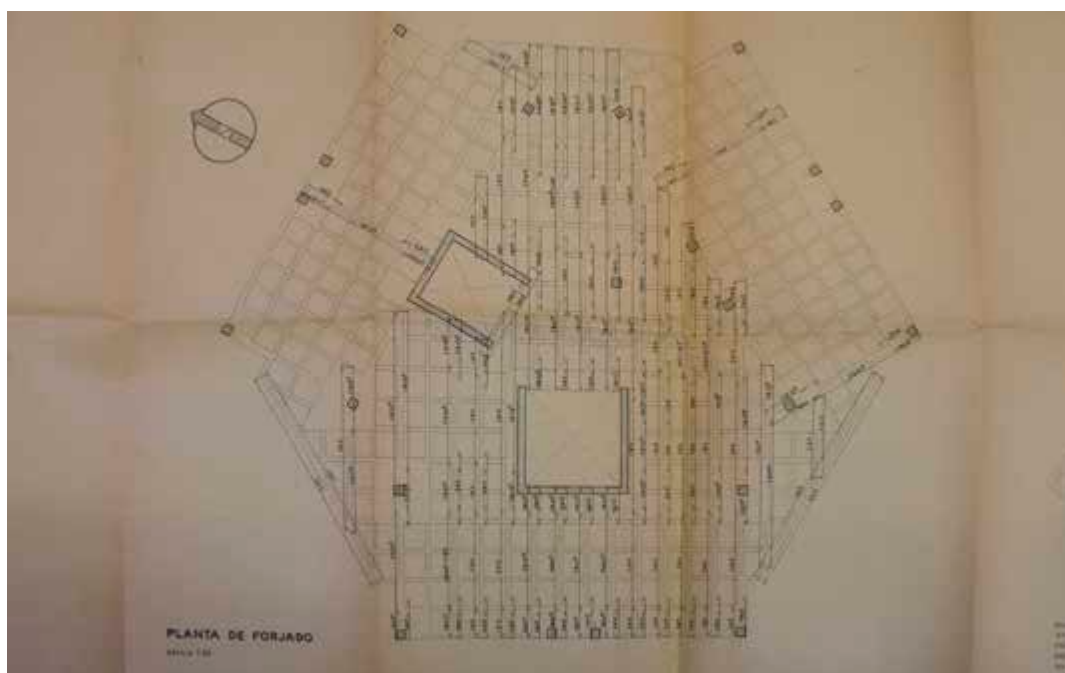


Figura 3.8.21 Reproducción del plano de forjado tipo del Edificio Hexagonal. Arquitecto Antonio Bonet Castellana, 1963. Fuente: Arxiu Historic del COAC,

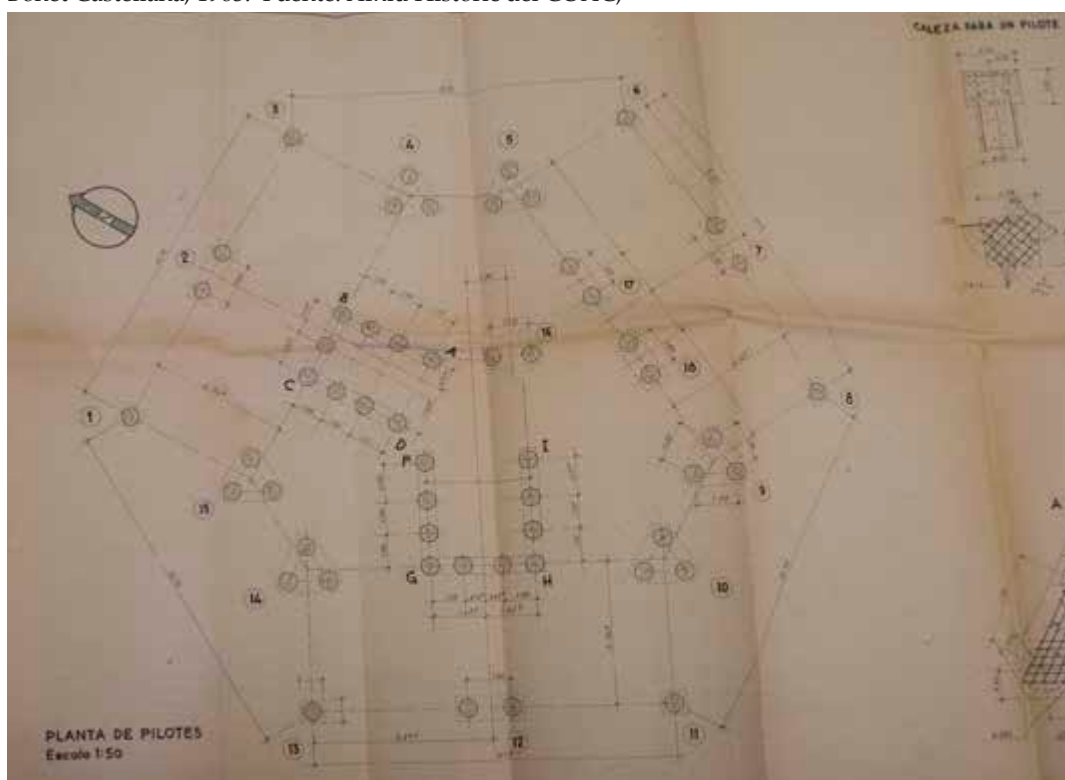
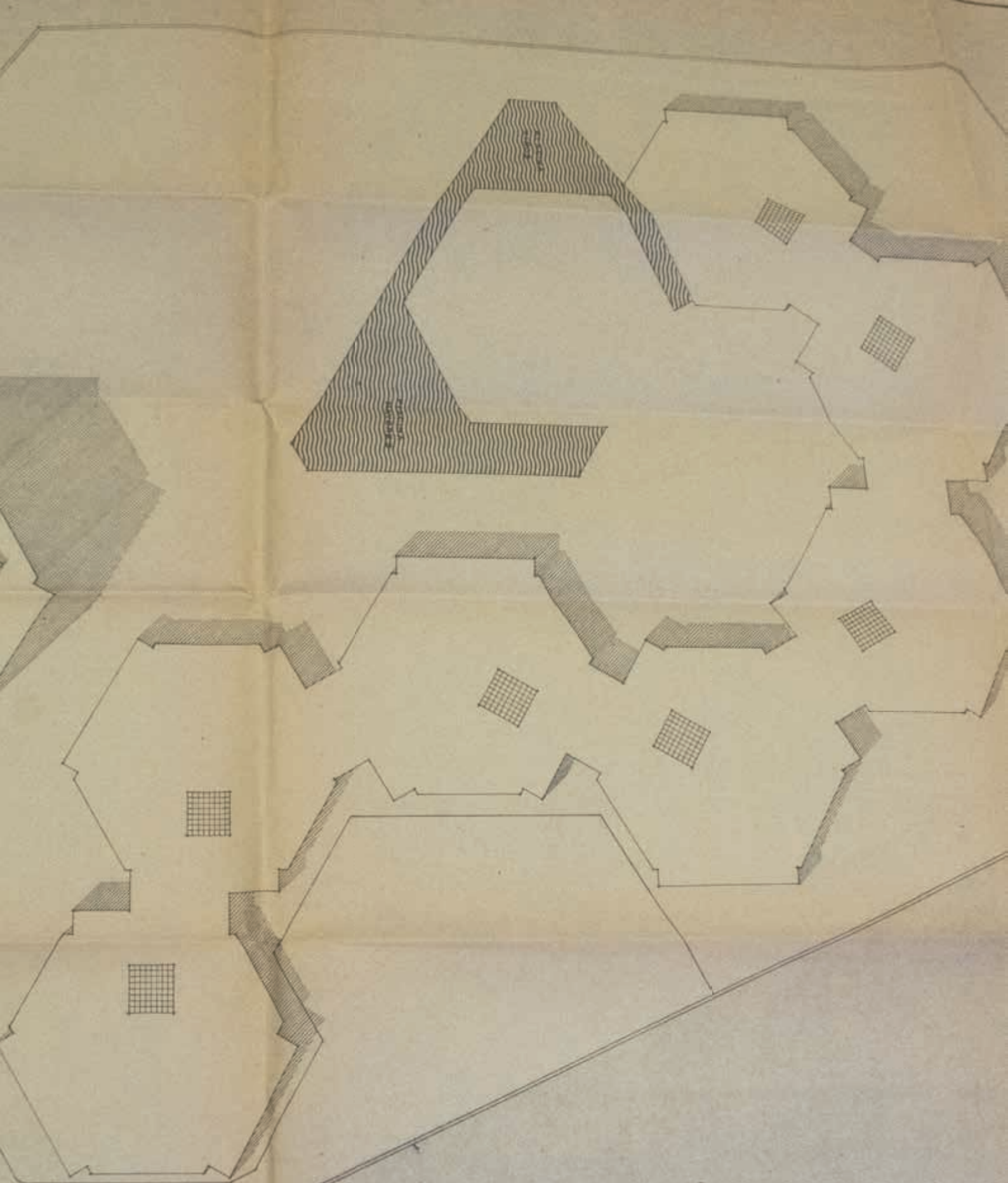


Figura 3.8.22 Reproducción del plano de detalles de cimentación de la Torre Hexagonal. Antonio Bonet Castellana, 1963. Fuente Archivo Municipal de Cartagena.



3.9. EDIFICIO 3. CONJUNTO HEXAGONAL. BASAMENTO

3.9.1. Antecedentes

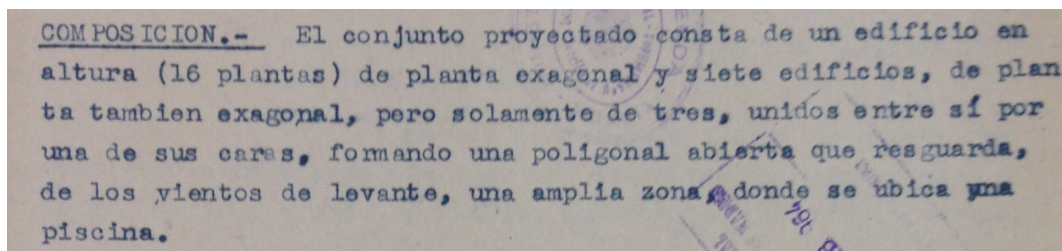


Figura 3.9.2 Texto extraído de la primera página de la memoria del proyecto original, fechada en diciembre de 1963 y visado 13 de febrero de 1964.

El modelo 2 está basado en uno de los siete edificios de tres alturas que constituyen lo que el arquitecto denomina “*basamento*”.

Como propuesta, el basamento y las zonas libres de la parcela son la puesta en práctica de su Plan de Ordenación de La Manga del Mar Menor (1961-1964), en el que aplica la teoría del alejamiento de los edificios en altura, planteada en el punto 29 de la Carta de Atenas¹. El joven Bonet, junto a José Luis Sert, asistieron al IV CIAM, en donde se expuso este manifiesto urbanístico en 1933.

“29. Las construcciones altas, situadas a gran distancia unas de otras, deben liberar el suelo en favor de las grandes superficies verdes.(...) Pero es necesario, además, que esas edificaciones estén situadas a grandes distancias unas de otras, pues de otro modo su altura, lejos de constituir una mejora, no haría más que agravar el malestar existente.”

Los edificios tienen planta hexagonal, con tres orientaciones principales distintas, una por cada viviendas que compone la planta tipo (fig. 3.9.11).

El acceso se produce a través de una escalera metálica situada en un patio, abierto en planta baja y protegido en cubierta por un lucernario. Según los planos de sección del proyecto, el patio se cierra superiormente por una celosía, lo que permite la ventilación y protege del soleamiento (fig. 3.9.8), aunque no se construyó así y en su lugar se colocó un lucernario (fig. 3.9.15)

¹ Redactada en el IV CIAM, en 1933 y publicada en 1942 por Le Corbusier y Sert

Figura 3.9.1 Izda. Planta de cubiertas. Plano del proyecto original, de octubre de 1963. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena



Figura 3.9.3 Fotografía aérea histórica de La Manga del Mar Menor. Fuente: Archivo fotográfico de La Manga del Mar Menor



Figura 3.9.4 Fotografía histórica. Vista del conjunto Hexagonal. Fuente: Archivo fotográfico de La Manga del Mar Menor



Figura 3.9.5 Fotografía del estado actual, a fecha 22/5/2016. Fuente: el autor

Las dos plantas de viviendas se elevan sobre el suelo, dejando la planta baja diáfana. De este modo se crea un espacio sombreado que libera totalmente la parcela bajo todos los bloques hexagonales (fig. 3.9.6).

La composición de los hexágonos es igual que en la torre: grandes zonas aterrazadas con grandes huecos y paños opacos con ventanas de reducido tamaño. Las terrazas quedan situadas entre el cerramiento de vidrio y las celosías abatibles de eje horizontal, que protegen del soleamiento y crean un espacio umbral que amplía la zona de día.

A diferencia de la torre, las piezas de basamento carecen de ascensor y la escalera, como hemos comentado, queda al aire libre en un patio que favorece la ventilación cruzada de las viviendas (fig. 3.9.15).



Figura 3.9.6 Fotografía de la planta baja diáfana de uno de los bloques del basamento. Estado actual, (22/5/2016). Fuente: el autor

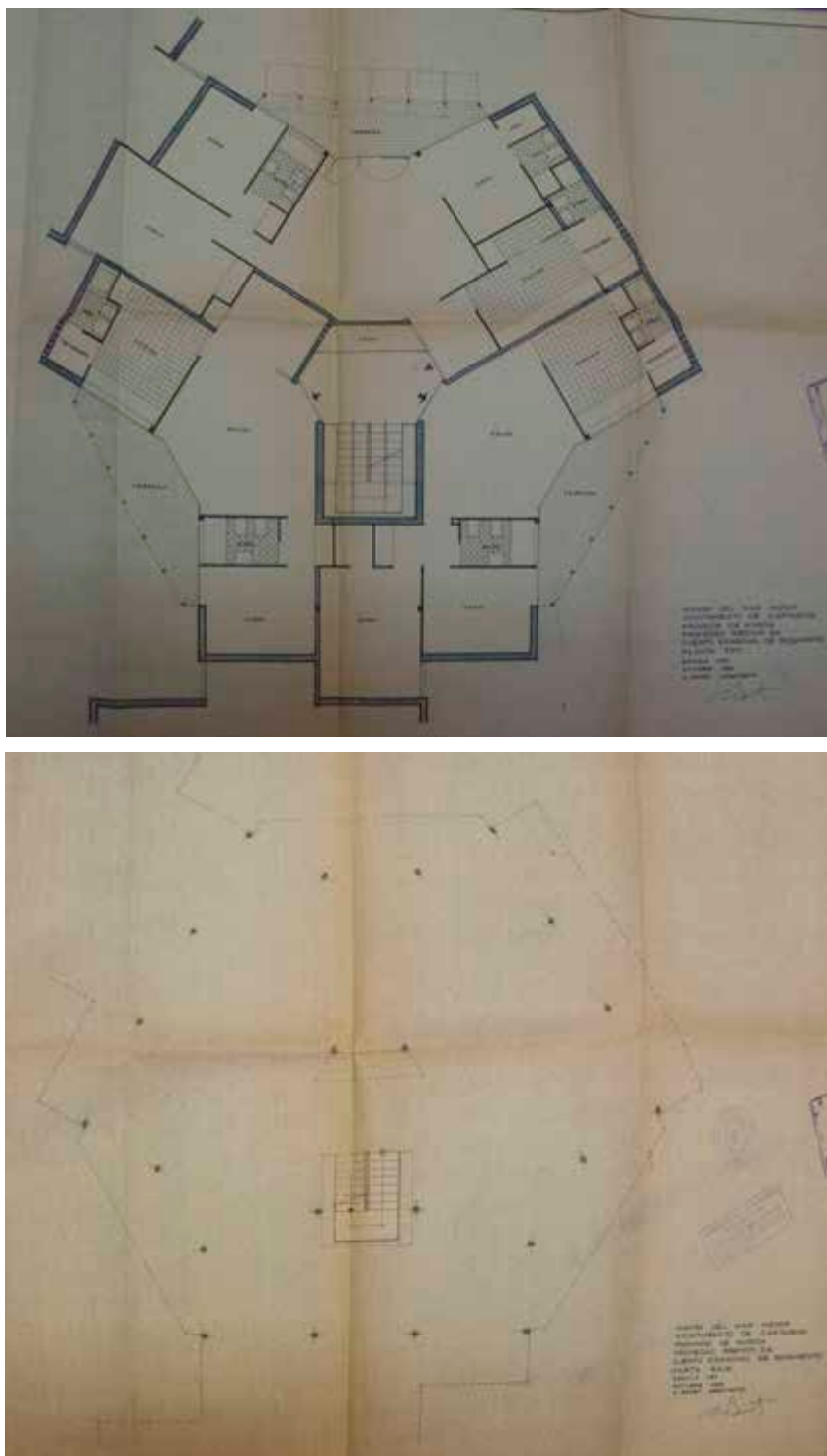


Figura 3.9.7 Planos del proyecto original del cuerpo hexagonal de basamento. Arriba, planta tipo, abajo, planta baja. Antonio Bonet Castellana. Escala original 1/50. Fecha octubre de 1963. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

3.9.2. Definición gráfica

Procedemos a realizar un levantamiento de planos para el estudio del edificio seleccionado. Utilizamos como base los planos originales del proyecto, consultado en el Archivo Municipal de Cartagena y en el Arxiu Historic del Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña.

Reproducimos, en primer lugar, los planos del proyecto original, escalados, con fecha de octubre de 1963 (fig. 3.9.7 y siguientes).

Posteriormente los planos redibujados para esta investigación, que son la base del modelo para la simulación energética.

Apreciamos dos diferencias importantes del proyecto con el edificio realmente construido: el lucernario en cubierta sobre la escalera y su protección solar.

El lucernario fue proyectado sobre el rellano de acceso a las viviendas (fig. 3.9.8). Sin embargo fue construido sobre la escalera metálica. Es probable que advirtieran la importancia de dar continuidad vertical al hueco y la decisión, por lo tanto, la tomara el propio arquitecto en la dirección de obra. Para el modelo energético hemos realizado esta segunda opción y la hemos reproducido en los planos de cubierta redibujados por el autor (fig. 3.9.12)

3.9.3. Definición constructiva

La definición constructiva coincide con la del modelo 2 -Torre Hexagonal-, ya que son parte del mismo proyecto. Las dos únicas diferencias constructivas, fundamentalmente, entre el proyecto y el edificio construido tienen relación con el tratamiento de la envolvente.

La fachada fue ejecutada en un revestimiento de color verde, y fue modificado posteriormente por el color amarillo actual, al igual que pasó con la torre, cuyo acabado negro también fue modificado.

La cubierta, de un color claro según apreciamos en las fotografías históricas (fig. 3.9.4) ha sido pintada posteriormente con caucho rojo, probablemente por problemas relacionados con la impermeabilización, según se aprecia en ortofotos recientes (fig. 3.9.9).

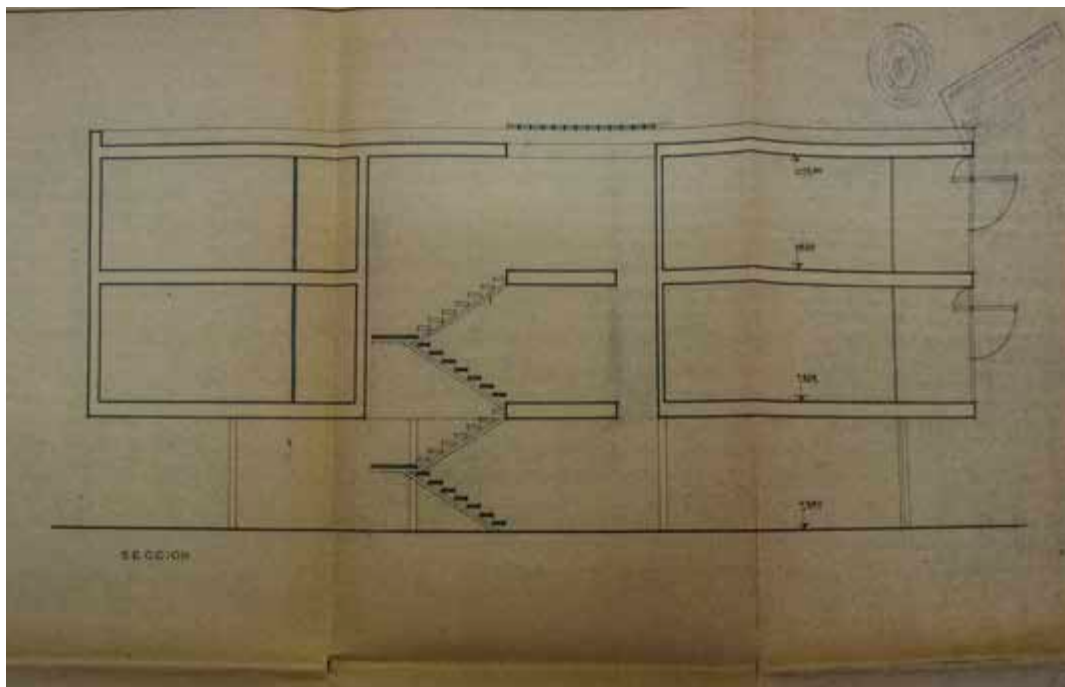
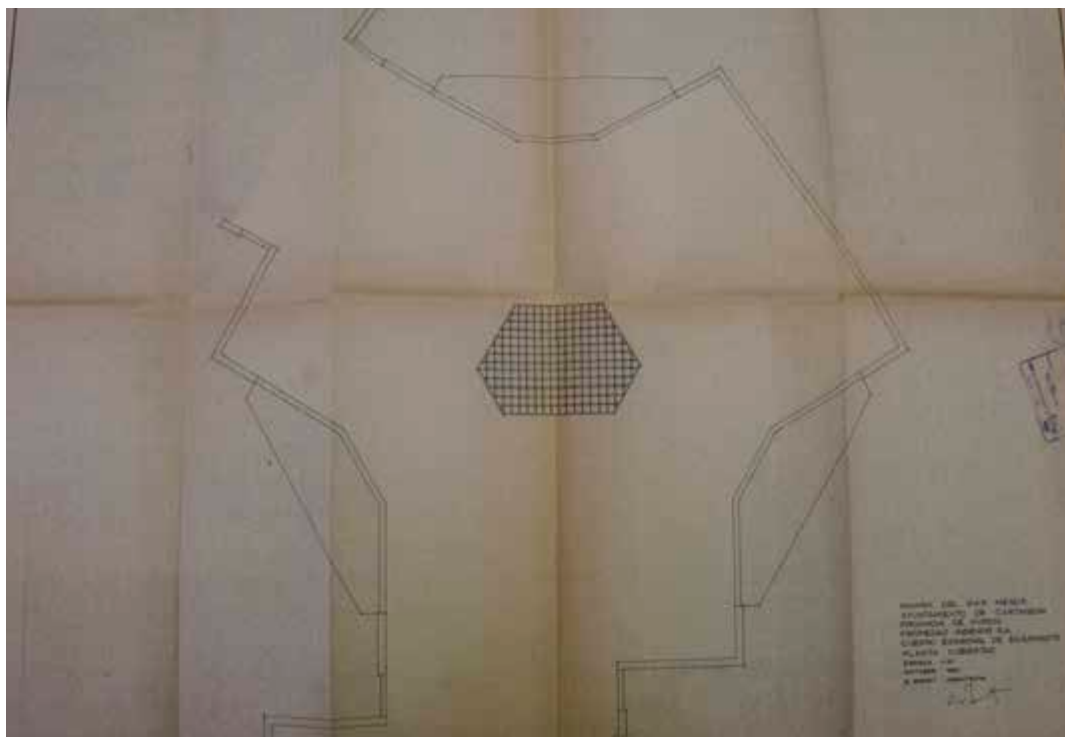


Figura 3.9.8 Planos del proyecto original del cuerpo hexagonal de basamento. Arriba planta de cubiertas, abajo sección. Antonio Bonet Castellana. Escala original 1/50. Fecha octubre de 1963. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

TABLA 3.8.1. EDIFICIO HEXAGONAL. BASAMENTO CARACTERIZACIÓN DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA DEL EDIFICIO ORIGINAL

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	U (W/m ² K)
FACHADA	Hoja exterior medio pie de ladrillo perforado, mortero de cemento 1 cm, cámara de aire 5 cm y hoja interior de ladrillo hueco simple. Revestimientos continuos, exterior revoco color claro, interior enlucido de yeso.	U=1.27
CUBIERTA	Plana a la catalana	U=1.89
SUELO	Forjado unidireccional de hormigón armado, con solado de terrazo sobre base tradicional	U=2.10
CARPINTERÍA	Madera	U=2.2
VIDRIOS	Monolítico transparente de 4/5 mm.	U=5.7 g=0.85



Figura 3.9.9 Ortofotos 1981, 2002 y 2009. Fuente www.cartomur.com

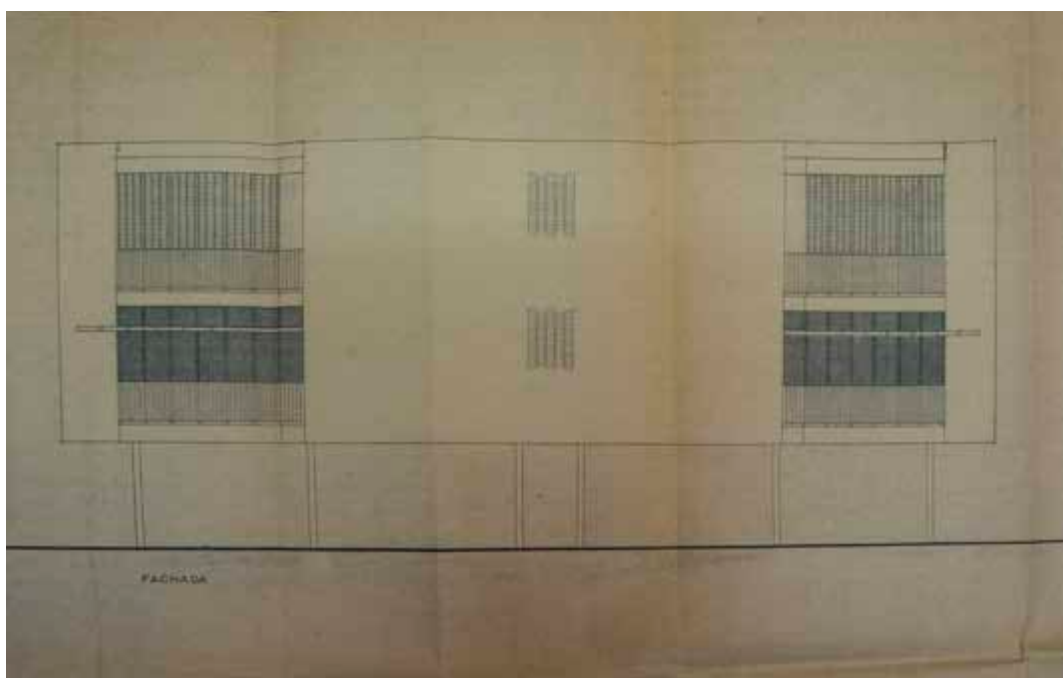
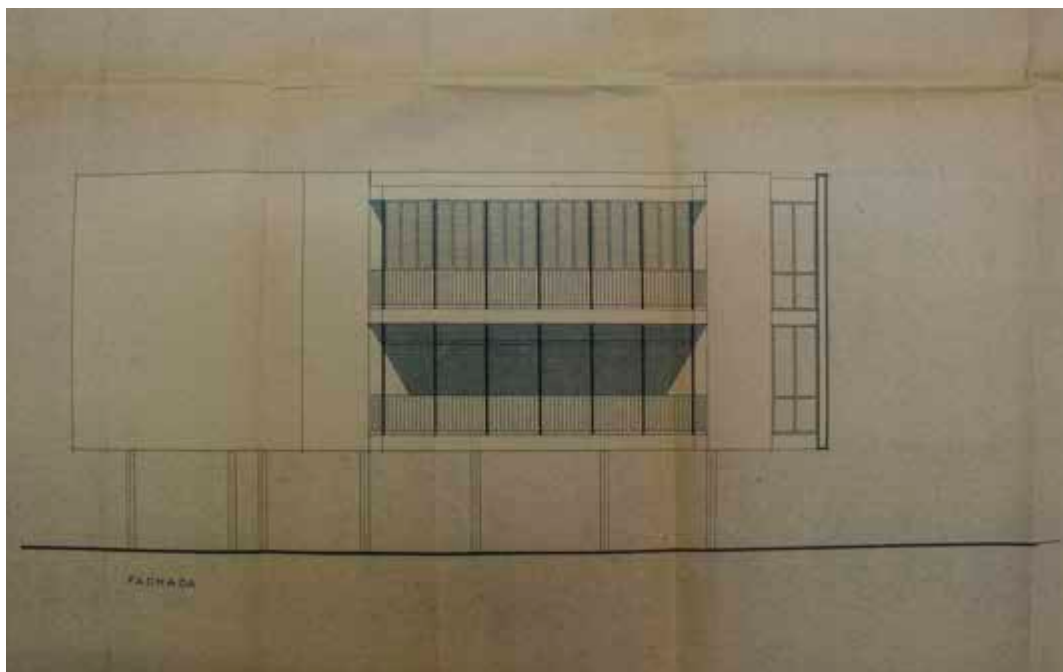


Figura 3.9.10 Planos del proyecto original del cuerpo hexagonal del basamento. Fachadas. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana. Escala original 1/50. Fecha octubre de 1963. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

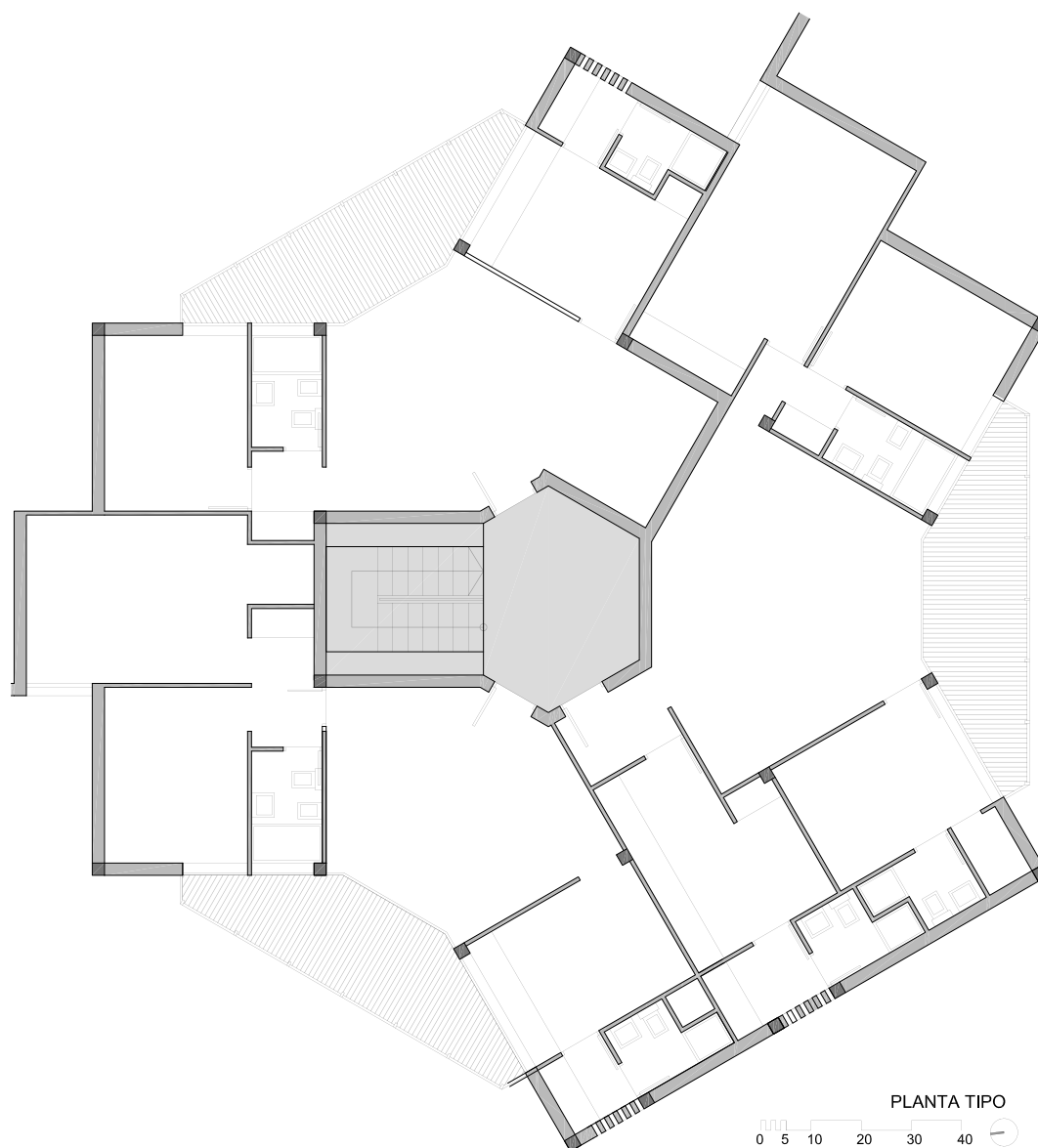


Figura 3.9.11 Planta tipo de un módulo hexagonal del basamento. Elaboración propia

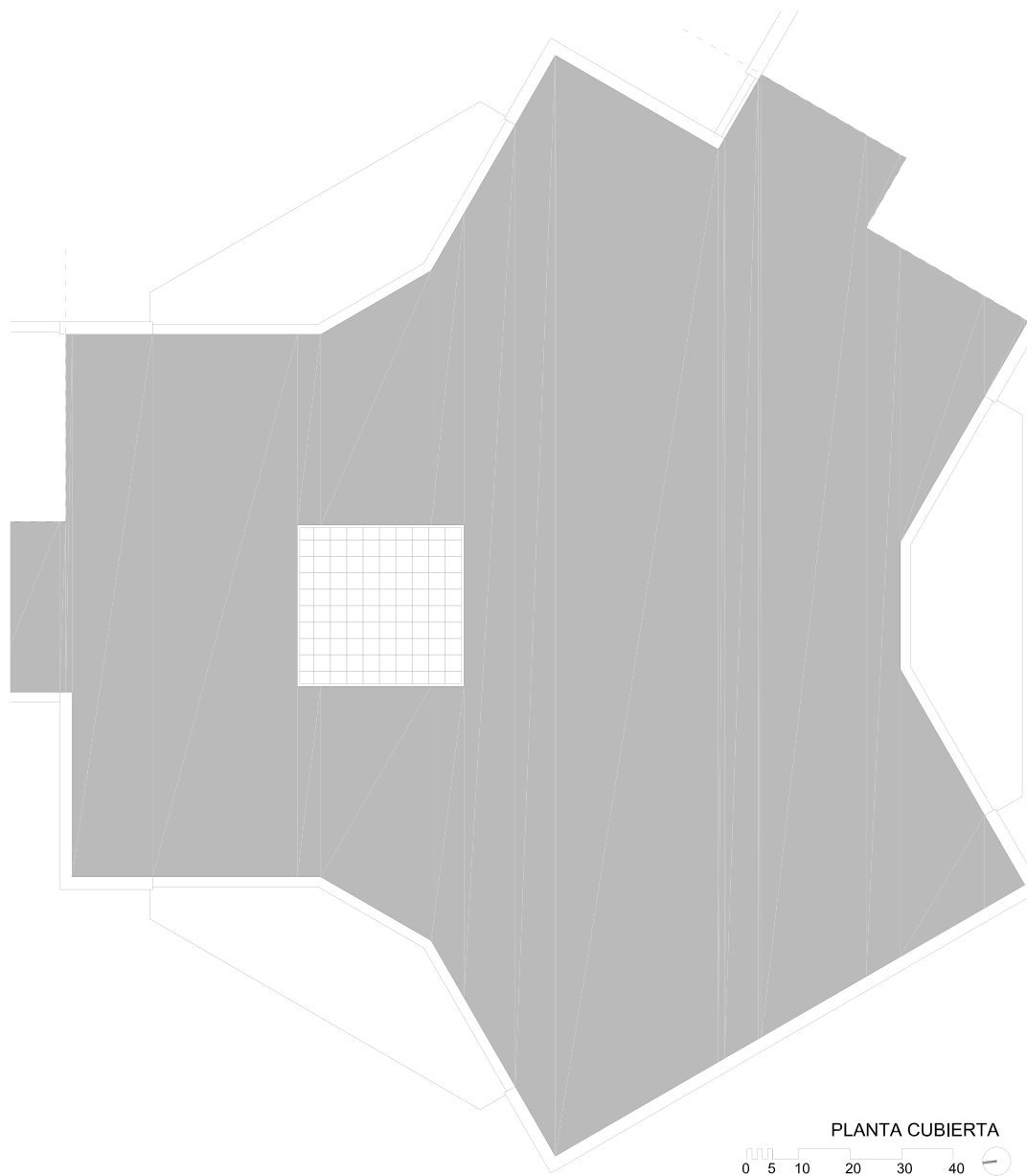


Figura 3.9.12 Planta de cubiertas realmente ejecutada de un módulo hexagonal del basamento. Elaboración propia en base a los planos de proyecto y la inspección del edificio contruido.

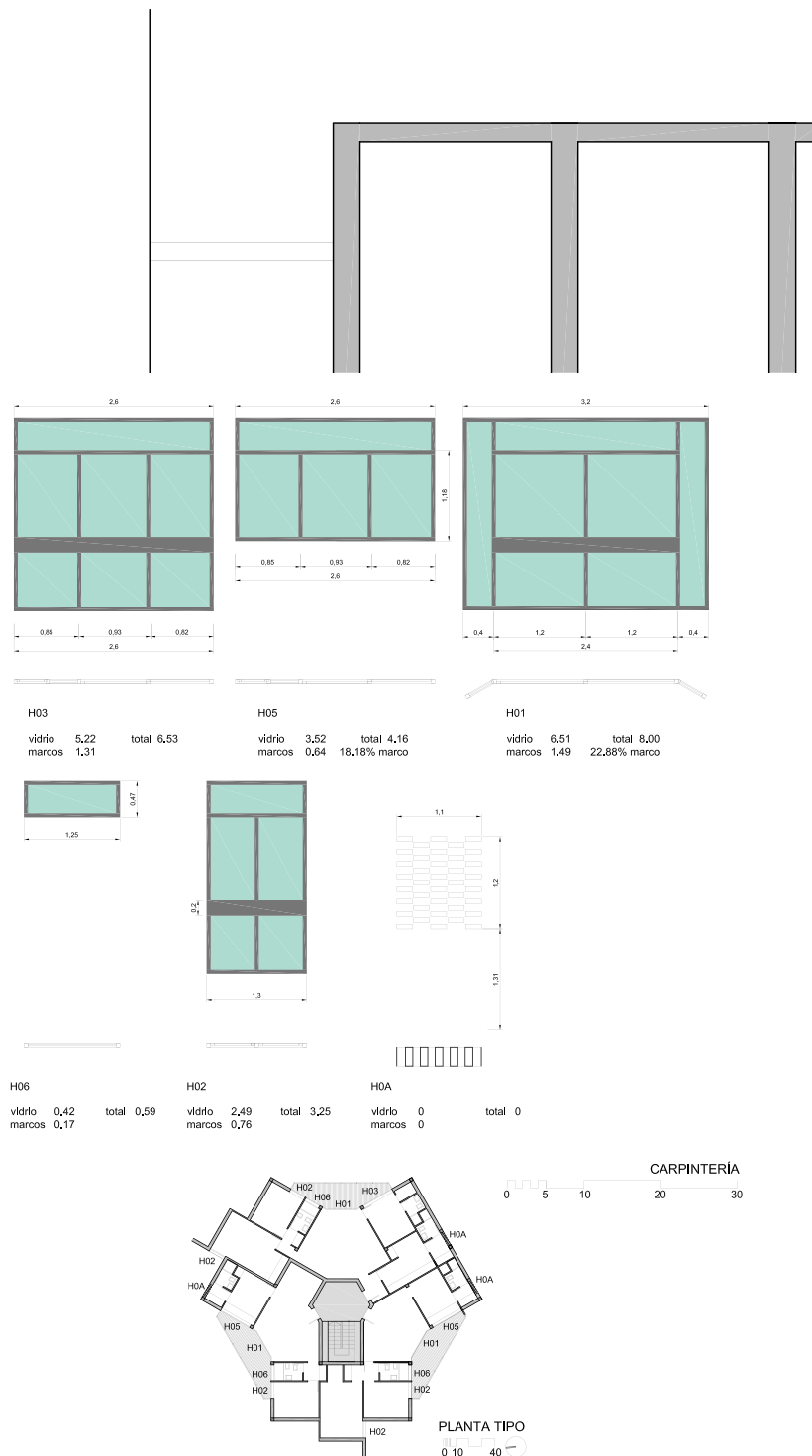


Figura 3.9.13 Arriba. Sección de un módulo hexagonal del basamento. Abajo plano de carpintería. Elaboración propia en base a los planos de proyecto y la inspección del edificio contruido.

3.9.4. Estudio del caso. Procedimiento de obtención de datos aplicado

Aplicamos el procedimiento propuesto al segundo edificio seleccionado. Buscamos analizar la influencia de los dieciséis parámetros matéricos propuestos para optimizar la demanda energética del edificio durante tres periodos: anual, calefacción -invierno-, refrigeración -verano-.

Cuantificamos, en primer lugar, la demanda energética del edificio original con la aplicación informática de simulación energética de edificios seleccionada. Para ello realizamos un modelizado energético.

El archivo informático base del modelizado original lo denominamos Archivo semilla que es el Caso 0. La versión 11 es la que consideramos definitiva para llevar a cabo el procedimiento (fig. 3.9.14).

En la siguiente tabla expresamos los valores de los parámetros aplicados en el caso 0, edificio original, para la simulación.

Como hicimos en el modelo 2, consideramos un factor de sombra de 1 (P14), para ver el efecto de una progresiva mejora de la protección solar en verano. Esta diferencia se manifestará en los resultados del edificio original, respecto a los del caso 0.

TABLA 3.1.2. VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL CASO 0, MODELO 3. CONJUNTO HEXAGONAL BASAMENTO

	ORIENTACIÓN	ALTITUD	e CUBIERTA	e Suelo	e FACHADA	U VIDRIO	U MARCO	α CUBIERTA	α FACHADA	α MARCO	m FACHADA	m FORJADOS	g VIDRIO	FS VERANO	INF. HUECOS	PP.TT.
CASO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P16	P17
0	97	5	0	0	0	5.7	2.2	0.2	0.7	0.2	1140	1330	1	1	100	0.96

Como diferencias principales con el modelo 2, consideramos la orientación de partida del hexágono central de los siete proyectados, con un ángulo de 97°, la absorptancia de la fachada verde, a la que damos un valor de $\alpha=0.7$, y la de la cubierta, a la que asignamos un $\alpha=0.2$.



Figura 3.9.14 Modelizado en la herramienta de simulación HULC. Vista en planta y perspectiva. Se modeliza la sombra sobre el patio, según proyecto. Fuente: Elaboración propia

Paso 1. Generación de los casos utilizados en el análisis tras combinar al azar diferentes valores de los 16 parámetros de interés. Muestreo multiparamétrico

De cada uno de los parámetros en estudio determinamos los rangos de valores en los que el edificio se muestra más sensible a la variación de su demanda energética. Realizamos el cálculo uniparamétrico por medio de la aplicación informática aportada para la investigación, APE_3 ,

Se realizan dieciséis test, donde variamos cada vez un parámetro, según se describe en el procedimiento. Los resultados se almacenan en una hoja de cálculo, reproducida en el anejo A2.3.1 y se ilustran en las figuras 1a del anejo A1.3.

Obtenemos la demanda energética en función de la variación de cada parámetro seleccionado.

Seleccionamos las combinaciones paramétricas con el método Markov-Chain Monte Carlo: En primer lugar, generamos al azar 10 000 casos mediante el método de Markov-Chain Monte Carlo, asignando un mayor peso a los rangos de valores donde la pendiente es mayor (muestra mayor sensibilidad a la variación, por lo que lo denominamos *muestreo sensible*.)

Los casos generados se listan en el anejo A2.3. Son 10 000 casos con 16 variables, que son los valores asignados a los parámetros, y 12 resultados mensuales, que agrupamos en anual, sumando los doce meses, calefacción, sumando los meses de invierno y refrigeración, con la suma de los meses de verano. El A2.3.2 es el muestreo sensible.

En segundo lugar generamos un segundo muestreo donde la distribución de los valores de las variables se hace de modo uniforme. Se realiza también con el método Markov-Chain Monte Carlo y lo denominamos *muestreo uniforme*, listado en el anejo A2.3.3.

Paso 2. Cuantificación de la influencia de cada parámetro en la demanda energética del edificio

Cuantificamos la demanda energética de los 10 000 casos del muestreo sensible y los 10 000 del uniforme, con la herramienta informática propia, APE_3 . Se calcula la batería de casos propuesta para obtener las demandas energéticas de todos los casos. Se ha asignado un tiempo de cálculo por caso de 3 minutos, ya que el tiempo de cada caso es siempre menor, resultando un tiempo total de 1 000 horas en una computadora. Se utilizan multiprocesadores para optimizar el tiempo de obtención de resultados, dividiendo el tiempo por 16 procesadores, a un total de 62,5 horas.

Se obtienen los resultados en una hoja de cálculo con las 10 000 líneas de inputs y resultados por muestreo. Los reproducidos en el anejo A2.3.

Cuantificamos, por separado y controlados por los demás, la influencia de cada parámetro: Reproducimos las tablas de resultados en el capítulo 4.3. Obtenemos los coeficientes de determinación de cada parámetro de modo individual: se representan en los gráficos 3a y 3b del anejo A1.3 (sufijo u: CALEu, REFu, ANUAu)

Obtenemos los coeficientes de determinación de cada parámetro controlado por los restantes: se representan en los gráficos 4a y 4b del anejo A1.3. (sufijo a: CALEa, REFa, ANUAa) (varianza explicada con ANOVA)

Paso 3. Selección de los valores (rango de valores) de cada parámetro que minimizan la demanda energética del edificio.

Tras el análisis de los resultados seleccionaremos las combinaciones paramétricas más favorables

Paso 4. Simulación de los casos con valores de los parámetros incluidos en los rangos obtenidos en el Paso 3 y optimización

Una vez realizados los casos óptimos, los calcularemos y evaluaremos los resultados en el apartado 4.5.3.



Figura 3.9.15 Vista cenital de la escalera metálica y el patio donde se ubica. Arriba el lucernario actual, modificado tanto en posición como en acabado respecto al proyecto. Foto del autor



3.10. EDIFICIO 4. EDIFICIO ESCALONADO “BABILONIA”

3.10.1. Antecedentes

El bloque escalonado, conocido como Edificio Babilonia, fue proyectado por Antonio Bonet Castellana en noviembre de 1965, después del Conjunto Hexagonal y los Apartamentos Maralet, a lo largo de la carretera principal de La Manga.

Según consta en el Archivo Municipal de Cartagena, el proyecto fue visado en el Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid el 14 de junio de 1966 y el promotor fue Urmenor, S.A.

El tipo escalonado y modular está pensado inicialmente para repetirse linealmente hasta 360 metros. Parten de la tipología propuesta en el año 1932 por Le Corbusier en el edificio Durand (complejo residencial turístico Oued-Ouchaia para E. Durand, entre 1932 y 1938, figura 3.10.3).

Bonet trabaja por primera vez con la tipología escalonada en uno de los modelos de la unidad de habitación para el Plan de Bajo Belgrano, en Buenos Aires (1949), tras el que proyecta el edificio Terraza Palace, del que destacan los *rompesoles*, como definía Bonet a las protecciones solares. (Ródenas García, 2014).

El arquitecto indica en la memoria del proyecto que busca adaptarse al paisaje, que califica de extraordinario, y obtener un máximo de vistas y soleamiento en cada una de las viviendas: *“los pisos se van escalonando de modo que la terraza del piso superior sea el techo de una parte de la vivienda del piso inferior”* (Bonet Castellana, 1965).

Por esta razón plantea un bloque escalonado, de gran horizontalidad, poca altura, obteniendo grandes terrazas orientadas a los dos mares. Las terrazas, que el arquitecto califica de *“verdadero sitio de estar de la vivienda”*, son clave en el planteamiento arquitectónico de este proyecto.

Existen tres tipos de vivienda, uno por planta, que se repiten con dos ejes de simetría. El programa de la vivienda de la primera planta cuenta con estar-comedor y terraza, tres dormitorios, dos baños y un aseo, cocina y terraza de servicio.

La de la segunda planta es de dos dormitorios, estar con terraza a la fachada, cocina y terraza de servicio, baño completo y otro integrado en un dormitorio.



Figura 3.10.1 Fotografía histórica del edificio escalonado Babilonia. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana (Ródenas García, 2014)



Figura 3.10.2 Fotografía histórica del edificio escalonado Babilonia. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana (Ródenas García, 2015)

La vivienda de la tercera planta, ya de menor superficie, consta de estar con su correspondiente terraza exterior, cocina y patio de servicio, dos dormitorios y un baño completo (fig 3.10.14).

El presupuesto de ejecución material es de 58.671.443,28 pesetas.



Figura 3.10.3 Proyecto Durand, Le Corbusier. Primera versión, octubre 1932 (Ródenas García, 2014)

Obtenemos datos del edificio mediante observación y experimentación, estudiando el proyecto original, el contenido de publicaciones relacionadas y la obra construida, con visitas y trabajos de campo.

Como fuentes primarias realizamos inspecciones del edificio construido, realizando mediciones y fotografías del edificio en la situación actual que utilizamos para el levantamiento gráfico. Como fuentes secundarias, realizamos un estudio de bibliografía específica, datos de archivos históricos, teniendo acceso al proyecto original del Archivo Municipal de Cartagena.

Existen fotografías aéreas en el Archivo fotográfico de La Manga del Mar Menor y en la Infraestructura de datos espaciales de referencia de la Región de Murcia (www.iderm.es y www.cartomur.imida.es) (fig. 3.10.5).

La Fundación DOCOMOMO Ibérico tiene el edificio catalogado, con la referencia MU04

Encontramos la ficha original del expediente del Colegio de Arquitectos, del año 1971 con número general 44.092. El promotor es Urbanizadora LA ALTURA S.A. y la obra fue dirigida junto con Joaquín Peñalver Ruiz (fig.3.10.4).

Nº General	44.092	Nº Part.	1-84
		AÑO	1971
Arquitecto Autor	D. Antonio BONET CASTELLANA		
Director D.	" " "	y D. Joaquín PEÑAL-VER RUIZ	
Aparejador	D. Diego SOLER y D. Miguel MARTINEZ SIMO		
Propietario D.	Urbanizadora LA ALTURA S.A.		
Domicilio	c/ de Orense nº 11 Madrid-20.		
Clase de la obra	Proyecto de Apartamentos escalonados.		
Emplazamiento	La Manga del Mar Menor.-Cartagena.		
Presupuesto	27.886.288'00	Ptas.	
Las honorarios en caso de no alterarse el presupuesto, ascienden a 1.443.115'00 Ptas.			
que se percibirá según tarifa 1ª Grupo 5ª % 4'5 1.254.882'00			
Honorarios proyecto		627.441'00	>
" dirección		627.441'00	>
50% fuera residencia		188.232'00	>

Figura 3.10.4 Ficha nº 44092 del registro histórico del Colegio de Arquitectos de Murcia, del proyecto del Edificio Escalonado Babilonia, de Antonio Bonet Castellana



Figura 3.10.5 Arriba, ortofoto de 1981. Abajo, ortofoto 2011. Fuente CARTOMUR (IDERM)

3.10.2. Definición gráfica

Realizamos un levantamiento de planos para el estudio del edificio seleccionado. Utilizamos como base los planos originales de proyecto, obtenidos del Archivo Municipal de Cartagena, reproducidos en las figuras 3.10.7 y siguientes.

Esta modelización será la base del modelizado energético en el programa de simulación seleccionado. Para ello necesitamos la descripción gráfica completa del edificio y la definición constructiva de su envolvente térmica.

El proyecto original tiene fecha de julio de 1965 (fig. 3.10.3). El sello de visado del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid es del 14 de junio de 1966.

El edificio ha sufrido distintas transformaciones desde que fue construido: se han cerrado de terrazas de servicio en los patios interiores, han aparecido de toldos o se han eliminado las jardineras en las terrazas. Aún así, el edificio mantiene gran parte de las propuestas arquitectónicas originales y aún se está a tiempo para su protección.

Junto con los dos conjuntos anteriores, fue catalogado como elemento protegido por el Plan General de Cartagena (ficha 160910) con un grado de protección 3, pero la anulación del Plan General, tras la sentencia de nulidad del Tribunal Supremo (29 de diciembre de 2011), ha vuelto a dejar en suspenso esta protección, que debería ser recuperada cuanto antes.



Figura 3.10.6 Imágenes históricas de la obra. Izquierda, edificio en construcción, derecha, folleto publicitario del Edificio, con un dibujo de las viviendas. Fuente: Archivo Fotográfico de La Manga.

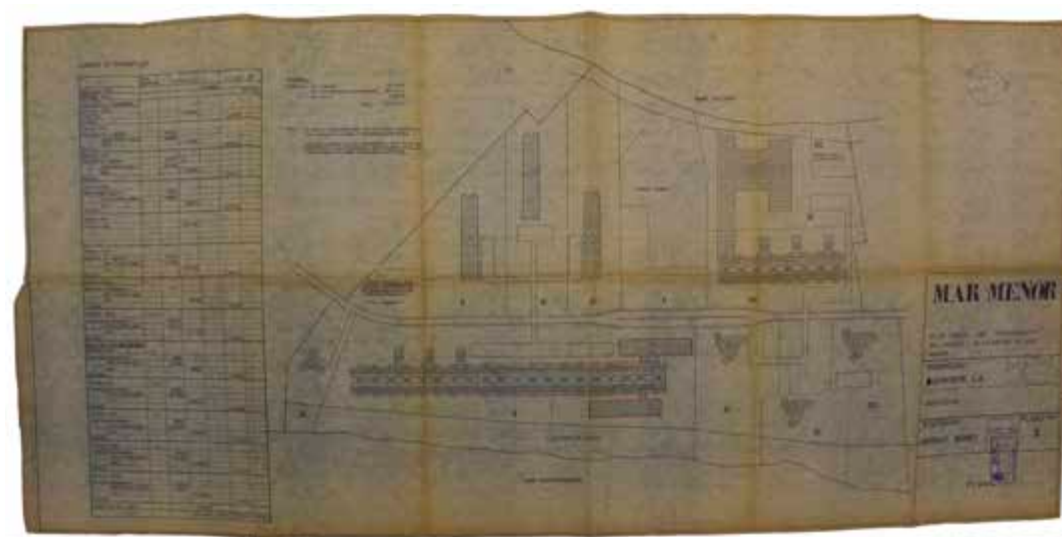


Figura 3.10.7 Plano del Plan Parcial de Ordenación del Núcleo 1 de la Manga del Mar Menor. Enero de 1967. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

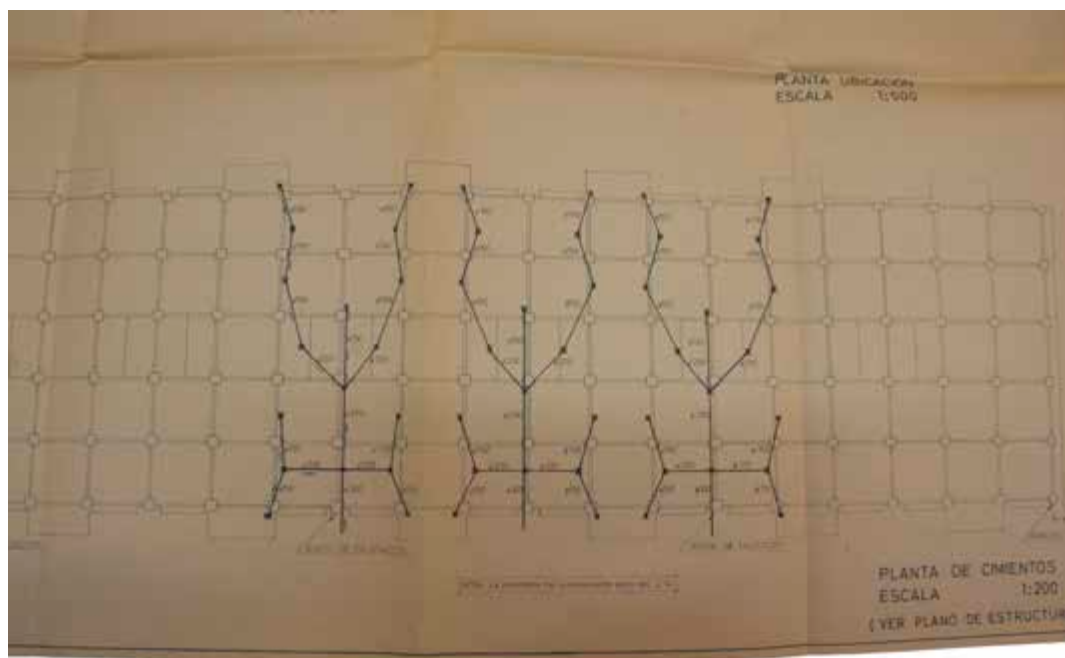


Figura 3.10.8 Plano de cimientos del proyecto. Escala original 1/200. Edificio Escalonado Babilonia. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana.. Fecha julio de 1965. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

3.10.3. Definición constructiva

La toma de datos in situ completa la definición constructiva que hacemos a continuación. Extraemos la siguiente información de la memoria del proyecto (Bonet Castellana, 1965)

La cimentación se realiza mediante pilotaje de 60 cm de diámetro hormigonados in situ, uniendo las cabezas por vigas de atado de hormigón armado, con una dosificación de 350 kg de cemento, 400 litros de arena y 800 litros de grava¹ (fig. 3.10.8). Cada pilote está dimensionado para 60 toneladas. La resistencia característica del hormigón de los encepados es de 180 kg/cm².

El suelo de la planta baja se realiza mediante solera de espesor 20 centímetros, con hormigón en masa:

El arquitecto define la estructura como formada por *“columnas de hierro forjadas de viguetas de hormigón pretensadas y vigas planas de hormigón armado embutidas en el forjado”*, que representa un forjado unidireccional con viga plana soportado por pilares metálicos. La resistencia característica del hormigón en forjados es alta para la época, 225 kg/cm², justificado por el Bonet por el alto límite elástico del acero REA-46.

“El tipo de forjado empleado en el Proyecto está constituido por unas viguetas pretensadas de 12 cm. de altura, que a la vez sostienen los bloques vibrados que aligeran el forjado, constituyen como quien dice la armadura correspondiente a los momentos positivos de las vigas.

Se ha proyectado una vigueta cuya sección exacta figura en los planos, del mínimo peso posible para facilidad de manejo, y para ésto se prevé una resistencia a la rotura de 750 Kg/cm². en el hormigón que la constituye.

Esta supercalidad proyectada tiene por objeto no solo la facilidad de manejo de que antes hemos hablado, si no además disminuye al máximo la posibilidad de deslizamiento de los aceros que la pretensan.

Estos aceros son de ϕ 2m/m, con lo cual también disminuimos la posibilidad de deslizamiento y el riesto (sic) de su empleo en Taller”

Bonet Castellana, 1965

1. En la memoria del proyecto original se indica *“hormigón armado de 350 kgs”* (Bonet Castellana, 1965)

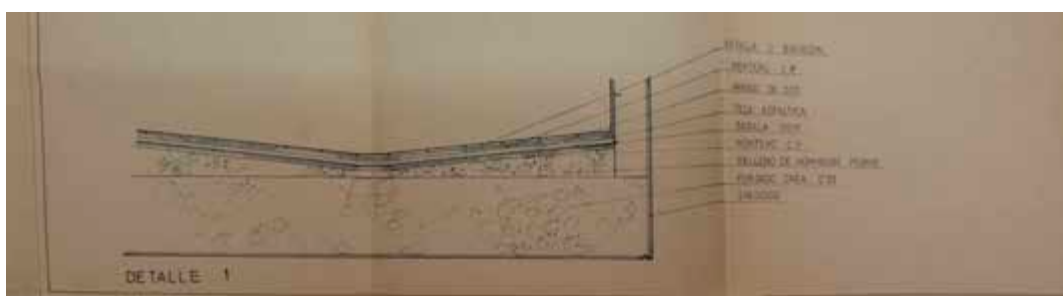
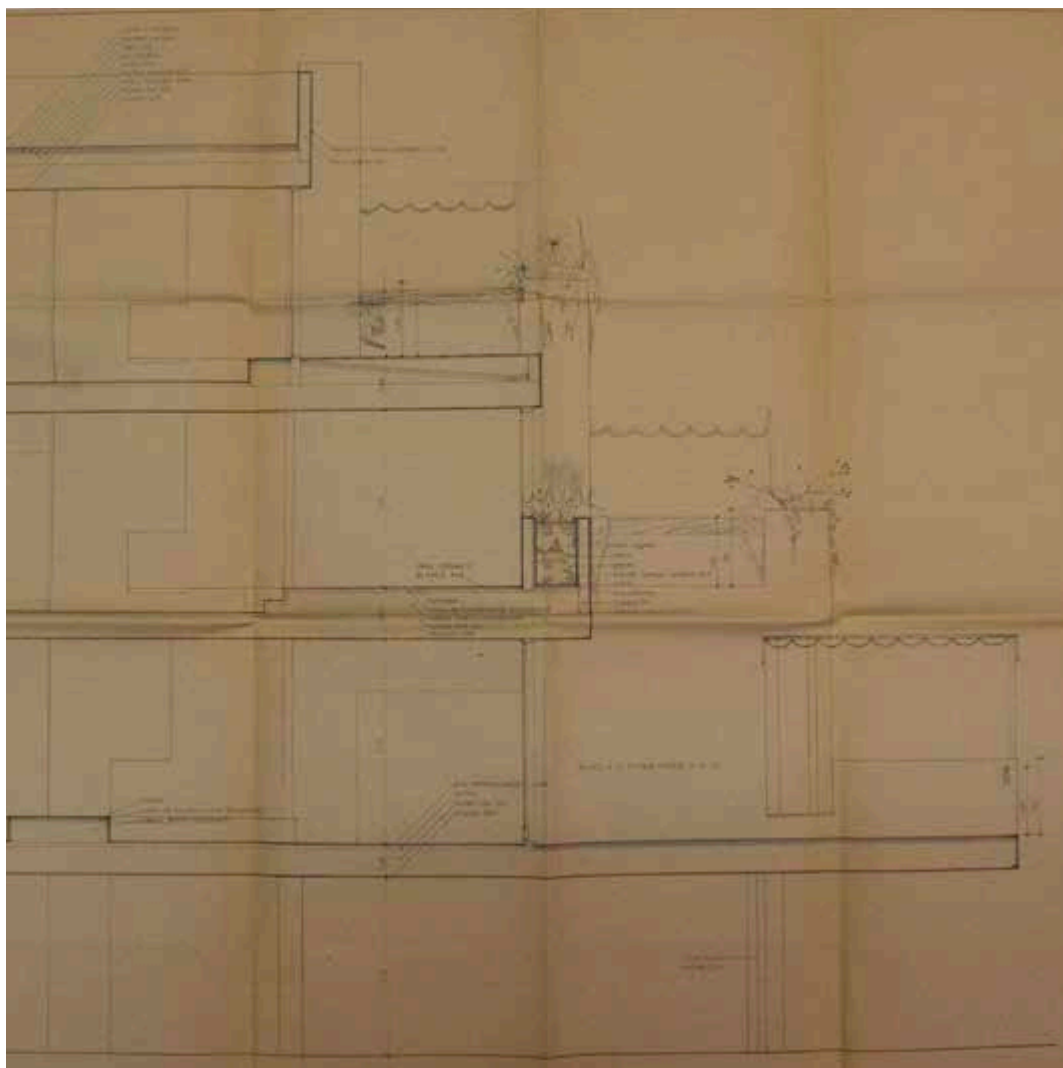


Figura 3.10.9 Arriba, plano de sección constructiva del proyecto original. Escala original 1/20. Abajo detalle constructivo de la cubierta. Edificio Escalonado Babilonia. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana.. Fecha julio de 1965. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

Este proyecto, de 1965, contiene un mayor grado de definición que los dos anteriores consultados, tanto en los planos de sección como en las carpinterías y detalles constructivos específicos (fig.3.10.9).

La cubierta es plana, con pendientes realizadas con hormigón celular, impermeabilizado y acabado en gravilla, según la memoria y baldosín según el detalle constructivo (fig. 3.10.9).

La fachada está realizada por un muro a la capuchina, con una hoja principal de ladrillo de 1/2 pie, cámara de aire y trasdosado interior con tabique de ladrillo.

Los vidrios están descritos en la memoria como *“luna pulida Cristañola en puertas y ventanas exteriores: vidrio impreso en aseos. Vidrio moldeado en cocina”*.(fig. 3.10.17)

La tabiquería interior de la vivienda es de ladrillo hueco sencillo y la separación entre viviendas se realiza con un ladrillo hueco doble de 1/2 pie.

Los paramentos verticales van revestidos con enfoscado y revoco de cemento y los techos interiores guarnecidos y enlucidos de yeso.

El solado original de los apartamentos se realiza con gres blanco de 6x6.

Cocinas y baños se alicatan con azulejo hasta el techo.

TABLA 3.10.1. EDIFICIO ESCALONADO BABILONIA. CARACTERIZACIÓN DE LA ENVOLVENTE TÉRMICA DEL EDIFICIO ORIGINAL.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	U (W/m ² K)
FACHADA	Hoja exterior medio pie de ladrillo perforado, mortero de cemento 1cm, cámara de aire 5 cm y hoja interior de ladrillo hueco simple. Revestimientos continuos, exterior revoco color claro, interior enlucido de yeso.	U=1.27
CUBIERTA	Plana, acabado baldosín catalán sobre mortero de cemento	U=1.89
SUELO	Forjado unidireccional de hormigón armado, con solado de terrazo sobre base tradicional	U=2.10
CARPINTERÍA	Madera	U=2.2
VIDRIOS	Monolítico transparente de 5 mm.	U=5.7 g=0.85

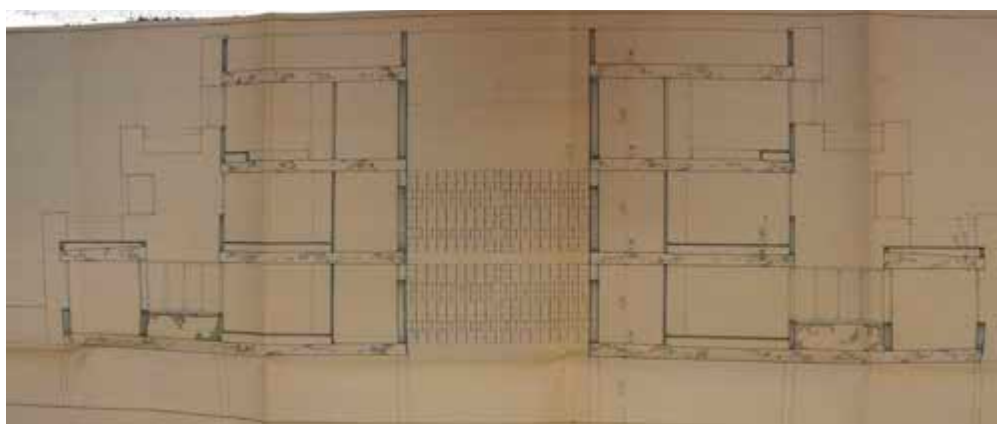
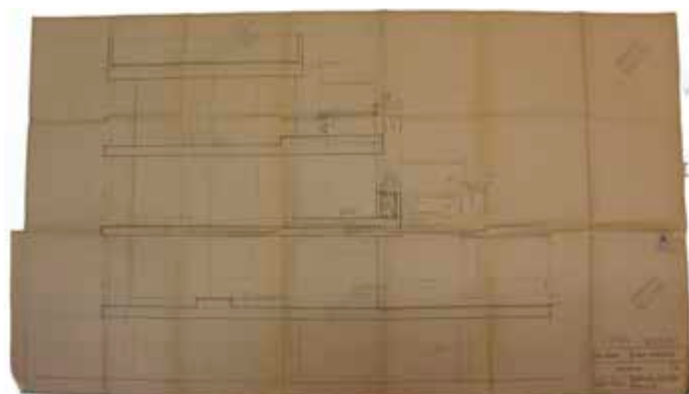
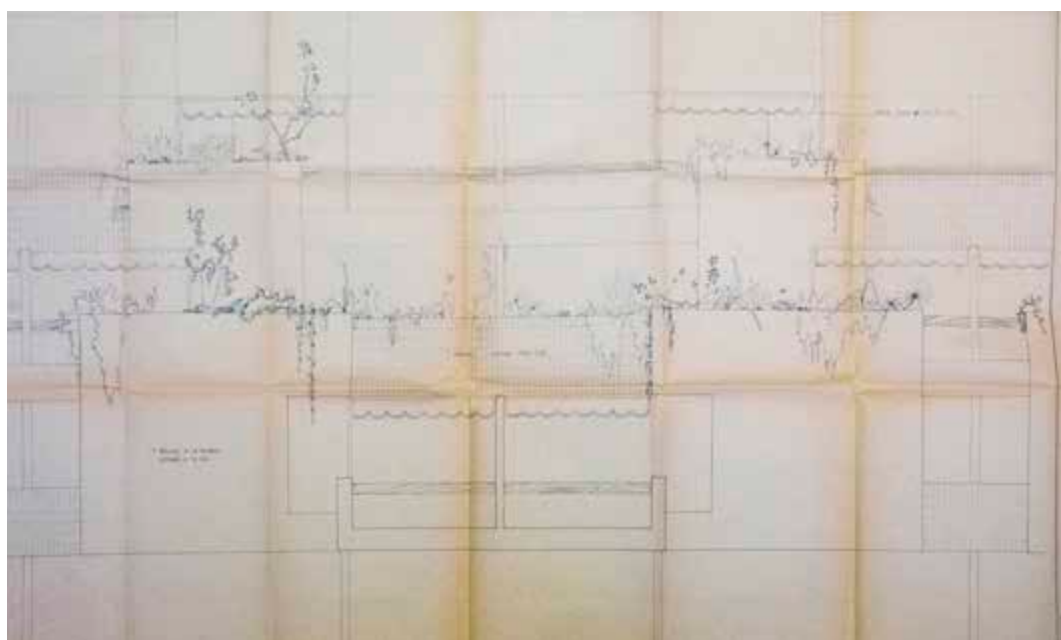


Figura 3.10.10 Planos de alzado y secciones del proyecto original del Edificio Escalonado Babilonia. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana.. Fecha julio de 1965. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena.

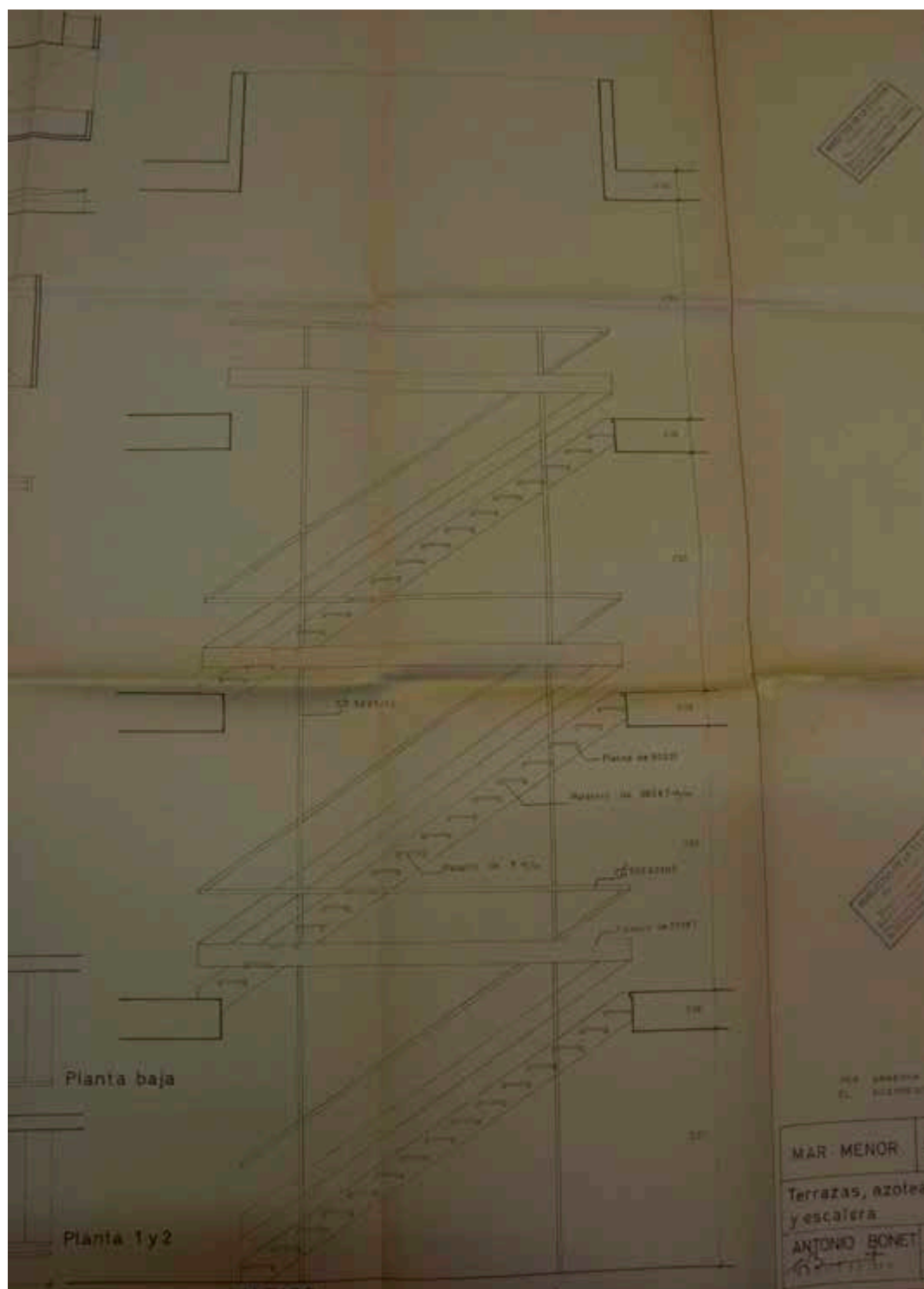
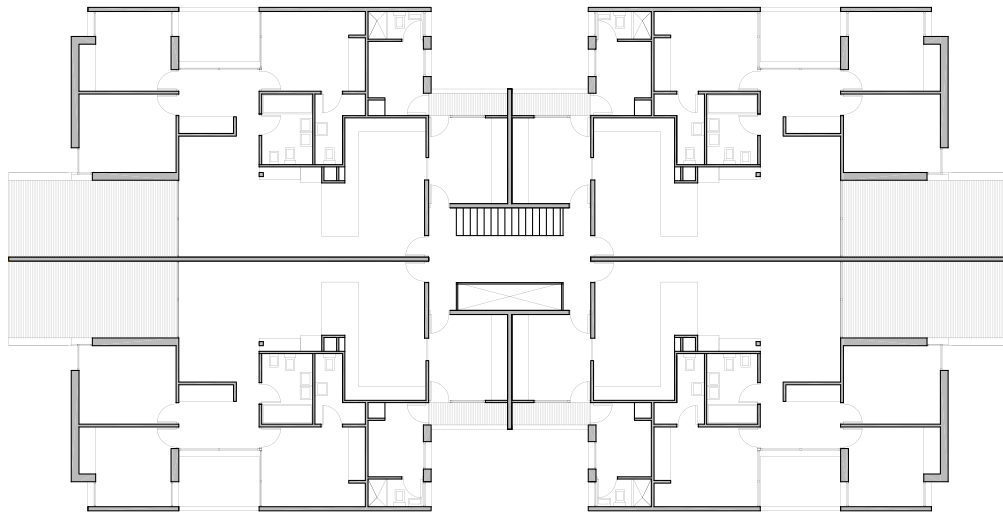
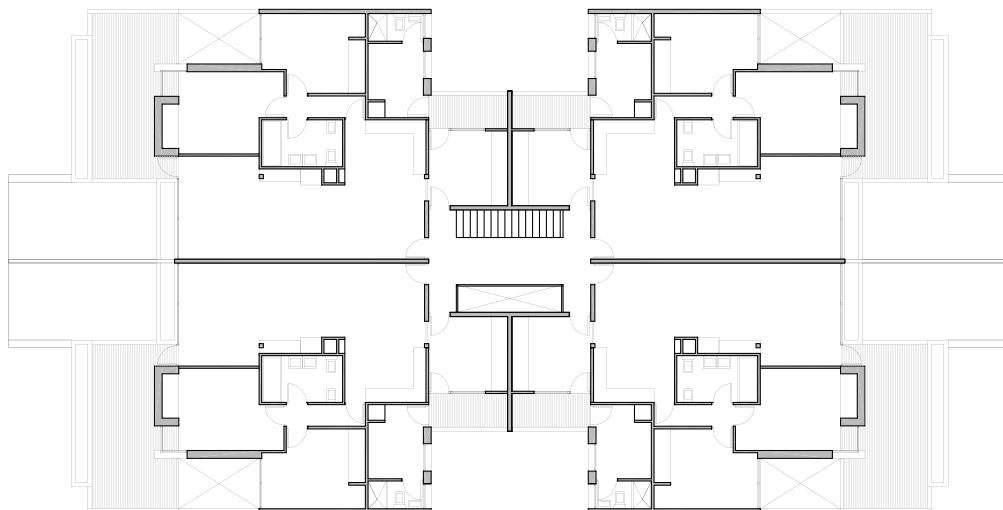


Figura 3.10.11 Sección por la escalera del proyecto original del Edificio Escalonado Babilonia. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana. Fecha julio de 1965. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena



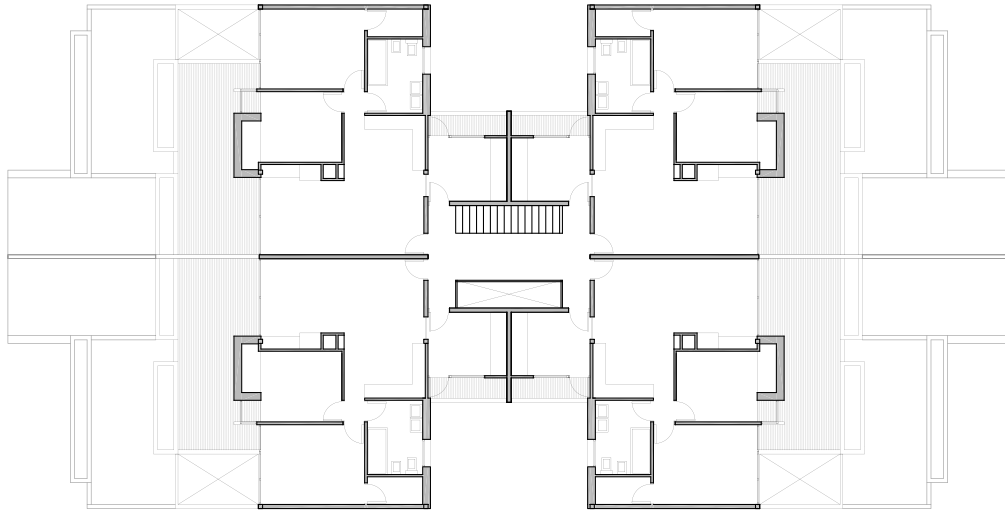
PLANTA PRIMERA



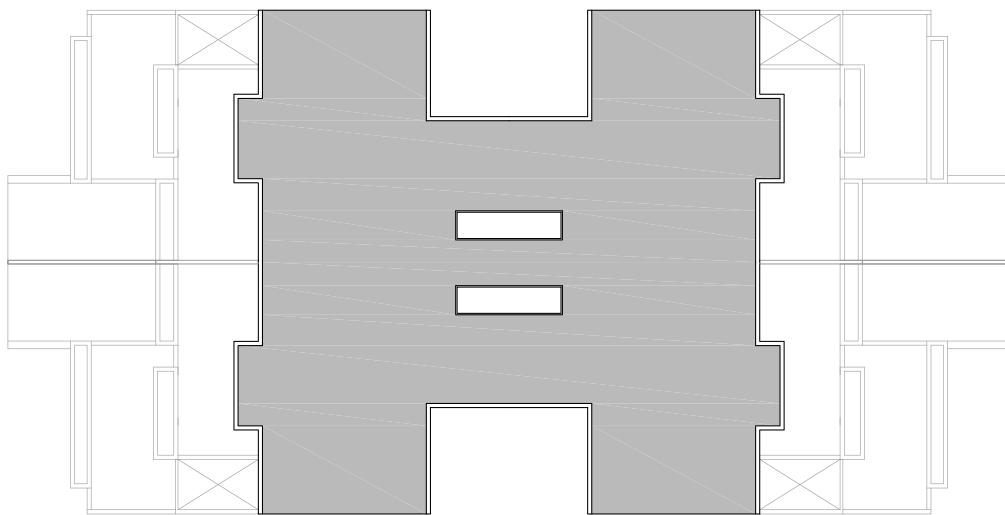
PLANTA SEGUNDA



Figura 3.10.13 Planta primera y segunda del Edificio Escalonado Babilonia. Fuente: elaboración propia



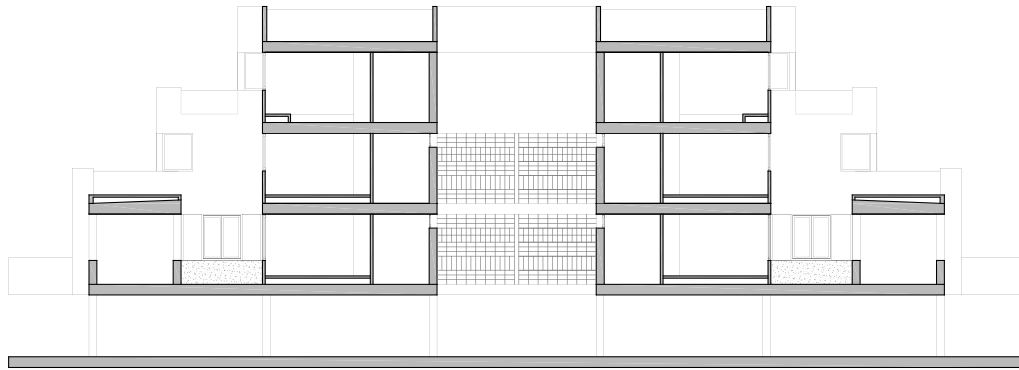
PLANTA TERCERA



PLANTA CUBIERTA



Figura 3.10.14 Planta tercera y cubiertas. Edificio Escalonado Babilonia. Fuente: elaboración propia



SECCIÓN



ALZADO
0 10 50

Figura 3.10.15 Sección y alzado principal. Edificio Escalonado Babilonia. Fuente: elaboración propia



Figura 3.10.16 Carpintería de las tres viviendas del edificio escalonado Babilonia, realizado por el autor tras examinar el proyecto y el edificio existente. Fuente: elaboración propia

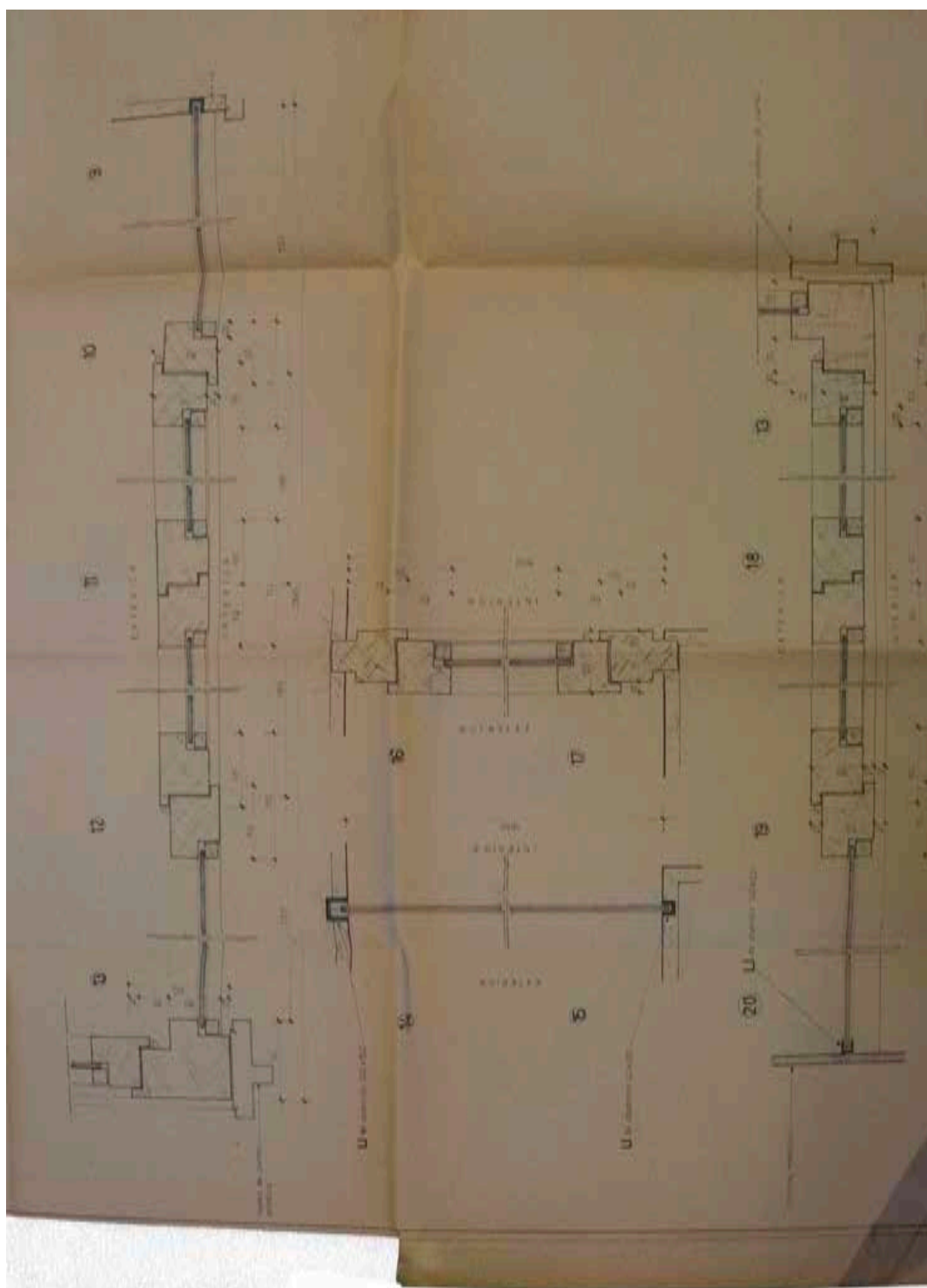


Figura 3.10.17 Detalles de carpintería del proyecto original del Edificio Escalonado Babilonia. Arquitecto: Antonio Bonet Castellana.. Fecha julio de 1965. Fuente: Archivo Municipal de Cartagena

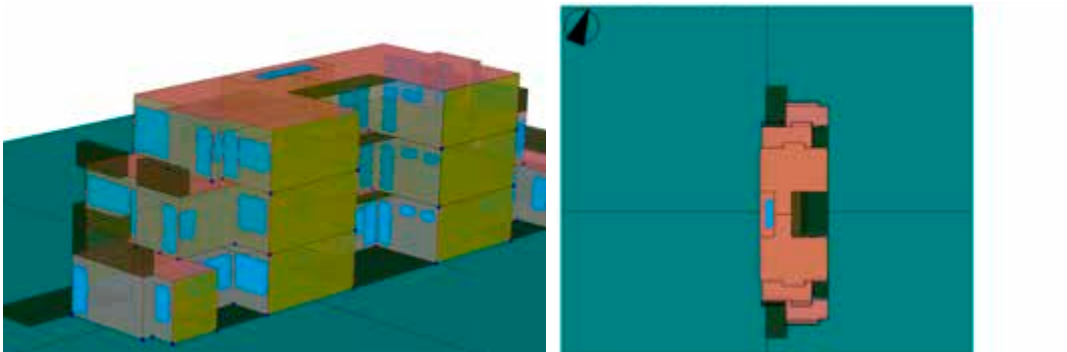


Figura 3.10.18 Modelizado en la herramienta de simulación HULC. Vista en planta y perspectiva.
Fuente: Elaboración propia



Figura 3.10.19 Fotografías del Edificio Escalonado Babilonia en la inspección realizada en agosto de 2016 por el autor

3.10.4. Estudio del caso. Procedimiento de obtención de datos aplicado

Aplicamos el procedimiento propuesto al primer edificio seleccionado. Buscamos analizar la influencia de los dieciséis parámetros matéricos propuestos para optimizar la demanda energética de un edificio determinado durante tres periodos: anual, calefacción -invierno-, refrigeración -verano-.

Primero cuantificamos la demanda energética del edificio original con la aplicación informática de simulación energética de edificios seleccionada. Para ello realizamos un modelizado energético.

El archivo informático base del modelizado original lo denominamos Archivo semilla, que corresponde con el Caso 0. La versión 10 es la que consideramos definitiva para llevar a cabo el procedimiento (fig. 3.10.18).

En la siguiente tabla expresamos los valores de los parámetros aplicados en el caso 0, edificio original, para la simulación.

TABLA 3.10.2. VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL CASO 0, MODELO 4 EDIFICIO ESCALONADO BABILONIA, EDIFICIO ORIGINAL.

	ORIENTACIÓN	ALTITUD	e CUBIERTA	e Suelo	e FACHADA	U VIDRIO	U MARCO	α CUBIERTA	α FACHADA	α MARCO	m FACHADA	m FORJADOS	g VIDRIO	FS VERANO	INF. HUECOS	PP.TT.
CASO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P16	P17
0	58	5	0	0	0	5.7	2.2	0.5	0.2	0.2	1140	1330	1	1	100	0.96

De cada uno de los parámetros en estudio determinamos los rangos de valores en los que el edificio se muestra más sensible.

Realizamos el cálculo uniparamétrico por medio de la aplicación informática propia, APE_3 , que utilizando el motor de cálculo de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER -HULC-.

Se realizan dieciséis test, donde variamos cada vez un parámetro, según se describe en el procedimiento. Los resultados se almacenan en una hoja de cálculo, reproducida en el anejo A2.4.1. y se ilustran en las figuras 1a del anejo A1.4.



Figura 3.10.20 Fotografías de los patios, del interior y de las carpinterías del Edificio Escalonado Babilonia en la inspección realizada en agosto de 2016 por el autor

Obtenemos la demanda energética en función de la variación de cada parámetro seleccionado.

Selección de las combinaciones paramétricas: Método Markov-Chain Monte Carlo:

En primer lugar, generamos al azar 10 000 casos mediante el método de Markov-Chain Monte Carlo, asignando un mayor peso a los rangos de valores donde la pendiente es mayor (muestra mayor sensibilidad a la variación, por lo que lo denominamos *muestreo sensible*.)

Los casos generados se listan en el anejo A2.4.2. Son 10 000 casos con 16 variables, que son los valores asignados a los parámetros, y 12 resultados mensuales, que agrupamos en anual, sumando los doce meses, calefacción, sumando los meses de invierno y refrigeración, con la suma de los meses de verano.

En segundo lugar generamos un segundo muestreo donde la distribución de los valores de las variables se hace de modo uniforme. Se realiza también con el método Markov-Chain Monte Carlo y lo denominamos *muestreo uniforme* (Anejo A2.4.3).

Paso 2. Cuantificación de la influencia de cada parámetro en la demanda energética del edificio

Cuantificamos la demanda energética de los 10 000 casos del muestreo sensible y los 10 000 del uniforme, con la herramienta informática propia, APE_3 .

Se calcula la batería de casos propuesta para obtener las demandas energéticas de todos los casos. Se ha asignado un tiempo de cálculo por caso de 5 minutos, ya que el tiempo de cada caso es siempre menor, resultando un tiempo total de 1.666.67 horas en una computadora. Se utilizan multiprocesadores para optimizar el tiempo de obtención de resultados, dividiendo el tiempo por 16 procesadores, obteniendo los resultados en 104,17 horas.

Se obtienen los resultados en una hoja de cálculo con las 10 000 líneas de inputs y resultados por muestreo. Los reproducidos en el tomo de resultados, Anejo A2.4.2.

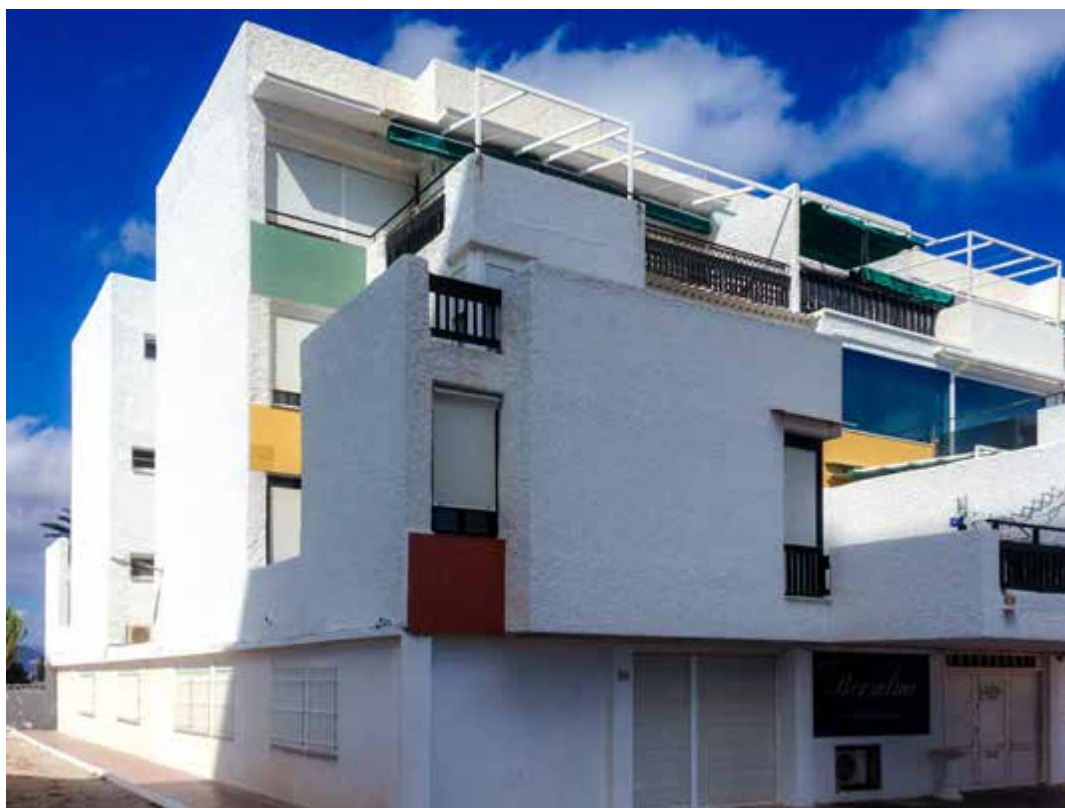


Figura 3.10.21 Fotografías de la esquina sureste del Edificio Escalonado Babilonia en la inspección realizada en agosto de 2016 por el autor

Cuantificamos, por separado y controlados por los demás, la influencia de cada parámetro.

Reproducimos las tablas de resultados en el capítulo 4.4.

Obtenemos los coeficientes de determinación de cada parámetro de modo individual: se representan en los gráficos 3a y 3b del anejo A1.4 (sufijo u: CALEu, REFu, ANUAu).

Obtenemos los coeficientes de determinación de cada parámetro controlado por los restantes: se representan en los gráficos 4a y 4b del anejo A1.4 (sufijo a: CALEa, REFa, ANUAa) (varianza explicada con ANOVA)

En el muestreo sensible apreciamos que las medias son menos continuas en la zona donde la selección de valores del parámetro fue menor, es decir, donde existen menos casos propuestos por el método MCMC. Parece que esa dispersión variará si acumulamos más resultados por lo que revisamos la metodología de análisis para corregirlo. Este hecho provocó, como hemos explicado, el planteamiento de un segundo muestreo uniforme.

Paso 3. Selección de los valores (rango de valores) de cada parámetro que minimizan la demanda energética del edificio.

Tras el análisis de los resultados seleccionaremos las combinaciones paramétricas más favorables

Paso 4. Simulación de los casos con valores de los parámetros incluidos en los rangos obtenidos en el Paso 3 y optimización.

Una vez realizados los casos óptimos, los calcularemos y evaluaremos los resultados en el apartado 4.5.4

IV. RESULTADOS



IV. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS CASOS BASADOS EN EL MODELO 1. CONJUNTO MARALET

Aplicamos la metodología propuesta al primer edificio seleccionado. Buscamos analizar la influencia de 16 parámetros matéricos seleccionados en la demanda energética del edificio durante tres periodos: anual, calefacción -invierno-, refrigeración -verano-.

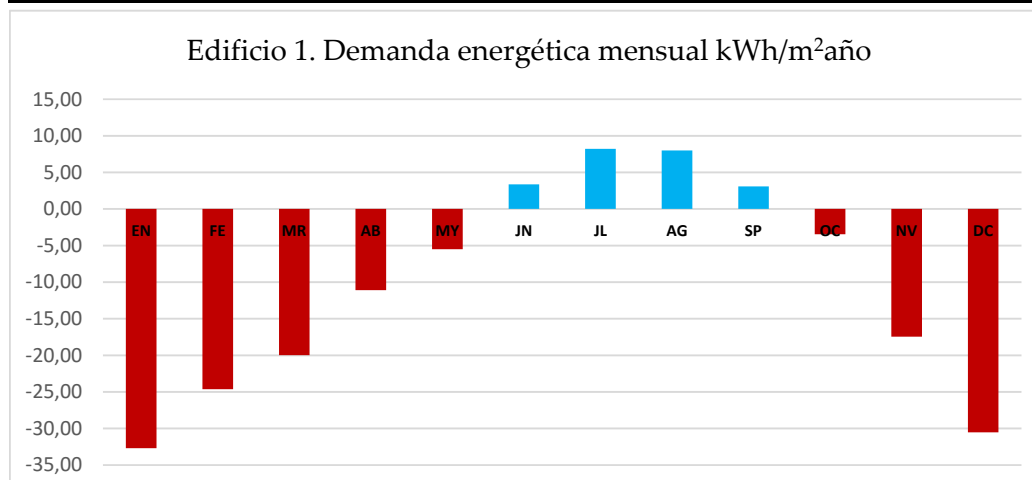
4.1.1. Resultados del edificio original

Cuantificamos la demanda energética del edificio original con la aplicación informática de simulación energética de edificios seleccionada.

Con los datos obtenidos en la investigación procedemos al modelizado y simulación del edificio, obteniendo los siguientes resultados de demanda energética:

TABLA 4.1.1. RESULTADOS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO 1

RESULTADOS A NIVEL EDIFICIO												(kWh/m2 del edificio)	
Anual	168,05			Cal.	-145,43			Refr.	22,62				
	EN	FE	MR	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DC	
	-32,70	-24,64	-19,98	-11,11	-5,51	3,35	8,21	7,98	3,08	-3,47	-17,47	-30,54	



Analizamos pormenorizadamente los datos de demanda energética desglosándola por componentes, en calefacción y refrigeración y los representamos en la siguiente figura:

	CALEFACCIÓN				REFRIGERACIÓN			
	PERDIDAS		GANANCIAS		PERDIDAS		GANANCIAS	
TOTAL	-196.18	-100.0%	50.79	100.0%	-25.02	-100.0%	47.60	100.0%
Fachadas opacas	-29.01	-14.8%	0.02	0.0%	-2.22	-8.9%	2.03	4.3%
Cubiertas	-33.00	-16.8%	0.40	0.8%	-1.31	-5.2%	6.31	13.3%
Suelos	-40.38	-20.6%	0.09	0.2%	-2.99	-12.0%	3.00	6.3%
Puentes Térmicos	-26.95	-13.7%	0.60	1.2%	-2.00	-8.0%	3.59	7.5%
Huecos radiación	0.00	0.0%	29.84	58.7%	0.00	0.0%	16.25	34.1%
Transmisión Huecos	-24.00	-12.2%	0.06	0.1%	-1.81	-7.2%	2.05	4.3%
Fuentes internas	0.00	0.0%	19.03	37.5%	0.00	0.0%	9.58	20.1%
Ventilación + Infiltración	-42.85	-21.8%	0.77	1.5%	-14.70	-58.7%	4.79	10.1%

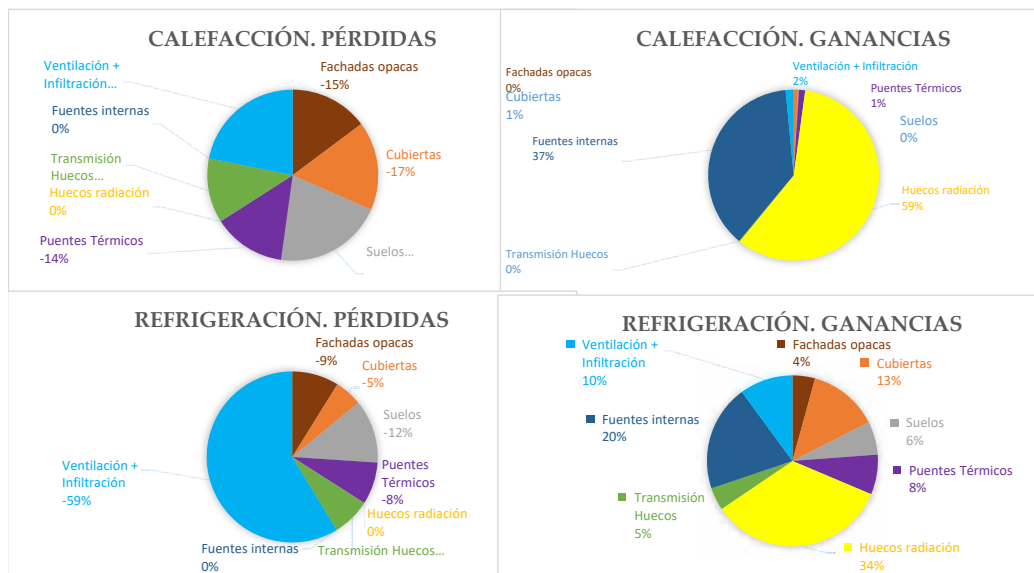


Figura 4.1.1. Datos de la demanda de calefacción y refrigeración, del Modelo 1, edificio original desglosada por componentes

Separamos pérdidas y ganancias dentro de cada periodo. En calefacción la demanda energética será igual a pérdidas menos ganancias. En refrigeración, demanda es igual a ganancias menos pérdidas.

Descontando ventilación e infiltración, cuantificamos el porcentaje de demanda debida al resto de parámetros matéricos respecto a la total.

	CALEFACCIÓN	REFRIGERACIÓN
GANANCIAS	61,0%	69,8%
PERDIDAS	-78,2%	-41,3%

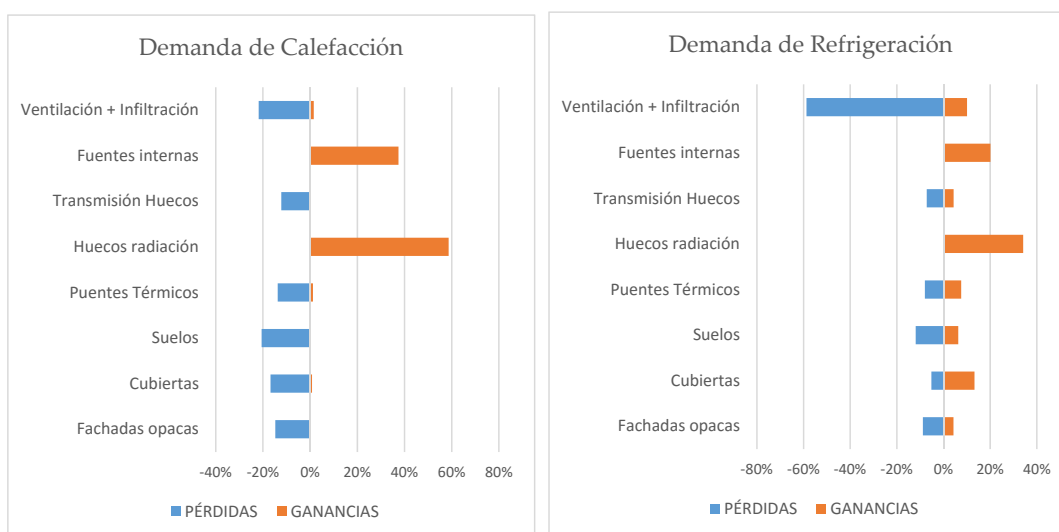


Figura 4.1.2. Datos de la demanda de calefacción y refrigeración, del edificio original 1, desglosada por componentes

Observamos que el impacto de la ventilación sobre la demanda energética es mayor en el periodo de refrigeración (fig. 4.1.1).

En calefacción, los parámetros matéricos son alrededor del 80% de las pérdidas -más la parte de la infiltración que está incluida dentro de ventilación (21% restante)-. También son gran parte de las ganancias, 60% debida a radiación solar a través de los huecos. El 37% se debe a fuentes internas, que representan las cargas térmicas por iluminación artificial, maquinaria, ocupación, que define el Documento Básico de ahorro de energía.

En refrigeración, son el 70% de las ganancias, donde la radiación solar incidente en los huecos es la mayor, con un 34%. El 30% restante corresponden a ventilación y fuentes internas.

La mayor parte de las pérdidas energéticas en refrigeración son consecuencia de ventilación e infiltración (59%). El software considera, por exigencia normativa, una ventilación nocturna en los cuatro meses de verano de 4 renovaciones por hora en su perfil de uso de 1 a 8 horas, ambas incluidas (en el apéndice C del DB HE).

4.1.2. Rangos sensibles uniparamétricos

Determinamos los rangos de valores en los que el edificio se muestra más sensible a la variación de cada parámetro así como las posibilidades máximas de mejora. Para ello realizamos el primer test uniparamétrico, consistente en variar cada vez un parámetro de modo independiente para ver como se comporta la demanda energética del edificio original y establecer su sensibilidad a esa variación.

El listado de resultados del cálculo uniparamétrico se exponen en el anexo A2.1.1. La serie 1 de gráficas ilustra los resultados obtenidos tras la variación de cada parámetro y está reproducida en el Anexo A1.1.

Representamos los resultados obtenidos en la tabla 4.1.2, donde se expresan los valores máximos, mínimos y el rango de variación para cada uno de los test. Ordenamos los parámetros en función de los resultados, de máxima a mínima reducción demanda energética en valor absoluto alcanzada, en los tres periodos analizados, en las tablas 4.1.3.

TABLA 4.1.2. RESULTADOS DE DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m² año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO. VALORES MÍNIMOS, MÁXIMOS Y RANGO DEL MODELO 1

MODELO EDI01c		CALEFACCIÓN			REFRIGERACIÓN			ANUAL		
		MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO
P1	ORIENTACIÓN	-125.34	-146.11	-20.77	20.78	29.25	8.48	147.74	171.75	24.01
P2	ALTITUD	-144.99	-145.44	-0.45	22.59	22.62	0.03	167.58	168.06	0.48
P3	e CUBIERTA	-125.96	-145.43	-19.47	19.37	22.62	3.24	145.33	168.05	22.71
P4	e SUELO	-120.10	-145.43	-25.33	22.62	24.30	1.68	144.40	168.05	23.65
P5	e FACHADA	-128.19	-145.43	-17.24	22.62	23.66	1.04	151.85	168.05	16.20
P6	U VIDRIO	-130.65	-145.43	-14.78	22.62	23.59	0.97	154.23	168.05	13.81
P7	U MARCO	-143.33	-148.49	-5.17	22.40	22.75	0.35	166.08	170.91	4.83
P8	a CUBIERTA	-129.66	-159.15	-29.49	17.11	30.99	13.88	160.65	176.26	15.61
P9	a FACHADA	-126.90	-147.89	-20.99	21.65	31.45	9.80	158.35	169.54	11.19
P10	a MARCO	-142.28	-146.22	-3.94	22.21	24.32	2.11	166.60	168.43	1.83
P11	m FACHADA	-143.55	-146.08	-2.53	21.58	23.82	2.24	165.13	169.89	4.77
P12	m FORJADO	-143.20	-156.04	-12.84	21.48	37.85	16.38	164.68	193.90	29.22
P13	g VIDRIO	-145.43	-168.11	-22.68	16.01	22.62	6.61	168.05	184.12	16.08
P14	fs VERANO	-145.43	-145.44	-0.01	16.01	22.62	6.61	161.45	168.05	6.60
P16	INF. HUECOS	-139.76	-145.43	-5.66	22.11	22.62	0.51	161.87	168.05	6.17
P17	PPTT	-120.20	-145.43	-25.22	18.83	22.62	3.79	139.03	168.05	29.02
Σ	CONDUCCIÓN		6	-17.87		6	1.84		6	18.37
Σ	RADIACIÓN		5	-15.42		5	7.80		5	10.26
Σ	INERCIA TÉRMICA		2	-7.69		2	9.31		2	16.99
Σ	CONVECCIÓN		1	-5.66		1	0.51		1	6.17

TABLA 4.1.3.a. RESULTADOS DEMANDA ANUAL (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 1, CONJUNTO MARALET

MODELO EDI01		MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P17	PPTT	139.03	82.7%	168.05	100.0%	29.02	17.3%
P4	e SUELO	144.40	85.9%	168.05	100.0%	23.65	14.1%
P3	e CUBIERTA	145.33	86.5%	168.05	100.0%	22.71	13.5%
P1	ORIENTACIÓN	147.74	87.9%	171.75	102.2%	24.01	14.3%
P5	e FACHADA	151.85	90.4%	168.05	100.0%	16.20	9.6%
P6	U VIDRIO	154.23	91.8%	168.05	100.0%	13.81	8.2%
P9	a FACHADA	158.35	94.2%	169.54	100.9%	11.19	6.7%
P8	a CUBIERTA	160.65	95.6%	176.26	104.9%	15.61	9.3%
P14	FS VERANO	161.45	96.1%	168.05	100.0%	6.60	3.9%
P16	INF. HUECOS	161.87	96.3%	168.05	100.0%	6.17	3.7%
P12	m FORJADO	164.68	98.0%	193.90	115.4%	29.22	17.4%
P11	m FACHADA	165.13	98.3%	169.89	101.1%	4.77	2.8%
P7	U MARCO	166.08	98.8%	170.91	101.7%	4.83	2.9%
P10	a MARCO	166.60	99.1%	168.43	100.2%	1.83	1.1%
P2	ALTITUD	167.58	99.7%	168.06	100.0%	0.48	0.3%
P13	g VIDRIO	168.05	100.0%	184.12	109.6%	16.08	9.6%

CASO ORIGINAL

168.05

TABLA 4.1.3.b. RESULTADOS DEMANDA CALEFACCIÓN (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 1, CONJUNTO MARALET

MODELO EDI01c		MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P4	e SUELO	-120.10	82.6%	-145.43	100.0%	-25.3262	17.4%
P17	PPTT	-120.20	82.7%	-145.43	100.0%	-25.2249	17.3%
P1	ORIENTACIÓN	-125.34	86.2%	-146.11	100.5%	-20.7698	14.3%
P3	e CUBIERTA	-125.96	86.6%	-145.43	100.0%	-19.4677	13.4%
P9	a FACHADA	-126.90	87.3%	-147.89	101.7%	-20.9859	14.4%
P5	e FACHADA	-128.19	88.1%	-145.43	100.0%	-17.2382	11.9%
P8	a CUBIERTA	-129.66	89.2%	-159.15	109.4%	-29.4883	20.3%
P6	U VIDRIO	-130.65	89.8%	-145.43	100.0%	-14.781	10.2%
P16	INF. HUECOS	-139.76	96.1%	-145.43	100.0%	-5.66248	3.9%
P10	a MARCO	-142.28	97.8%	-146.22	100.5%	-3.94426	2.7%
P12	m FORJADO	-143.20	98.5%	-156.04	107.3%	-12.8412	8.8%
P7	U MARCO	-143.33	98.6%	-148.49	102.1%	-5.16879	3.6%
P11	m FACHADA	-143.55	98.7%	-146.08	100.4%	-2.52889	1.7%
P2	ALTITUD	-144.99	99.7%	-145.44	100.0%	-0.4471	0.3%
P13	g VIDRIO	-145.43	100.0%	-168.11	115.6%	-22.684	15.6%
P14	FS VERANO	-145.43	100.0%	-145.44	100.0%	-0.0126	0.0%

CASO ORIGINAL

-145.43

TABLA 4.1.3.c. RESULTADOS DEMANDA REFRIGERACIÓN (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO, ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 1, CONJUNTO MARALET

MODELO EDI01c	MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P14 FS VERANO	16.01	70.8%	22.62	100.0%	6.61	29.2%
P13 g VIDRIO	16.01	70.8%	22.62	100.0%	6.61	29.2%
P8 a CUBIERTA	17.11	75.6%	30.99	137.0%	13.88	61.3%
P17 PPTT	18.83	83.2%	22.62	100.0%	3.79	16.8%
P3 e CUBIERTA	19.37	85.7%	22.62	100.0%	3.24	14.3%
P1 ORIENTACIÓN	20.78	91.8%	29.25	129.3%	8.48	37.5%
P12 m FORJADO	21.48	94.9%	37.85	167.3%	16.38	72.4%
P11 m FACHADA	21.58	95.4%	23.82	105.3%	2.24	9.9%
P9 a FACHADA	21.65	95.7%	31.45	139.0%	9.80	43.3%
P16 INF. HUECOS	22.11	97.7%	22.62	100.0%	0.51	2.3%
P10 a MARCO	22.21	98.2%	24.32	107.5%	2.11	9.3%
P7 U MARCO	22.40	99.0%	22.75	100.6%	0.35	1.6%
P2 ALTITUD	22.59	99.9%	22.62	100.0%	0.03	0.1%
P4 e SUELO	22.62	100.0%	24.30	107.4%	1.68	7.4%
P5 e FACHADA	22.62	100.0%	23.66	104.6%	1.04	4.6%
P6 U VIDRIO	22.62	100.0%	23.59	104.3%	0.97	4.3%
CASO ORIGINAL			22.62			

Los mínimos corresponden a la demanda energética más baja, obtenida variando el parámetro indicado (representado en porcentaje y en valor absoluto).

Procedamos a comentar los resultados:

PERIODO DE CALEFACCIÓN

El edificio se muestra más sensible a la variación de los parámetros relacionados con la conducción (mejoras consistentes en aumentar el aislamiento térmico de los elementos opacos y transmitancia térmica de huecos) y la orientación.

El aumento del espesor del aislamiento de suelo -P4-, puentes térmicos -P17-, cubierta -P3- y fachada -P5- se sitúan en primer, segundo, cuarto y sexto lugar.

La orientación -P1- se presenta muy determinante, obteniendo su demanda energética mínima a solo cuatro puntos por debajo del primero.

La absorción de la fachada -P9- y de la cubierta -P8-, por si mismas, puede conseguir mejoras de entre el 10 y el 13%, equivalente a mejorar la U de los vidrios o el espesor del aislamiento térmico de la fachada. Aún no siendo de los más influyentes, el resultado conseguido con estos dos parámetros es muy destacable

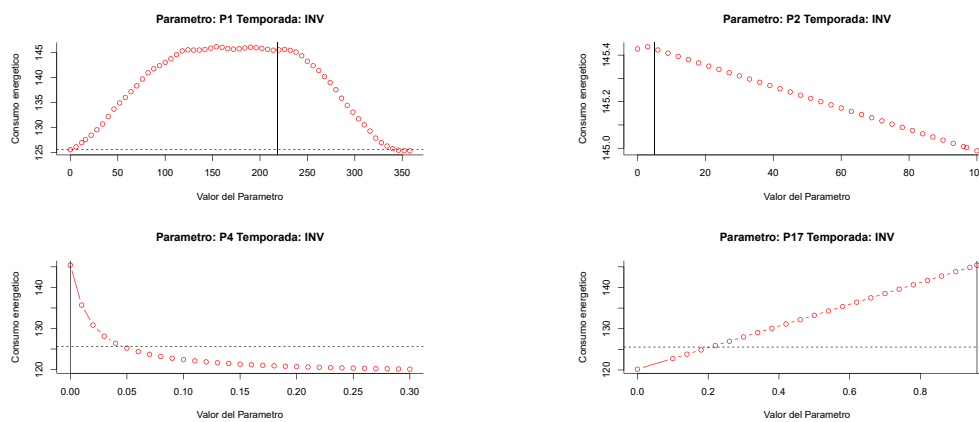


Figura 4.1.3. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 1. Demanda de calefacción

De los tres parámetros de absorción, P8 es el que puede ocasionar los peores datos de demanda: para el caso de una cubierta con α igual a cero -un blanco que refleja toda la radiación infrarroja incidente-, podemos empeorar un 9,4% el edificio.

Además, el parámetro al que el edificio se muestra más sensible es la absorción de la cubierta -P8- con un 20%. En quinto lugar queda también la de la fachada, por lo que los aspectos relacionados con el color adquieren importancia en las decisiones proyectuales en calefacción.

El edificio se muestra poco sensible a la variación de los parámetros relacionados con la inercia térmica (P12 masa de forjado y P11 masa de fachada), aunque si disminuimos la masa del forjado hasta un valor teórico de cero aumentaría la demanda en un 7,3% (para un caso real de un forjado ligero de 60 kg/m², aumentaría un 3,9% la demanda).

La sensibilidad a la variación del factor solar g del vidrio -P13- es muy alta. Valores de g altos son los más favorable, ya que es el que maximiza las ganancias solares. Al disminuir su valor, hacia vidrios menos transparentes, la demanda sube hasta un 15,6%.

Reducir las infiltraciones por los huecos -P16-, que parten del valor máximo, puede bajar la demanda en un 3,9%.

La altitud -P2- se presenta irrelevante (su variación no altera prácticamente la demanda energética en ningún sentido). P14 no influye dado que no se interviene en verano: recordemos que son protecciones solares que solo actúan en invierno.

PERIODO DE REFRIGERACIÓN

Lo más destacable en este periodo son las grandes posibilidades de aumentar la demanda que presentan dos parámetros: la masa del forjado -P12-, que al disminuir puede aumentar la demanda del edificio original hasta el 67,3% y las absorptividades de cubierta -P8- y fachada -P9-, que lo puede hacer en un 37% y 39% respectivamente.

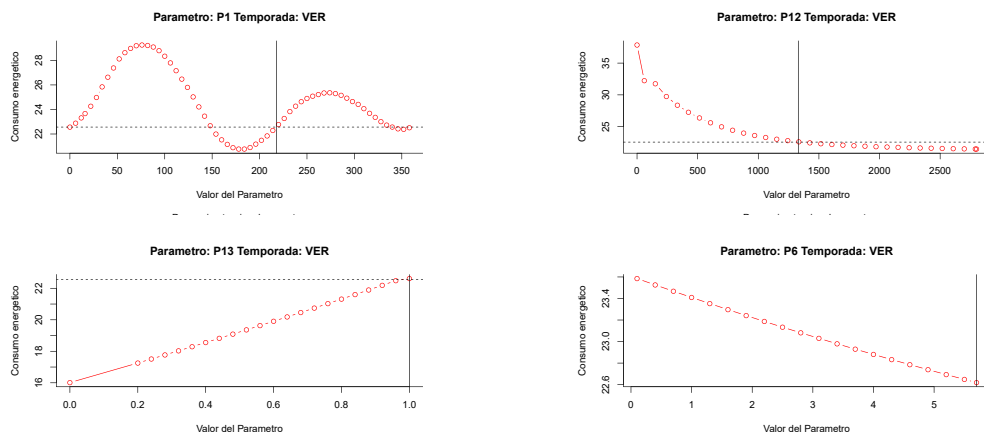


Figura 4.1.4. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 1. Demanda de refrigeración. Nótese que la escala del eje Y es distinto en cada gráfico

Si analizamos los test del P12 vemos que el caso más desfavorable es para masa = 0, valor no alcanzable. El siguiente, correspondiente a un forjado ligero de 60 kg/m², lleva la demanda de 37,85 a 32,23 kWh/m².año, pero sigue siendo un 43% peor que el caso de partida (un forjado unidireccional de hormigón armado).

Respecto los mejores resultados, la situación es totalmente diferente al periodo de calefacción: Todo lo relacionado con la radiación solar consigue las demandas más bajas: factor de sombra en verano -P14, factor solar g de vidrios -P13, y absorptancia de la cubierta -P8-. Representan una posibilidad de mejora cada uno de entre un 25 y un 30%.

Los parámetros relacionados con la conducción térmica obtienen unas posibilidades de mejora muy bajas: de hecho, añadir aislamiento a la envolvente de nuestro edificio, que parte de 0 cm, puede aumentar la demanda hasta un 7% (P4, suelo) o un 4,6% (P5, fachada), es decir, aumentando el aislamiento térmico de fachada y suelo aumenta la demanda energética de refrigeración.

Ocurre algo parecido si mejoramos la U del vidrio -P6-, produciendo un aumento del 4,3%. La U del marco -P7- no altera prácticamente el resultado en ningún sentido.

Solamente se muestra eficaz el aislamiento de cubierta -P3-, con una mejora de hasta un 14,3%.

Las infiltraciones por los huecos -P16- pueden bajar la demanda en un 2,3%.

La altitud -P2- se muestra, como en invierno, irrelevante.

PERIODO ANUAL

La demanda energética en periodo anual es la suma de las demandas de calefacción, ocho meses, y refrigeración, cuatro meses. Los resultados deben ser, por lo tanto, la combinación de ambos periodos.

Los parámetros que obtienen los mejores valores de demanda energética son prácticamente los mismos que en el periodo calefacción, con ligeras variaciones en la posición.

Los puentes térmicos -P17- quedan en primera posición, consiguiendo un 17,3% de reducción. Les siguen espesores de aislamiento térmico junto con la orientación -P1-.

Altitud -P2-, absorción y U del marco -P10 y P7- se muestran poco relevantes.

El edificio es más sensible a la variación de P12 -masa de forjados-, y P17 -puentes térmicos-, con un 17% entre el mejor y el peor valor de demanda.

El edificio se muestra muy sensible también a las variaciones de orientación (P1, 14,1%), seguida de otros tres parámetros que tienen que ver con la conducción de energía: los espesores de aislamiento de suelo (P4), cubierta (P3) y fachada opaca (P5).

La U de los vidrios (P6) es el sexto parámetro que más posibilidades de mejora aporta.

Los aspectos relacionados con la radiación solar, como el factor solar g del vidrio (P13), absorción de cubierta y de fachada (P8 y P9) se sitúan en una posición

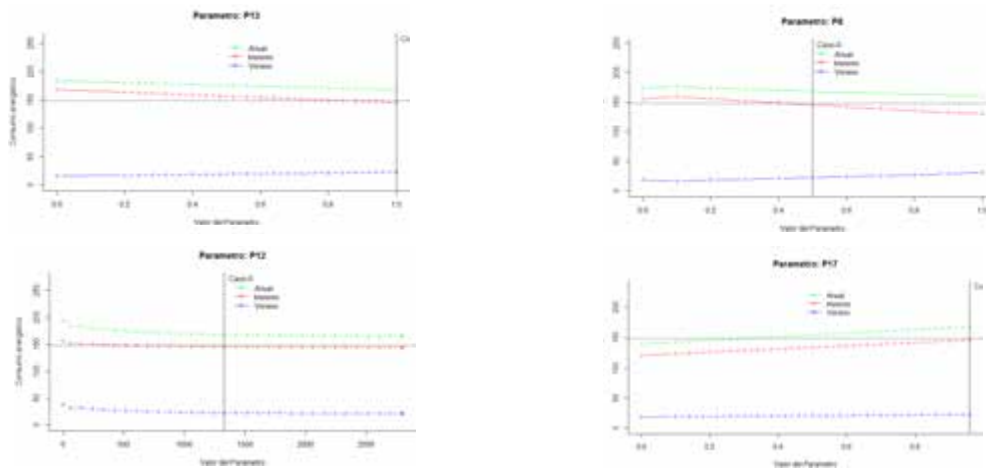


Figura 4.1.5. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 1. Demanda anual (verde) representando las demandas de calefacción (rojo) y refrigeración (azul)

intermedia, con variaciones absolutas entorno a 16 kWh/m². La absortividad del marco aparece en penúltimo lugar, pero es lógico debido a que la superficie total del elemento en relación con la envolvente es muy pequeña.

4.1.3. Resultados de los muestreos

Se realizan dos tipos de muestreos: uno sensible y otro uniforme, con diez mil casos cada uno. Tal como se justifica en el procedimiento, seleccionamos el muestreo uniforme para analizar la influencia de los parámetros.

En primer lugar exponemos los resultados obtenidos de los *coeficientes de determinación* R^2 de las medias de demanda energética de los 10 000 casos del muestreo uniforme, obtenida para cada parámetro por separado (u) y ajustados por los demás (a). Trazamos en las gráficas una curva de regresión que ajusta los resultados de demanda media por periodo y parámetro

Seguidamente ordenamos los parámetros de mayor a menor R^2 ajustado, para considerar la acción combinada de la totalidad.

Se realiza para los tres periodos estudiados: anual, calefacción y refrigeración.

	Par	CALEu	REFRu	ANUAu	CALEa	REFRa	ANUAa
ORIENTACION	P1	8.2	8.1	8.5	7.4	0.3	7.1
ALTITUD	P2	0.4	0.3	0.4	0.1	0.1	0.1
E CUB	P3	12.0	4.0	15.8	9.1	2.6	11.9
E SUELO	P4	13.0	0.3	13.1	9.6	0.1	9.8
E FACHADA	P5	5.8	0.4	5.9	5.8	0.1	5.8
U VIDRIO	P6	15.6	2.2	12.8	14.7	2.2	12.0
U MARCO	P7	2.8	0.5	2.3	2.7	0.4	2.2
α CUBIERTA	P8	1.0	7.6	0.2	1.0	7.8	0.1
α FACHADA	P9	1.0	3.6	0.3	0.9	4.1	0.2
a MARCO	P10	1.4	6.6	0.4	0.9	6.4	0.1
m FACHADA	P11	0.4	0.2	0.4	0.1	0.1	0.1
m FORJADO	P12	0.8	2.6	1.5	0.4	2.2	1.1
g VIDRIO	P13	18.8	16.7	10.7	17.2	15.4	9.8
FS VERANO	P14	0.0	25.3	2.0	0.0	25.3	1.9
INF. HUECOS	P16	0.6	0.3	0.8	0.6	0.1	0.7
PPTT	P17	19.6	6.6	26.1	19.4	7.2	26.3

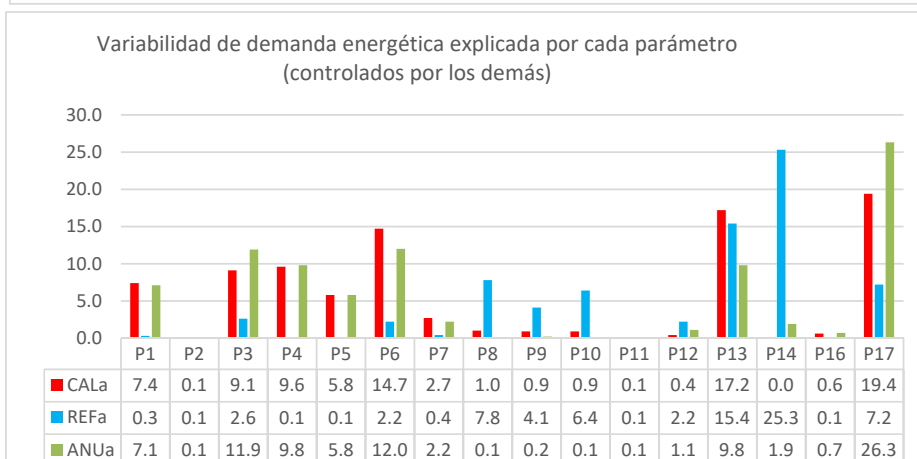
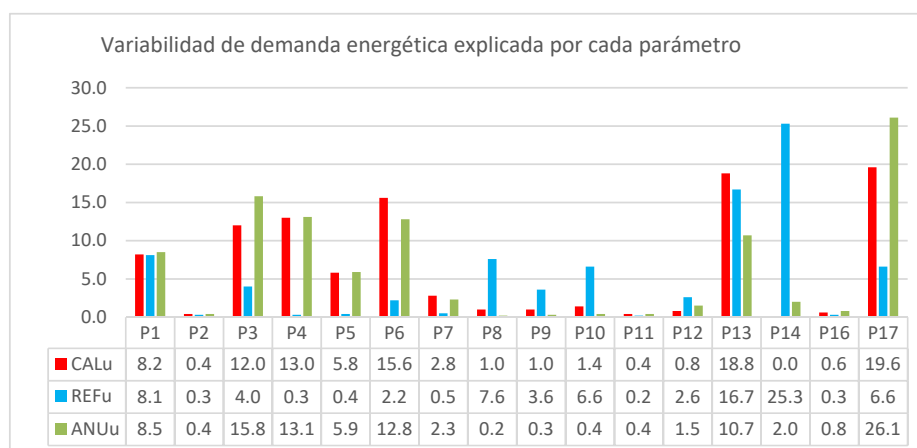


Figura 4.1.6. Valores de los coeficientes de determinación R² (%) por separado (u) y ajustados por los demás (a). Muestreo uniforme con 10 000 casos

TABLA 4.1.4. Valores de los coeficientes de determinación R^2 (%) por separado (u) y ajustados por los demás (a). Muestreo uniforme con 10 000 casos basados en el Modelo 1. Parámetros ordenados de mayor a menor R^2 (a)

	Par	ANUAu	ANUAa
	P17	26.1	26.3
	P6	12.8	12.0
	P3	15.8	11.9
	P4	13.1	9.8
	P13	10.7	9.8
ORIENTACION	P1	8.5	7.1
E FACHADA	P5	5.9	5.8
U MARCO	P7	2.3	2.2
U MARCO	P14	2.0	1.9
U MARCO	P12	1.5	1.1
E SUELO	P16	0.8	0.7
E FACHADA	P9	0.3	0.2
m FORJADO	P8	0.2	0.1
U MARCO	P10	0.4	0.1
m FACHADA	P11	0.4	0.1
m FACHADA	P2	0.4	0.1

	Par	CALEu	CALEa
PPTT	P17	19.6	19.4
g VIDRIO	P13	18.8	17.2
U VIDRIO	P6	15.6	14.7
E SUELO	P4	13.0	9.6
E CUB	P3	12.0	9.1
ORIENTACION	P1	8.2	7.4
E FACHADA	P5	5.8	5.8
U MARCO	P7	2.8	2.7
a CUBIERTA	P8	1.0	1.0
a FACHADA	P9	1.0	0.9
a MARCO	P10	1.4	0.9
INF. HUECOS	P16	0.6	0.6
m FORJADO	P12	0.8	0.4
ALTITUD	P2	0.4	0.1
m FACHADA	P11	0.4	0.1
FS VERANO	P14	0.0	0.0

	Par	REFRu	REFa
FS VERANO	P14	25.3	
g VIDRIO	P13	16.7	
a CUBIERTA	P8	7.6	7.8
PPTT	P17	6.6	7.2
a MARCO	P10	6.6	6.4
a FACHADA	P9	3.6	4.1
E CUB	P3	4.0	2.6
U VIDRIO	P6	2.2	2.2
m FORJADO	P12	2.6	2.2
U MARCO	P7	0.5	0.4
ORIENTACION	P1	8.1	0.3
INF. HUECOS	P16	0.3	0.1
ALTITUD	P2	0.3	0.1
E SUELO	P4	0.3	0.1
E FACHADA	P5	0.4	0.1
m FACHADA	P11	0.2	0.1

ido blanco, parámetros con R^2 ajustado inferior al 2%

camos en negrita los que, estando dentro de los R^2 inferiores al 2%, obtienen un R^2 sin ajustar alto

PERIODO DE CALEFACCIÓN

Los parámetros relacionados con la conducción térmica son los que se muestran más influyentes al analizarlos combinados con el resto. Entran en las primeras posiciones dos relacionados con la radiación solar: orientación y factor solar g del vidrio.

Puentes térmicos -P17-, con un 19,4%, se coloca como el parámetro más determinante para explicar la demanda media de calefacción. La transmitancia térmica U del vidrio -P6, con un 14,7%, queda por delante de espesores de aislamiento en suelo (P4, 9,6%), cubierta (P3, 9,1%), fachada (P5, 5,8%) y U de marco (P7, 2,7%).

En segundo lugar se coloca el factor solar g del vidrio -P13-, relacionado con las ganancias por radiación a través de los huecos, con un 17,2%.

La orientación del edificio queda también en los puestos más determinantes: sea cual sea la construcción del edificio, más o menos aislado, más o menos expuesto a la radiación solar, la orientación es clave para conseguir un buen valor de demanda energética. El R^2 es de un 7,4%.

Veamos las gráficas de estos parámetros, para ver en que dirección se consiguen los mejores valores de demanda energética.

P17. Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

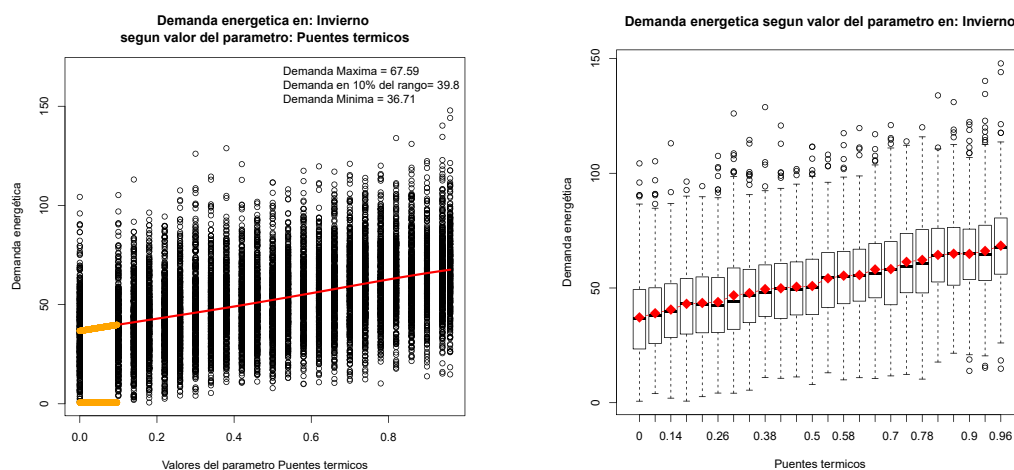


Figura 4.1.7. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P17. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

Los mejores datos están situados en la zona del valor mínimo del parámetro.

P13. Factor solar g del vidrio

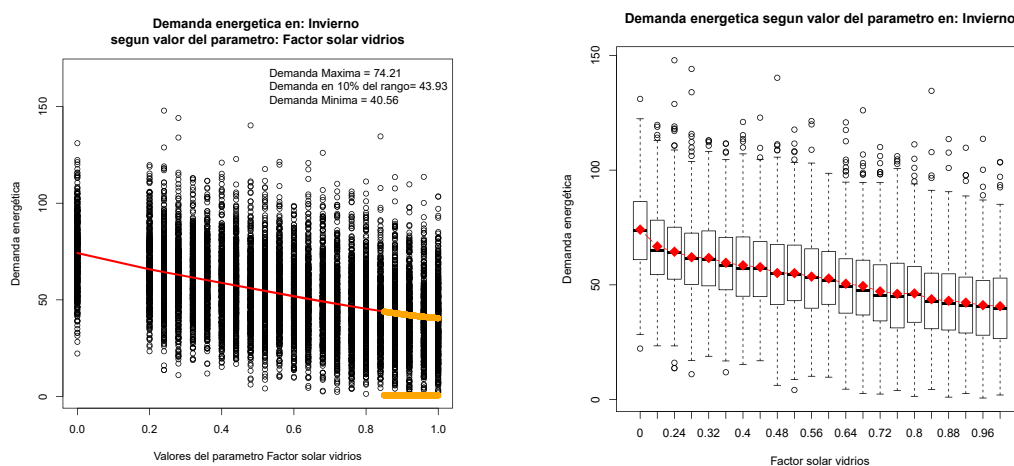


Figura 4.1.8. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P13. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

Este parámetro se muestra determinante en un 17,2%. Los valores más altos de P13 son los que dan mejores resultados. P13=1 equivale a un $g=0,85$, un valor que podemos considerar máximo de captación solar a través de un vidrio monolítico.

En invierno, construir con vidrios lo más transparentes posibles -que dejan pasar al máximo la radiación solar- resulta muy determinante, más que los parámetros de aislamiento térmico de la envolvente.

P6 Transmitancia térmica del vidrio

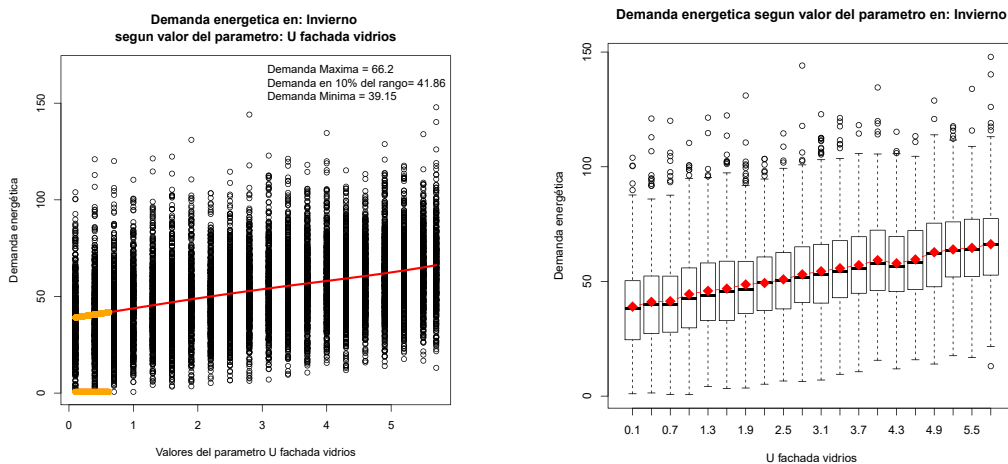


Figura 4.1.9. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P6. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

Valores bajos de U se muestran más favorables, dado que minimizan las pérdidas energéticas. Se aprecia un comportamiento lineal, con pendiente descendente hacia el valor cero del parámetro.

Los valores por debajo de uno solo se pueden conseguir con vidrios triples. La gran mayoría de los vidrios disponibles en el mercado se acumulan entre los 3,5 y los 2,5, como hemos indicado en el capítulo 3.2.

P4 Espesor del aislamiento térmico en los suelos

En todos los edificios seleccionados, el suelo queda elevado sobre pilotis sobre una planta diáfana, por lo que está en contacto con el aire exterior, creando una zona sombreada en planta baja.

El aumento progresivo del espesor del aislamiento térmico en el suelo provoca un fuerte descenso inicial, confirmando que los primeros centímetros de este material son los más determinantes (ver apartado 3.2, fig. 3.2.5).

En la curva de regresión hemos señalado el punto a partir del cual el rango de variación de la demanda energética no fluctúa más de un 10%. Esto quiere decir que si pasamos de este punto, lo esperable es que la demanda media de los casos de estudio no varíe más de en un diez por ciento.

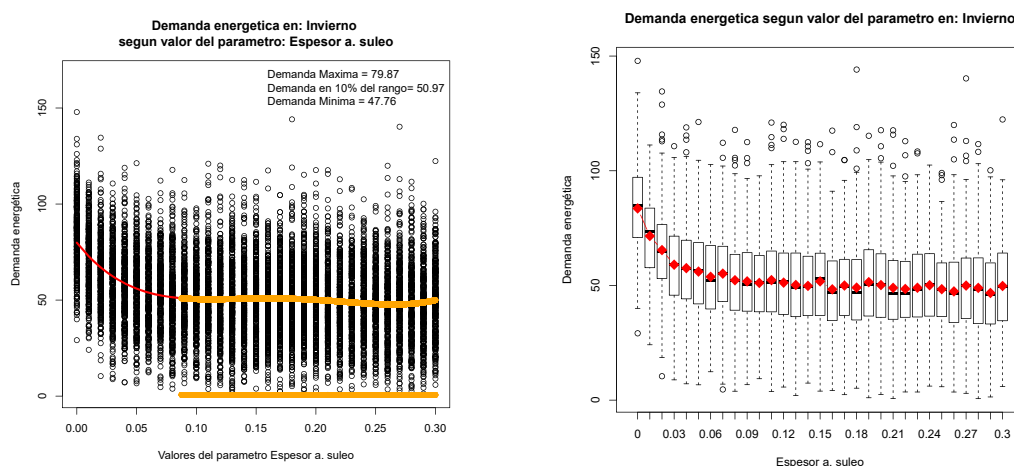


Figura 4.1.10. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P4. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

En este caso, a partir de 8 centímetros de aislamiento térmico del suelo, serán el resto de parámetros los que determinen la demanda energética en mayor medida. Este valor podría considerarse como el óptimo aunque, como es lógico, si seguimos aumentando el espesor de aislamiento seguirá bajando la demanda, pero muy lentamente.

P3 Espesor del aislamiento térmico de la cubierta

Los resultados de esta variable se comportan de un modo muy parecido al de la anterior. El óptimo también se sitúa en torno a los 8 centímetros, mostrándose el edificio muy sensible a la variación de los primeros centímetros. El R^2 arroja valores muy parecidos, ligeramente inferiores.

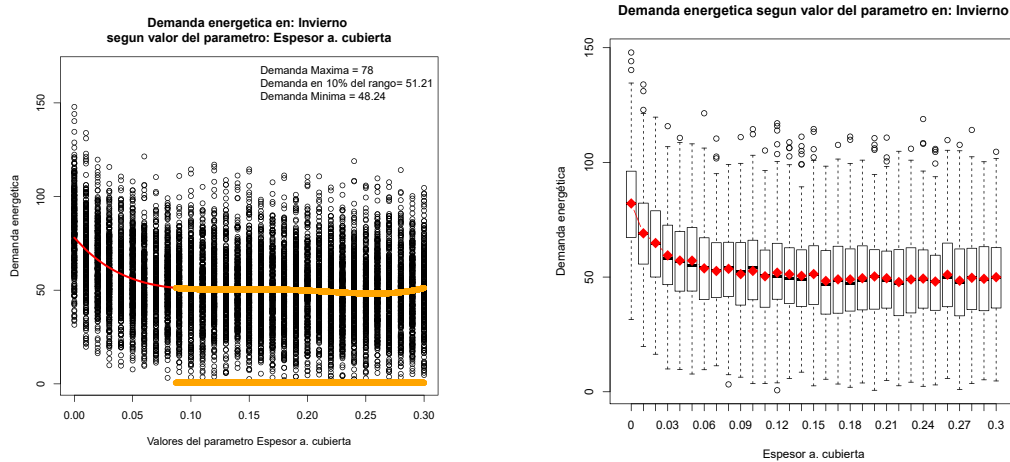


Figura 4.1.11. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P3. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

P1. Orientación del edificio

Los mejores resultados, y por lo tanto los que reducen más la demanda, se sitúan en torno a 0°. Ésto, según vemos en la descripción del parámetro para este caso, equivale a una orientación de la fachada principal a sur puro (fig. 4.1.13). En esta fachada es donde se encuentran los huecos de mayor dimensión, por lo que la radiación solar vuelve a ser determinante, al igual que vimos con P13. La orientación contraria es la que presenta los resultados más altos de demanda.

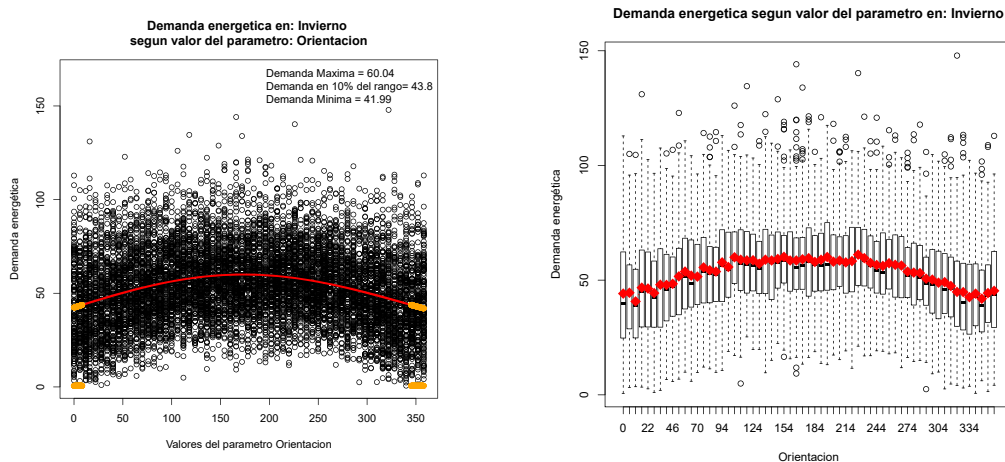


Figura 4.1.12. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P1. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

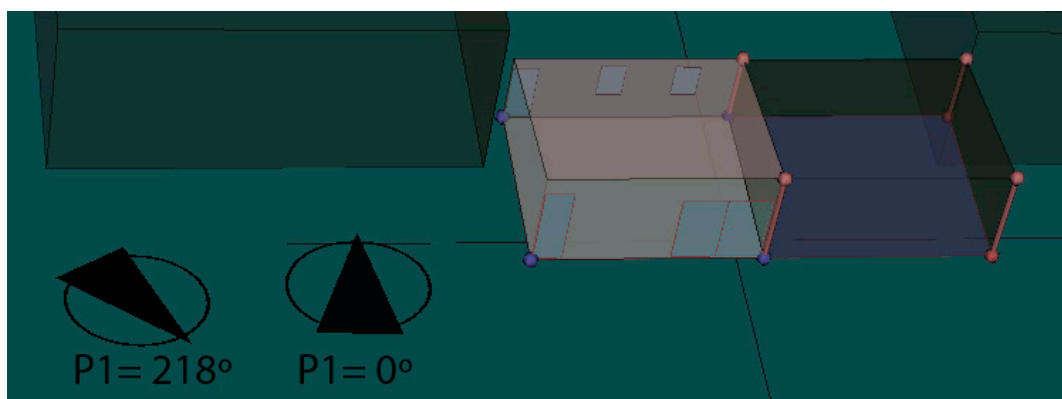


Figura 4.1.13. Orientación del edificio en función del parámetro P1. El valor 218 corresponde con el edificio original. Los valores alrededor de 0° son los que presentan los mejores resultados.

P5 Espesor del aislamiento térmico en fachada

En esta variable la influencia de los primeros valores es menor que en las otras dos (espesores de cubierta y suelo). La curva alcanza pronto una pendiente casi horizontal y, a pesar de que el 10% de rango lo alcanza en torno a los 18 centímetros, si aumentamos el porcentaje a un 20%, nos acercáramos a 8 cm, valor más moderado. El R^2 de P5 es del 5,8%, un valor ya que empieza a ser muy bajo aunque considerable.

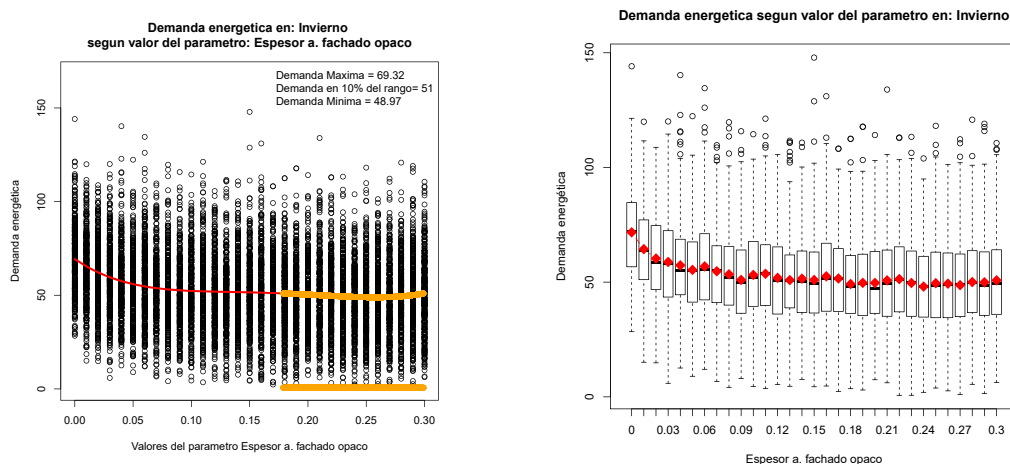


Figura 4.1.14. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P5. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

De los valores que muestran una baja o nula¹ determinación en el resultado obtenido destacamos los siguientes:

P2 Altitud

Confirma lo observado en el test uniparamétrico, con escasa incidencia.

P12, masa de los forjados

Aquí encontramos una diferencia importante respecto a lo observado en el test uniparamétrico: Su modificación de modo aislado provocó un aumento del 7,3% de la demanda. Cuando lo analizamos combinado con el resto de variables su influencia resulta, muy baja.

PERIODO REFRIGERACIÓN

En verano, los parámetros relacionados con la radiación solar alcanzan los mayores coeficientes de determinación, como también observamos en los test uniparamétricos. Los relacionados con la conducción térmica pierden relevancia, por lo que aislamientos térmicos bajan de posición y pasan a ser poco o nada influyentes, siendo el de cubierta el único que presenta posibilidades de mejora en los primeros centímetros de espesor y mostrando el de vidrios y huecos efectos negativos, llegando a aumentar ligeramente la demanda.

El más determinante es el Factor de sombra en verano -P14-, que plantea una protección solar de los huecos específica en los meses de verano. Es un parámetro que no actúa en invierno, por lo que no es comparable con este periodo. Alcanza un R^2 de 25,3%.

El factor solar de los vidrios -P13- se sitúa en segundo lugar. Como hemos comentado, es aplicable a todo el año, por lo que la radiación que deja de sumarse a las cargas térmicas de verano, también deja de mejorar las ganancias pasivas en invierno (se verá reflejado en la demanda anual). Tiene un R^2 de 15,4%

Los parámetros de absorción -el color del edificio-, se sitúan también en una posición muy relevante, con R^2 del 4 al 7,8%, valores muy representativos. La absorción de la cubierta -P8- queda en la tercera posición, con un 7,8%, y la de marcos de los huecos -P10 y de la fachada -P9-, quedan en quinta y sexta respectivamente.

¹ R^2 próximo a cero indica que tiene poca influencia en la media de las demandas energéticas de los diez mil edificios. No quiere decir que no influya nada en algún caso concreto.

El primer parámetro relacionado con el aislamiento térmico de la envolvente es P17 -puentes térmicos- con R^2 en torno al 8%, seguido de P3, o espesor del aislamiento térmico en cubierta, con un R^2 muy bajo, del 2,6%. Fachada o suelo obtienen un valor próximo a cero, por lo que su determinación en la demanda energética es prácticamente nula. Solo influyen los dos primeros.

Llama la atención que la orientación, que de modo individual explica un 8.1%, caiga al 0.3% cuando se estudia ajustada por los demás. Puede ser debido a que, si la orientación no es buena para verano, puede ser corregida con una correcta protección solar: los parámetros (P14 -protecciones solares-, y P13 -factor solar-) anularían su influencia negativa.

La inercia térmica se presenta también poco determinante. Solamente la masa del forjado obtiene un R^2 de 2,2%. La masa de la fachada se muestra nada determinante. En los uniparamétricos la del forjado también fue más influyente.

La altitud -P2- es irrelevante en este periodo. Lo mismo ocurre con la infiltración de aire en los huecos -P16-: la estanqueidad al aire de las carpinterías no parecen influir en el comportamiento térmico medio estival en los 10 000 casos.

Espesores de aislamiento en fachada y suelo se muestran nada influyentes, como ocurre con la masa de la fachada. Los tres quedan junto con la altitud en los últimos lugares, con nula influencia.

Pasemos a analizar los parámetros más relevantes:

P14 Factor de sombra en verano

El R^2 de este parámetro es del 25,3%. La regresión nos muestra una variación lineal, con disminución del resultado de demandas medias hacia el valor mínimo. Este resultado, como cabía esperar, nos indica que una correcta protección solar de los huecos puede explicar hasta la cuarta parte del valor total de la demanda en verano.

Puesto que un valor de P14 igual a 0 indicaría que ni la radiación difusa accedería al edificio -la luz de norte representa en torno a un 20% de la de sur-, podemos entender que el valor mínimo al que podemos llegar queda establecido en torno a 0,2. según lo descrito en el punto 3.3. criterios de optimización.

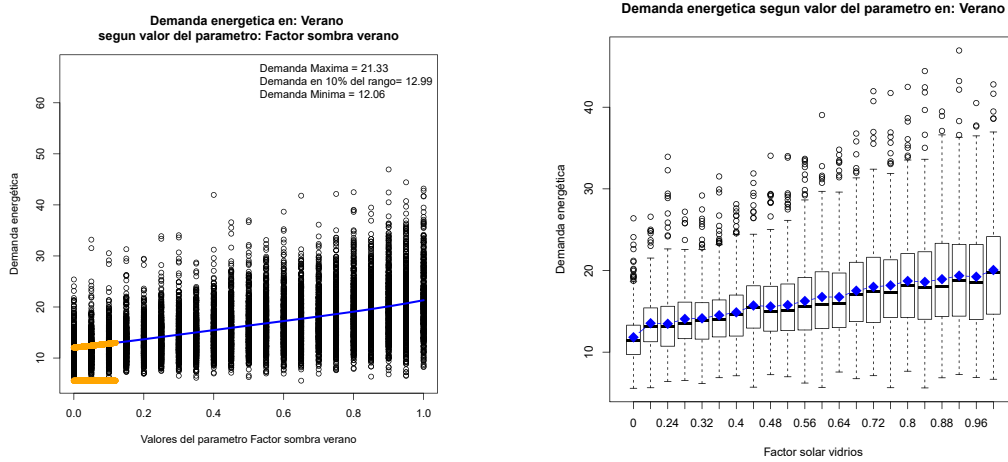


Figura 4.1.15. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P14. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

P13. Factor solar g del vidrio

El comportamiento de este parámetro también es lineal, con los mejores resultados en la zona de factor solar g mínimo.

Como hemos visto, los vidrios con g muy reducido contienen una capa que refleja la radiación solar y pueden llegar a valores en torno a 0,3. Este valor, con vidrios habituales en el mercado, se podría considerar como un valor mínimo que optimiza la demanda de refrigeración.

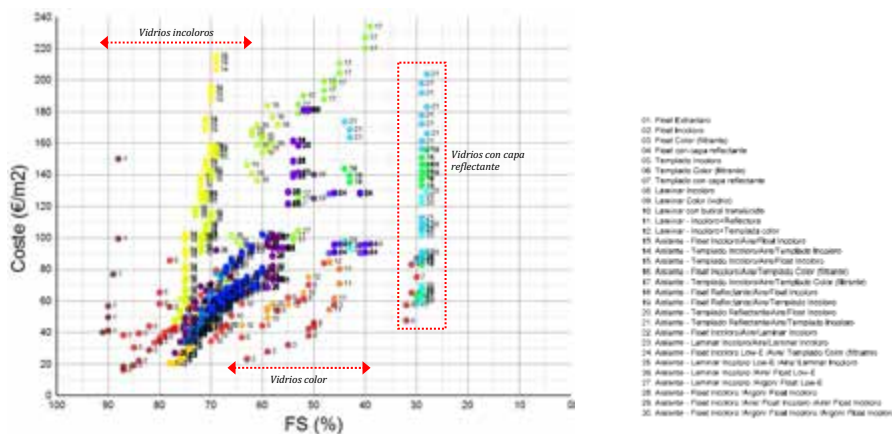


Figura 4.1.16. Relación entre coste y factor solar del vidrio. Fuente Boada, 2013

P 8, P9 y P10 Absortancia de la cubierta, la fachada y los marcos

La radiación solar incidente en las partes opacas de la envolvente también tienen relevancia en los resultados obtenidos.

De los tres elementos evaluados, cubierta, fachada y carpinterías, es la primera la que se muestra más determinante. El color (absortancia) de la cubierta explica el 7,8% de la demanda energética media para los edificios generados a partir del modelo 1 (fig. 4.1.17).

Los tres parámetros se comportan de modo parecido, con variación del coeficiente de determinación R^2 entre un 4 y un 8%.

Los resultados de demanda energética más bajos están relacionadas con valores bajos de absortancia, es decir, con superficies claras que reflejan el máximo de radiación solar.

Llama la atención el parámetro P10, dado que la superficie ocupada por los marcos es pequeña en relación con cubiertas o fachadas opacas. Su determinación es muy relevante: en torno al seis por ciento.

Por el contrario, los valores de absortancia próximos al uno, conllevan un aumento medio de la demanda estival, con variaciones de las medias que pueden ser de 3 a 4 kWh/m².año. Teniendo en cuenta que el valor límite actual es de 15 kWh/m².año en esta zona climática, es un parámetro que debe ser considerado.

P17. Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

Este parámetro se cuela entre los anteriores, quedando en cuarto lugar, con un R^2 de 7,2%. Es el parámetro más influyente relacionado con el aislamiento térmico.

Trabajar al máximo la reducción de los puentes térmicos -que representa el valor 0-, representa de media una reducción de 4,8 kWh/m² año respecto al valor 1. Esto mismo se puede conseguir con los parámetros de absortancia, arriba expuestos.

Su influencia es lineal, con una pequeña pendiente hacia los valores mínimos.

Los siguientes parámetros de conducción térmica son el espesor del aislamiento en cubierta y la transmitancia térmica U de los vidrios.

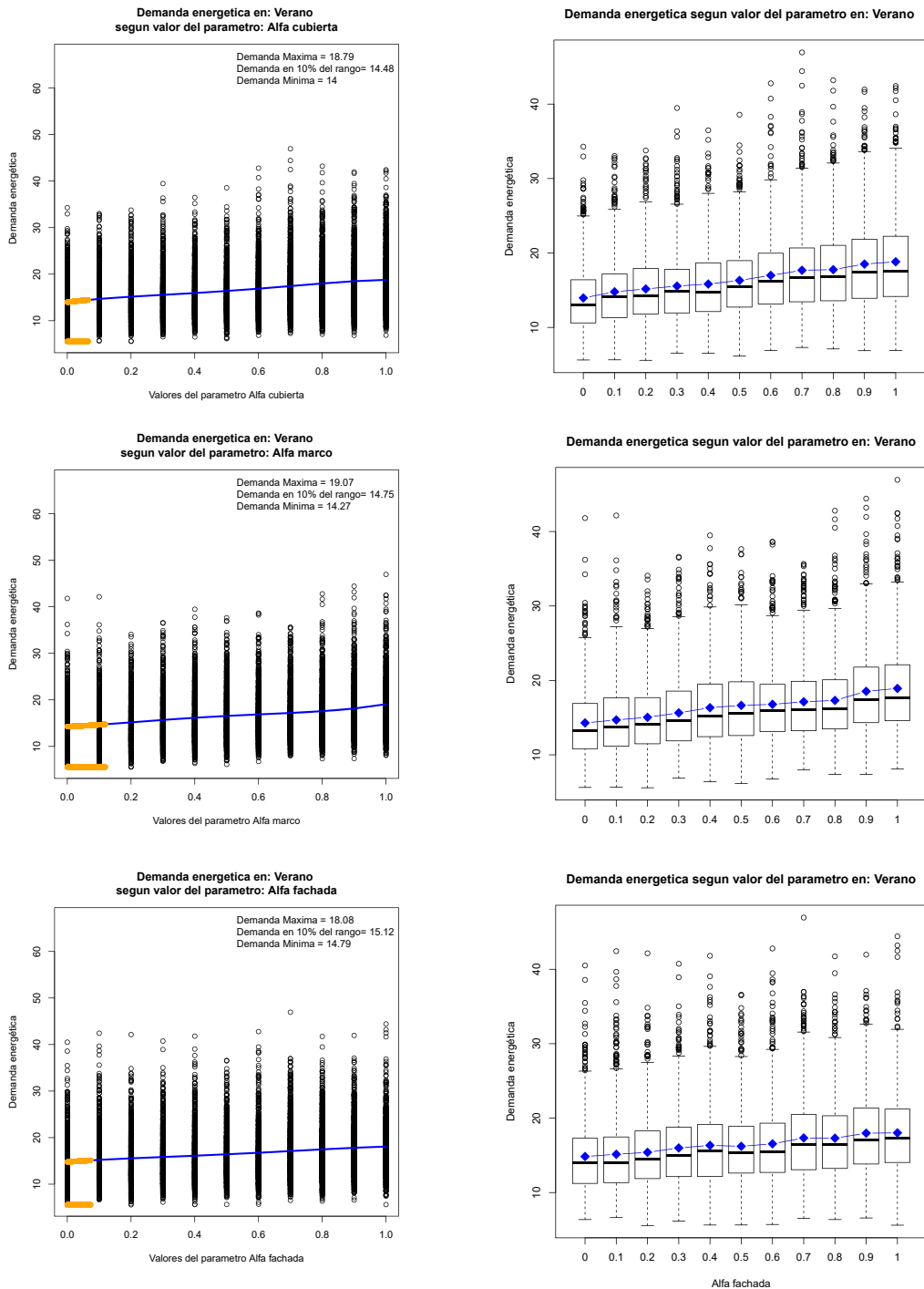


Figura 4.1.17. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P8 (arriba), P10 (centro) y P9 (abajo). Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

P3. Espesor del aislamiento térmico en cubierta

Si antes comentábamos que el color de la cubierta era el más determinante de los parámetros de absorción, ahora podemos decir lo mismo de su aislamiento: con una influencia baja, es el único parámetro de espesores de aislamiento térmico con valores de R^2 considerables. Obtiene un discreto 2,6%, que si lo observamos de modo individual (R^2a), asciende al 4%.

Este aspecto es un resultado destacable, confirmando lo observado en los test uniparamétricos: los aspectos relacionados con el aislamiento térmico son poco influyentes en verano.

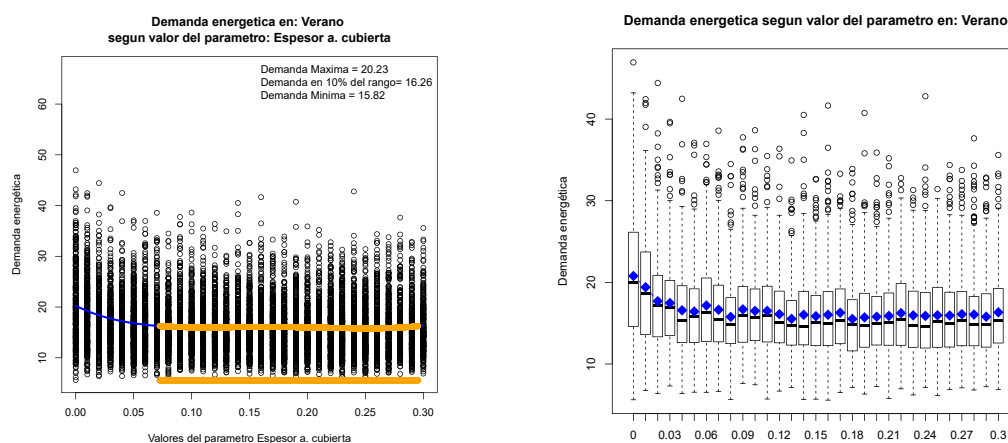


Figura 4.1.18. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P3. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

Observando los gráficos y las curvas de regresión de los valores medios, únicamente los primeros centímetros de aislamiento térmico representan una pequeña bajada en la demanda. A partir de 7 cm no obtenemos una variación superior al 10% pero la bajada desde el valor 0 es pequeña. En el otro extremo, en la zona de espesor máximo considerado, se advierte un ligero repunte de la demanda.

P6 Transmitancia térmica U del vidrio

La U del vidrio queda ligeramente por encima del 2% de determinación. Se muestra poco influyente, por tanto, en el resultado. Los mejores valores de demanda se producen con valores de U máximos, es decir, con vidrios muy poco aislantes.

Las medias solo varían un total de 2,5 kWh/m².año, pero es un resultado muy relevante: el edificio se comporta mejor en verano con vidrios muy poco aislantes, aunque la recta de regresión tiene una pendiente prácticamente horizontal.

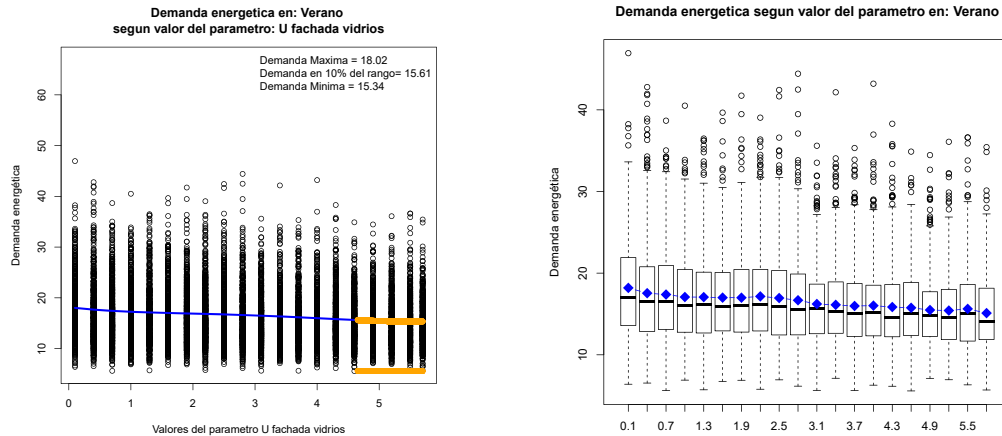


Figura 4.1.19. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P6. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

El valor óptimo de este parámetro nos lleva a vidrios con valores de U muy fácil de conseguir en el mercado. Se comporta en sentido contrario que en invierno.

P12 Masa del forjado

Es el único parámetro relacionado con la inercia térmica con un valor de R² superior al 2%.

El otro parámetro, el P11 masa de la fachada, queda en última posición con influencia prácticamente nula.

P1 Orientación

Los resultados del parámetro P1 requieren de un análisis detenido de las gráficas ya que la diferencia entre el R² por separado es muy distinto al ajustado por el resto. En este caso obtenemos un 8,1% si lo analizamos por separado, pero al ajustarlo por el resto cae hasta el 0,3%.

Las gráficas muestran una variación que sitúa dos zonas de mínimos: en torno al 0°, como ocurría en el periodo de calefacción, y en torno al 180° (fig. 4.1.13).

A la vista de esto, no parece que podamos concluir que la influencia de la orientación en la demanda energética de refrigeración sea nula, por lo que tendremos que buscar otra explicación.

Es posible que la causa de este hecho sea que si combinamos orientación con protección solar de los huecos podemos, con planteamientos arquitectónicos, corregir las situaciones pésimas. Éste es un planteamiento básico en la arquitectura bioclimática y parece confirmarse en esta investigación.

La demanda puede variar, de media, unos 5 kWh/m².año, un 33% de la demanda límite que marca el DB HE1 para verano, por lo que es muy representativo.

Por lo tanto, aunque el R² ajustado nos lleve a no considerar la orientación como un parámetro no fluyente en verano, el análisis detallado de los resultados y el R² sin ajustar nos indican lo contrario, que es un parámetro relevante.

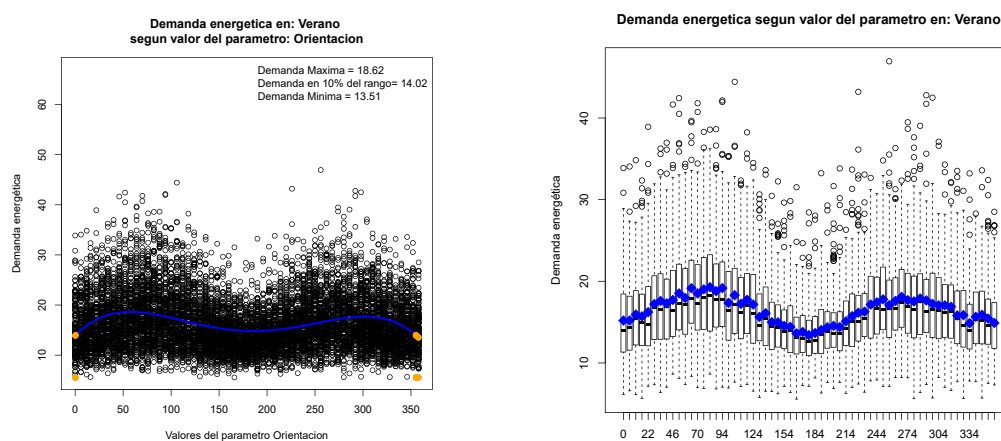


Figura 4.1.20. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P1. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

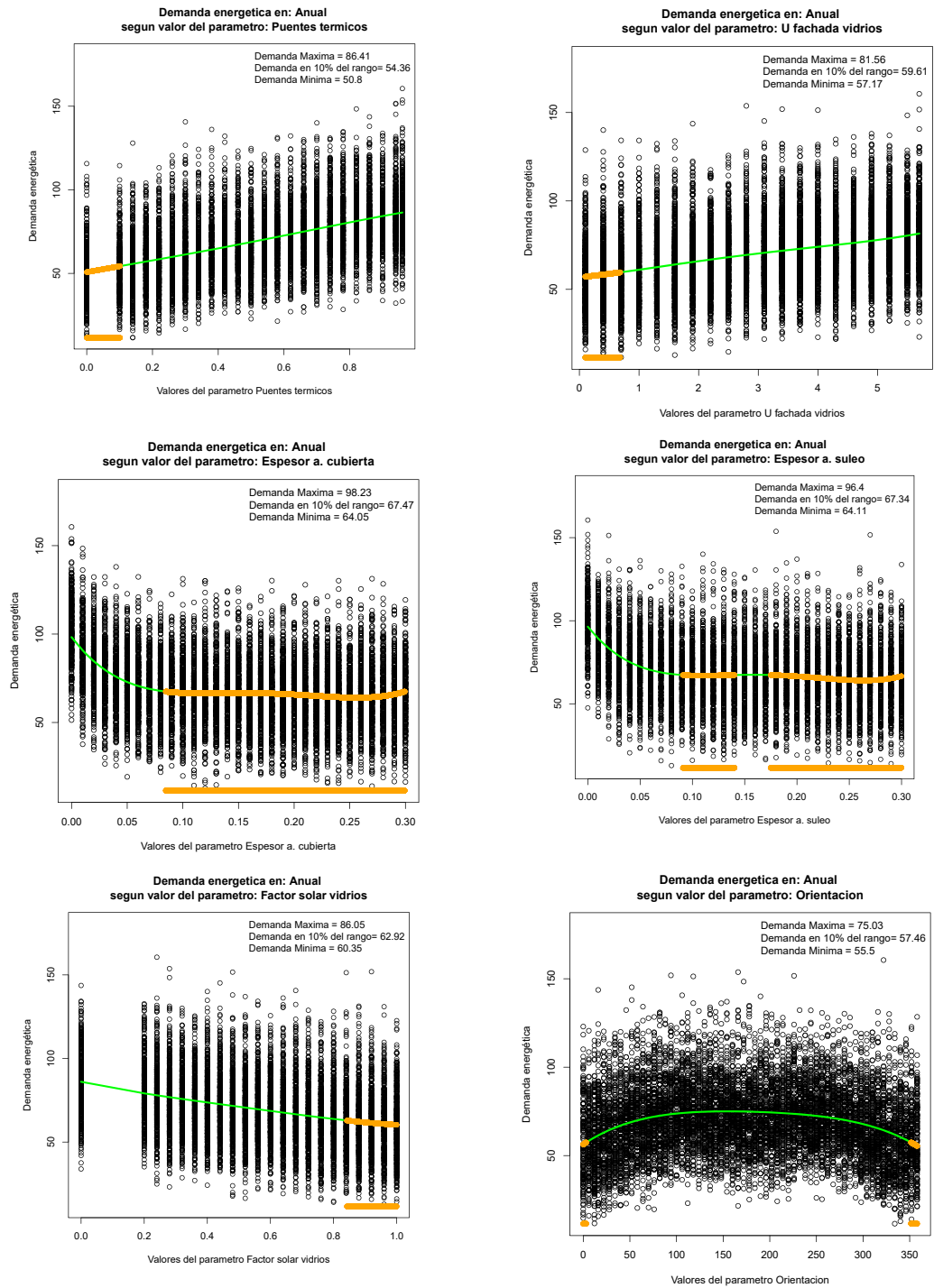


Figura 4.1.21. Representación gráfica de los resultados de demanda energética anual obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P17 (arriba iqda.), P6 (arriba dcha.) P3 (centro izda.), P4 (centro dcha.), P13 (abajo izda), P1 (abajo dcha.). Se representa la curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%

PERIODO ANUAL

La demanda energética en el periodo anual es el resultado de la suma de las demandas de calefacción y refrigeración: sumamos las demandas energéticas de los ocho meses de calefacción y los cuatro de refrigeración para obtener la demanda total anual. Por lo tanto la relevancia de las variables estará directamente relacionada con los dos periodos.

Los resultados de los R^2 son muy parecidos a los obtenidos para el periodo de calefacción, con diferencias en cuanto al porcentaje y el orden.

Los parámetros relacionados con la conducción térmica son los más influyentes: puentes térmicos -P17-, U del vidrio -P6-, espesores de aislamiento en cubierta -P5- y suelo -P3- son los cuatro primeros parámetros más influyentes, con un R^2 ajustado superior al 9,8%. El espesor del aislamiento en fachada -P6- se muestra en este caso, menos determinante, con un 5,8%.

El quinto parámetro que mejor explica la demanda energética anual media de los casos es el factor solar g del vidrio -P13-. Es el primero de los relacionados con la radiación solar.

El R^2 ajustado de la orientación es de un 7,1% y el factor de sombra en verano -P14-, roza el 2%.

Los parámetros relacionados con la inercia térmica -P11 y P12- se muestran muy poco determinantes, así como la altitud -P2-, que ocupa el último lugar con un R^2 igual próximo a cero.

Todas las absortancias de los elementos de la envolvente pierden el protagonismo que si tienen en verano.

Parece, pues, que el peso en valor absoluto de la demanda de invierno marca las exigencias para todo el año.



4.2. RESULTADOS CASOS BASADOS EN EL MODELO 2 EDIFICIO HEXAGONAL TORRE

Aplicamos la metodología propuesta al segundo edificio, seleccionado como modelo para generar los casos de estudio.

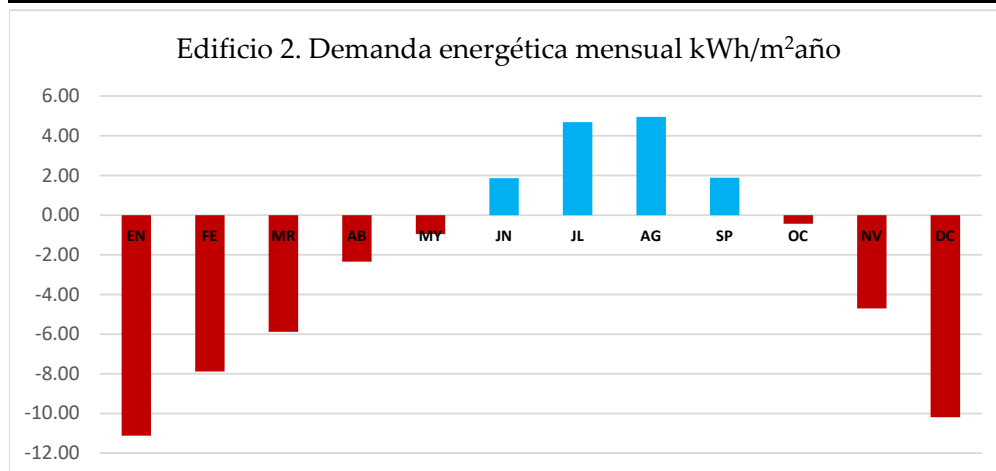
4.2.1. Resultados del edificio original

Cuantificamos la demanda energética del edificio original con la aplicación informática de simulación energética de edificios seleccionada. Para este caso consideramos la protección solar estacional que disponen los huecos de las terrazas, con un valor de P14 igual a 0,2. En los test, para poder aplicar el procedimiento propuesto, partimos de un valor de P14 igual a 1 en todos los huecos con objeto de realizar la variación conjunta: por este hecho el valor de demanda en refrigeración del edificio original respecto al caso cero de la batería de cálculos varía, resultando menor en el edificio, que es el que exponemos a continuación.

Con los datos obtenidos en la investigación, procedemos a modelizar el edificio en el software de simulación obteniendo los siguientes resultados:

TABLA 4.2.1. RESULTADOS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO 2

RESULTADOS A NIVEL EDIFICIO													(kWh/m2 del edificio)	
Anual	56.89		Cal.			-43.50			Refr.				13.39	
	EN	FE	MR	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DC		
	-11.12	-7.88	-5.88	-2.34	-0.96	1.86	4.69	4.95	1.89	-0.43	-4.70	-10.19		



Analizamos pormenorizadamente los datos de demanda energética desglosándola por componentes, en calefacción y refrigeración. Los representamos en la siguiente figura:

	CALEFACCIÓN				REFRIGERACIÓN			
	PERDIDAS		GANANCIAS		PERDIDAS		GANANCIAS	
TOTAL	-106.40	-100.0%	63.20	100.0%	-20.10	-100.0%	33.00	100.0%
Fachadas opacas	-15.60	-14.7%	0.10	0.2%	-1.10	-5.5%	3.90	11.8%
Cubiertas	-2.70	-2.5%	0.03	0.0%	0.00	0.0%	0.80	2.4%
Suelos	-2.80	-2.6%	0.03	0.1%	-0.20	-1.0%	0.40	1.2%
Puentes Térmicos	-16.20	-15.2%	0.03	0.1%	-1.10	-5.5%	2.70	8.2%
Huecos radiación	0.00	0.0%	39.60	62.7%	0.00	0.0%	6.10	18.5%
Transmisión Huecos	-31.50	-29.6%	0.00	0.0%	-1.90	-9.5%	3.40	10.3%
Fuentes internas	0.00	0.0%	23.20	36.7%	0.00	0.0%	11.80	35.8%
Ventilación + Infiltración	-37.60	-35.3%	0.20	0.3%	-15.80	-78.6%	3.90	11.8%

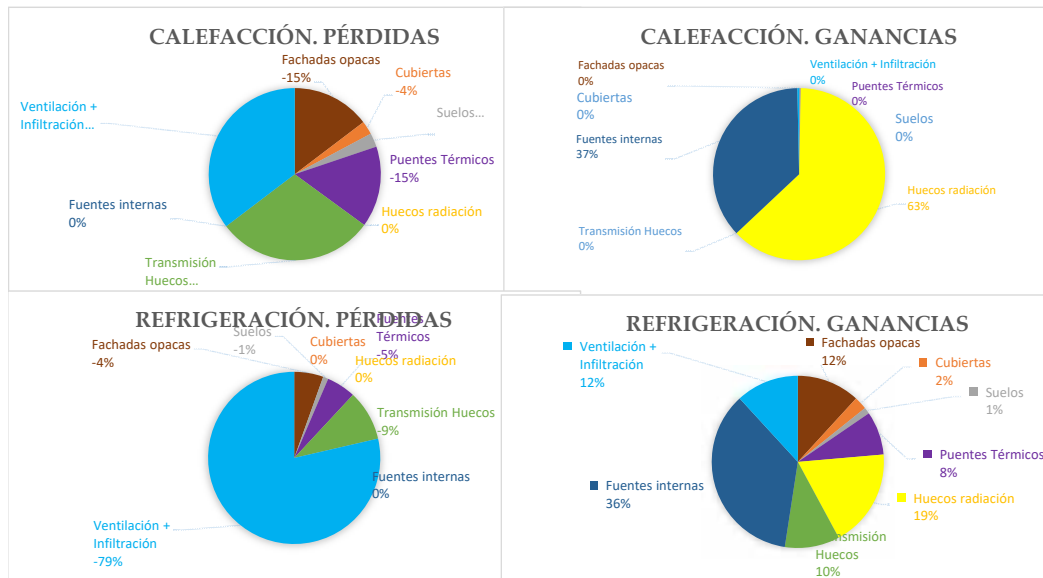


Figura 4.2.1. Datos de la demanda de calefacción y refrigeración, del edificio original 1, desglosada por componentes.

Separamos pérdidas y ganancias dentro de cada periodo. En calefacción la demanda energética será igual a pérdidas menos ganancias. En refrigeración, demanda es igual a ganancia menos pérdida.

Descontando ventilación e infiltración, cuantificamos el porcentaje de demanda debida al resto de parámetros matéricos respecto al total.

	CALEFACCIÓN	REFRIGERACIÓN
GANANCIAS	63.0%	52.4%
PERDIDAS	-64.7%	-21.4%

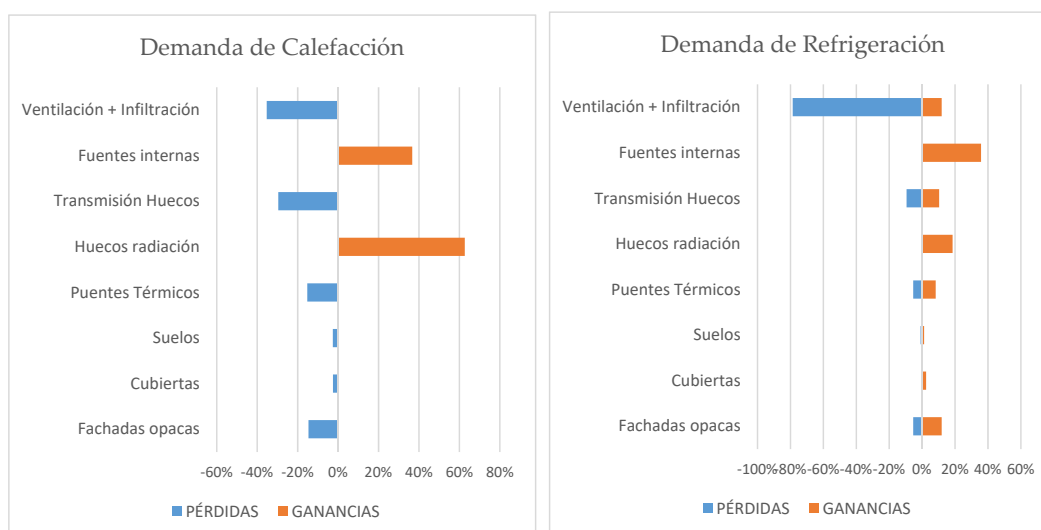


Figura 4.2.2. Datos de la demanda de calefacción y refrigeración, del edificio original 1, desglosada por componentes.

Observamos que la influencia de la ventilación es mayor en el periodo de refrigeración, también en este edificio, sobre todo en pérdidas (fig. 4.2.1).

En calefacción, los parámetros matéricos representan alrededor del 65% de las pérdidas -más la parte de la infiltración que está incluida dentro de ventilación. La radiación solar a través de los huecos representa el 62,7% de las ganancias energéticas en calefacción. El 36,7% de las ganancias son debidas a las fuentes internas. La ventilación tiene poca influencia.

En refrigeración, las variables matéricas representan el 52,4% de las ganancias, donde las fuentes internas tienen mayor impacto (un 35,8%). La radiación solar, con los huecos de las terrazas muy protegidos, representa un 18,5%. La mayor parte de las pérdidas energéticas en refrigeración, que disminuyen la demanda energética, son consecuencia de ventilación e infiltración (78,6%).

Para observar la influencia del número de plantas en la demanda energética de la torre de viviendas, relacionada con la compacidad del edificio, realizamos una batería de cálculos añadiendo cada vez una planta tipo más al edificio que modificamos (la situada entre la planta primera y la última). Así pues, calculamos desde tres plantas (primera, una tipo y última) hasta 40 (primera, treinta y ocho plantas tipo iguales y última).

Los resultados se representan en la siguiente gráfica

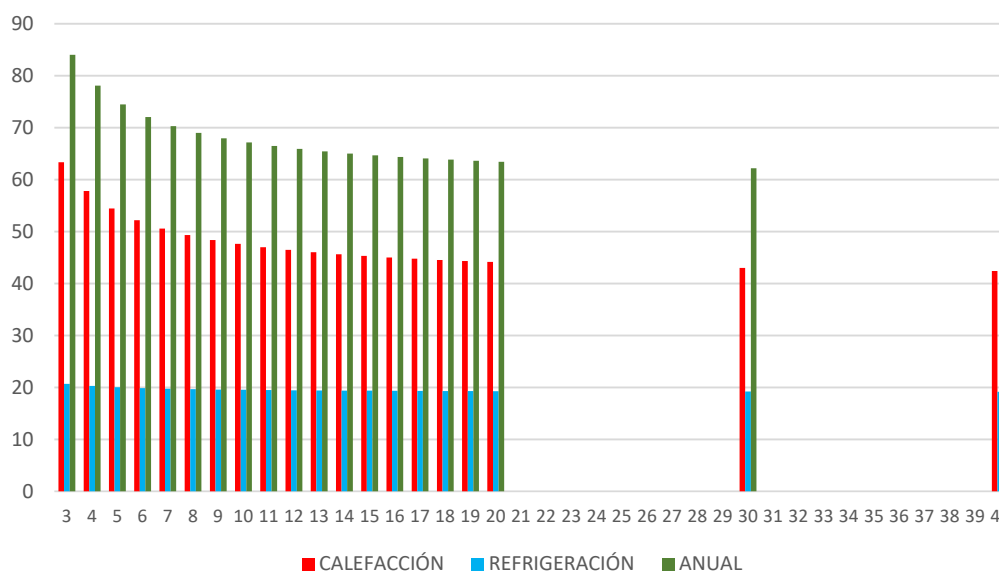


Figura 4.2.3. Demanda energética del edificio (kWh/m2.año) resultante tras modificar el número total de plantas, para los tres periodos estudiados. Elaboración propia

Un edificio con mayor número de plantas es más compacto, es decir, la proporción entre la superficie de la envolvente térmica y el volumen construido es menor.

Observamos que la demanda de refrigeración no se ve afectada por este hecho, mientras que la de calefacción -y por lo tanto la anual-, varía sustancialmente entre los edificios de menor número de plantas, estabilizándose en el resto.

Esto indica, para el caso estudiado, que los edificios de mayor altura -más compactos- tienen, de partida, una menor demanda energética.

Neila González (1984), en su tesis doctoral, concluye que *“los edificios más altos tienen un consumo relativo menor que los bajos”*. A modo de ejemplo indica que un edificio de diez plantas puede consumir hasta un 48% menos que diez edificios de una.

La selección de los dos edificios tipo del conjunto hexagonal tiene relación con este hecho: evaluamos la torre de 16 plantas y el basamento, de dos.

4.2.2. Rangos sensibles uniparamétricos

Determinamos los rangos de valores en los que el edificio se muestra más sensible a la variación de cada parámetro así como las posibilidades máximas de mejora. Para ello realizamos el primer test uniparamétrico, consistente en variar cada vez un parámetro de modo independiente para ver como se comporta la demanda energética del edificio original y establecer su sensibilidad a esa variación.

El listado de resultados del cálculo se exponen en el anejo A2.2. La serie 1 de gráficas ilustra los resultados obtenidos tras la variación de cada parámetro y está reproducida en el las gráficas del anejo A1.2

Representamos los resultados obtenidos en la tabla 4.2.2, donde se expresan los valores máximos, mínimos y el rango de variación para cada uno de los test. Ordenamos los parámetros en función de los resultados, de máxima a mínima reducción demanda energética en valor absoluto alcanzada, en los tres periodos analizados, en las tablas 4.2.3.

TABLA 4.2.2. RESULTADOS DE DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m² año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO. VALORES MÍNIMOS, MÁXIMOS Y RANGO DEL MODELO 2

MODELO EDI02		CALEFACCIÓN			REFRIGERACIÓN			ANUAL		
		MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO
P1	ORIENTACIÓN	-42.49	-44.75	-2.25	19.51	20.50	0.98	62.84	64.51	1.66
P2	ALTITUD	-43.20	-43.52	-0.32	20.32	20.34	0.01	63.54	63.84	0.31
P3	e CUBIERTA	-41.99	-43.50	-1.51	19.92	20.49	0.57	61.96	63.99	2.03
P4	e SUELO	-40.73	-43.50	-2.77	20.44	20.49	0.05	61.20	63.99	2.79
P5	e FACHADA	-34.73	-43.50	-8.77	19.08	20.49	1.42	53.81	63.99	10.19
P6	U VIDRIO	-23.45	-43.50	-20.05	20.32	23.81	3.49	47.26	63.83	16.57
P7	U MARCO	-40.51	-47.80	-7.29	19.71	20.77	1.06	61.28	67.50	6.22
P8	a CUBIERTA	-42.72	-44.92	-2.20	19.50	21.01	1.50	63.73	64.42	0.69
P9	a FACHADA	-43.25	-50.01	-6.76	16.32	20.50	4.18	63.75	66.33	2.58
P10	a MARCO	-40.90	-44.18	-3.28	19.73	22.76	3.03	63.66	63.91	0.25
P11	m FACHADA	-41.60	-44.25	-2.65	19.17	21.37	2.20	60.77	65.62	4.85
P12	m FORJADO	-41.95	-45.76	-3.81	19.63	22.00	2.37	61.58	67.76	6.18
P13	g VIDRIO	-43.50	-68.16	-24.66	10.44	20.32	9.89	63.83	78.60	14.78
P14	fs VERANO	-43.50	-43.57	-0.07	10.44	20.32	9.88	54.01	63.83	9.82
P16	INF. HUECOS	-41.95	-43.50	-1.55	20.20	20.32	0.13	62.15	63.83	1.68
P17	PPTT	-31.44	-43.50	-12.06	18.19	20.32	2.13	49.63	63.83	14.19
Σ	CONDUCCIÓN		6	-8.74		6	1.45		6	8.67
Σ	RADIACIÓN		5	-7.39		5	5.69		5	5.62
Σ	INERCIA TÉRMICA		2	-3.23		2	2.28		2	5.51
Σ	CONVECCIÓN		1	-1.55		1	0.13		1	1.68

TABLA 4.2.3.a. RESULTADOS DEMANDA ANUAL (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 2, EDIFICIO HEXAGONAL TORRE

	MODELO EDI02	MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P6	U VIDRIO	47.26	73.9%	63.83	99.7%	16.57	25.9%
P17	PPTT	49.63	77.6%	63.83	99.7%	14.19	22.2%
P5	e FACHADA	53.81	84.1%	63.99	100.0%	10.19	15.9%
P14	FS VERANO	54.01	84.4%	63.83	99.7%	9.82	15.3%
P11	m FACHADA	60.77	95.0%	65.62	102.5%	4.85	7.6%
P4	e SUELO	61.20	95.6%	63.99	100.0%	2.79	4.4%
P7	U MARCO	61.28	95.8%	67.50	105.5%	6.22	9.7%
P12	m FORJADO	61.58	96.2%	67.76	105.9%	6.18	9.7%
P3	e CUBIERTA	61.96	96.8%	63.99	100.0%	2.03	3.2%
P16	INF. HUECOS	62.15	97.1%	63.83	99.7%	1.68	2.6%
P1	ORIENTACIÓN	62.84	98.2%	64.51	100.8%	1.66	2.6%
P2	ALTITUD	63.54	99.3%	63.84	99.8%	0.31	0.5%
P10	a MARCO	63.66	99.5%	63.91	99.9%	0.25	0.4%
P8	a CUBIERTA	63.73	99.6%	64.42	100.7%	0.69	1.1%
P9	a FACHADA	63.75	99.6%	66.33	103.7%	2.58	4.0%
P13	g VIDRIO	63.83	99.7%	78.60	122.8%	14.78	23.1%

CASO ORIGINAL	63.99
----------------------	--------------

TABLA 4.2.3.b. RESULTADOS DEMANDA CALEFACCIÓN (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 2, EDIFICIO HEXAGONAL TORRE

	MODELO EDI02	MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P6	U VIDRIO	-23.45	53.9%	-43.50	100.0%	-20.0527	46.1%
P17	PPTT	-31.44	72.3%	-43.50	100.0%	-12.0612	27.7%
P5	e FACHADA	-34.73	79.8%	-43.50	100.0%	-8.77026	20.2%
P7	U MARCO	-40.51	93.1%	-47.80	109.9%	-7.28691	16.8%
P4	e SUELO	-40.73	93.6%	-43.50	100.0%	-2.77062	6.4%
P10	a MARCO	-40.90	94.0%	-44.18	101.6%	-3.27681	7.5%
P11	m FACHADA	-41.60	95.6%	-44.25	101.7%	-2.65079	6.1%
P16	INF. HUECOS	-41.95	96.4%	-43.50	100.0%	-1.55266	3.6%
P12	m FORJADO	-41.95	96.4%	-45.76	105.2%	-3.81355	8.8%
P3	e CUBIERTA	-41.99	96.5%	-43.50	100.0%	-1.51318	3.5%
P1	ORIENTACIÓN	-42.49	97.7%	-44.75	102.9%	-2.25472	5.2%
P8	a CUBIERTA	-42.72	98.2%	-44.92	103.3%	-2.19668	5.0%
P2	ALTITUD	-43.20	99.3%	-43.52	100.0%	-0.31865	0.7%
P9	a FACHADA	-43.25	99.4%	-50.01	115.0%	-6.76247	15.5%
P13	g VIDRIO	-43.50	100.0%	-68.16	156.7%	-24.6611	56.7%
P14	FS VERANO	-43.50	100.0%	-43.57	100.2%	-0.06547	0.2%

CASO ORIGINAL	-43.50
----------------------	---------------

TABLA 4.2.3.c. RESULTADOS DEMANDA REFRIGERACIÓN (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO, ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 2, EDIFICIO HEXAGONAL TORRE

MODELO EDI02	MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P13 g VIDRIO	10.44	50.9%	20.32	99.2%	9.89	48.2%
P14 FS VERANO	10.44	51.0%	20.32	99.2%	9.88	48.2%
P9 a FACHADA	16.32	79.6%	20.50	100.0%	4.18	20.4%
P17 PPTT	18.19	88.8%	20.32	99.2%	2.13	10.4%
P5 e FACHADA	19.08	93.1%	20.49	100.0%	1.42	6.9%
P11 m FACHADA	19.17	93.5%	21.37	104.3%	2.20	10.7%
P8 a CUBIERTA	19.50	95.2%	21.01	102.5%	1.50	7.3%
P1 ORIENTACIÓN	19.51	95.2%	20.50	100.0%	0.98	4.8%
P12 m FORJADO	19.63	95.8%	22.00	107.3%	2.37	11.5%
P7 U MARCO	19.71	96.2%	20.77	101.3%	1.06	5.2%
P10 a MARCO	19.73	96.3%	22.76	111.1%	3.03	14.8%
P3 e CUBIERTA	19.92	97.2%	20.49	100.0%	0.57	2.8%
P16 INF. HUECOS	20.20	98.6%	20.32	99.2%	0.13	0.6%
P2 ALTITUD	20.32	99.2%	20.34	99.2%	0.01	0.1%
P6 U VIDRIO	20.32	99.2%	23.81	116.2%	3.49	17.0%
P4 e SUELO	20.44	99.7%	20.49	100.0%	0.05	0.3%

CASO ORIGINAL	20.49
----------------------	--------------

Nota: consideramos el caso original con un Factor de sombra en todos los huecos (parámetro P14) igual a uno. Este hecho produce un aumento de la demanda del caso cero respecto al edificio original en 7.10 kWh/m².año, dejándola en 20.49.

Los mínimos corresponden a la demanda energética más baja, obtenida variando el parámetro indicado (representado en porcentaje y en valor absoluto).

Comentamos los resultados por periodos:

PERIODO DE CALEFACCIÓN

El edificio se muestra más sensible a la variación de los parámetros relacionados con la conducción -con el aislamiento térmico de los elementos-.

La transmitancia térmica del vidrio -P6-, por sí sola, puede hacer descender la demanda de calefacción a la mitad.

La reducción de la transmitancia en los puentes térmicos -P17- y el aumento del espesor de aislamiento en fachada opaca -P5-, pueden hacer descender la demanda hasta un 28% cada uno.

El resto de los parámetros de aislamiento térmico pueden llegar a mejorar el edificio hasta un 7%.

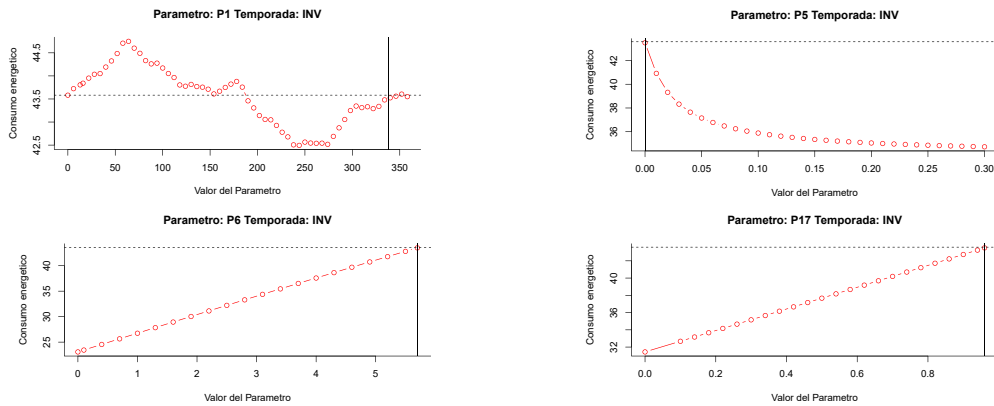


Figura 4.2.4. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 2. Demanda de calefacción

La orientación -P1- se presenta muy poco determinante, como era de esperar, ya que el edificio tiene una planta hexagonal, que lo hace simétrico en varios ejes. Aunque las tres viviendas por planta son distintas, esta organización es la causa de que, en este caso, la variación de la orientación influya poco en la demanda de todo el edificio.

La U del marco de las carpinterías exteriores -P7- puede bajar la demanda un 7% o subirla hasta un 10%. Modificar la absorción de éste también puede reducir la demanda hasta un 6%.

Respecto a los parámetros de inercia térmica, es de destacar que la masa de la fachada -P11- y la de los forjados -P12- pueden hacer bajar la demanda hasta un 4,4%. Modificar la masa de los forjados puede aumentar la demanda un 5,2%.

El parámetro P13, factor solar g de los vidrios, puede aumentar la demanda energética en este periodo en más de la mitad. Si su valor reduce todas las ganancias solares del edificio, la demanda será un 156,7% respecto al edificio original. Este hecho lo hace ser el parámetro al que el edificio se muestra más sensible, seguido de otro relacionado con los vidrios: el P6 (U del vidrio).

Reducir las infiltraciones por los huecos -P16-, que parten del valor de máxima infiltración, puede bajar la demanda en un 3,6%.

La altitud -P2- se presenta irrelevante: su variación no altera prácticamente la demanda energética en ningún sentido. El parámetro 14 solo es aplicable a los meses de verano por lo que no muestra ninguna influencia en este periodo.

PERIODO DE REFRIGERACIÓN

El edificio original, tal como fue proyectado y construido, cumple con los requisitos normativos para la demanda energética en verano¹, un resultado muy destacable.

Los dos parámetros que pueden mejorar más la demanda por sí mismos son el factor solar del vidrio -P13- y las protecciones solares de los huecos -factor de sombra P14-. Podemos reducir a la mitad la demanda de refrigeración variando únicamente el g del vidrio o protegiendo adecuadamente los huecos de la radiación solar en verano.

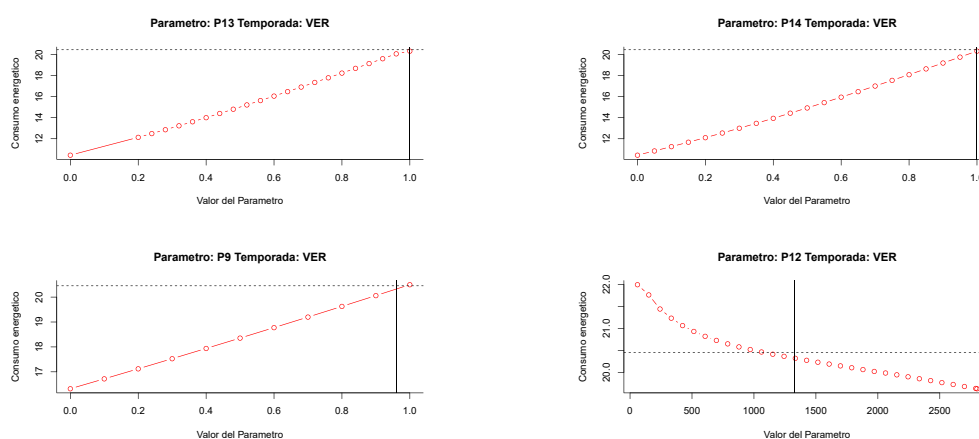


Figura 4.2.5. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 2. Demanda de refrigeración

El tercer parámetro que obtiene los mejores resultados también está relacionado con la radiación solar. Es el parámetro P9, absorptancia de la fachada: diseñando un edificio con tratamiento superficial adecuado podemos reducir en un 20% la demanda energética de verano. La absorptancia de la cubierta -P8-, en este edificio, con poca superficie respecto a la fachada, puede reducir también la demanda en un 5%.

El edificio se muestra sensible a la variación de la inercia térmica en verano: el P11 -masa de la fachada opaca-, puede reducir la demanda en un 6.5% o aumentarla un 4.3%, según el caso. La masa de los forjados -P12-, puede también mejorar la demanda en un 4.2% o empeorarla en un 7.3. No son valores muy altos pero sí considerables para optimizar un edificio.

1 La demanda de refrigeración límite para zona B3 según el DB HE (2013) es 15 kWh/m².año

Los parámetros relacionados con la conducción que obtienen mejores resultados son el P17 -puentes térmicos-, y el P5 -espesor del aislamiento de fachada. La reducción de la demanda llega al 11,2% en el primero y al 6,9 en el segundo.

La orientación influye poco (por lo anteriormente comentado).

La U del vidrio -P6-, tan influyente en calefacción, no puede mejorar prácticamente nada el edificio. Sin embargo puede aumentar la demanda hasta en un 16,2% si el mejoramos el parámetro, es decir, si reducimos el valor de U.

Las infiltraciones por los huecos -P16- pueden bajar únicamente la demanda en un 1,4%. La altitud -P2- se muestra también irrelevante.

PERIODO ANUAL

La demanda energética en periodo anual es la suma de las demandas de calefacción, ocho meses, y refrigeración, cuatro meses. Los resultados deben ser, por lo tanto, la combinación de ambos periodos.

Los parámetros que obtienen los mejores valores de demanda energética son prácticamente los mismos que en el periodo calefacción, con ligeras variaciones en la posición.

La variación de la transmitancia térmica U de los vidrios -P6-, alcanza el valor mínimo de demanda energética, con una reducción del 26,9% para valores de U bajos.

Los puentes térmicos -P17- consiguen un 22,4% de reducción. Les sigue el parámetro P5, espesores de aislamiento térmico de la fachada y el factor de sombra en verano -P14, con una reducción en torno al 15%.

Los parámetros de absorción pierden importancia al ver los datos en un ciclo anual. Teniendo en cuenta que se mueven en sentido contrario según sea el periodo calefacción o refrigeración, el agregado anual se compensa y altera poco el total.

El factor solar g del vidrio -P13, que no consigue prácticamente mejorar la demanda, puede empeorarla hasta un 22,8% con valores de g bajos (vidrios muy poco transparentes). Al reducir g va mejorando el verano y a la vez, empeorando en invierno. La consideración de un invierno de ocho meses frente a un verano de cuatro inclina la balanza hacia el primero.

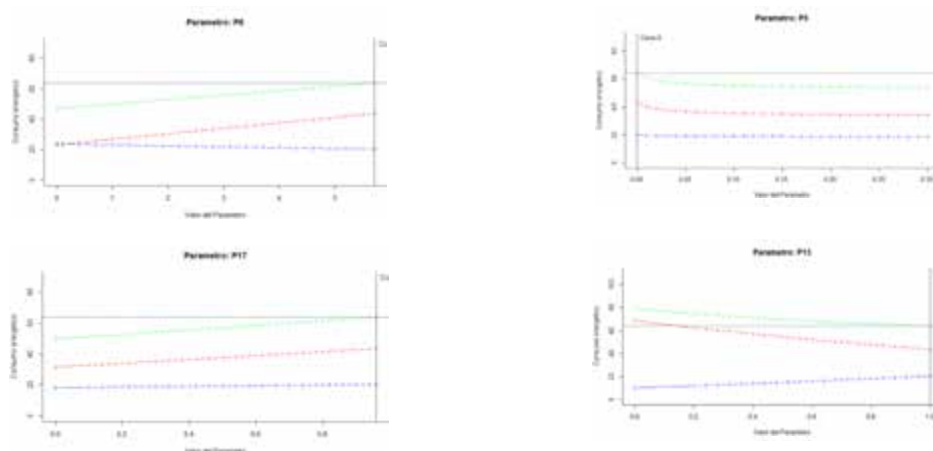


Figura 4.2.6. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 2. Demanda anual (verde) representando las demandas de calefacción (rojo) y refrigeración (azul)

4.2.3. Resultados de los muestreos

Realizamos dos tipos de muestreos: uno sensible y otro uniforme, con diez mil casos cada uno. Tal como se justifica en el procedimiento, seleccionamos el muestreo uniforme para analizar la influencia de los parámetros.

En primer lugar exponemos los resultados obtenidos en el muestreo uniforme, con los coeficientes de determinación R^2 de los parámetros, por separado (u) y ajustados por los demás (a). Seguidamente ordenamos los parámetros de mayor a menor R^2 ajustado, para considerar la acción combinada de la totalidad. Se realiza para los tres periodos estudiados: anual, calefacción y refrigeración.

Para terminar, analizamos los parámetros singulares observando los resultados representados gráficamente.

PERIODO DE CALEFACCIÓN

El parámetro que obtiene un coeficiente de determinación mayor es el P6, transmitancia térmica de los vidrios. Explica el 41,9% de la demanda de calefacción.

El segundo más influyente también tiene que ver con los vidrios, en este caso con su factor solar g -P13-, que obtiene un $R^2(a)$ del 27,8%. En cuarto lugar tenemos otro parámetro relacionado con los huecos, la transmitancia térmica de los vidrios, con un R^2 igual a 6,8%.

000 casos

	Par	CALEu	REFRu	ANUAu	CALEa	REFRa	ANUAa
ORIENTACION	P1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
E CUB	P3	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1
E SUELO	P4	0.6	0.1	0.6	0.4	0.1	0.5
E FACHADA	P5	4.5	0.1	5.4	5.0	0.1	5.9
U VIDRIO	P6	42.9	2.9	42.2	41.9	2.9	41.1
U MARCO	P7	7.0	1.1	6.2	6.8	1.0	6.2
α CUBIERTA	P8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
α FACHADA	P9	0.3	0.7	0.1	0.3	1.0	0.1
a MARCO	P10	1.9	11.3	0.2	1.6	11.1	0.1
m FACHADA	P11	0.1	0.3	0.3	0.1	0.4	0.3
m FORIADO	P12	0.3	1.7	1.0	0.3	2.0	1.2
g VIDRIO	P13	29.4	27.6	16.7	27.8	25.8	16.0
FS VERANO	P14	0.0	38.7	4.4	0.0	38.6	4.5
INF. HUECOS	P16	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.3
PPTT	P17	12.6	2.5	19.1	12.3	3.0	19.2

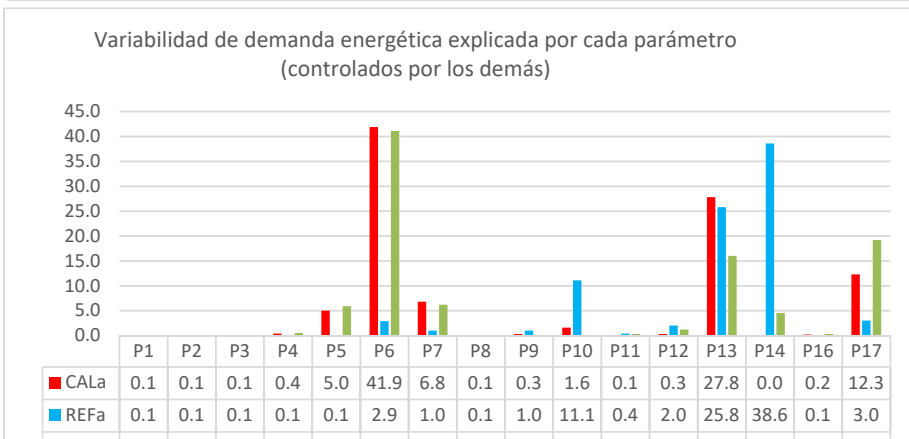
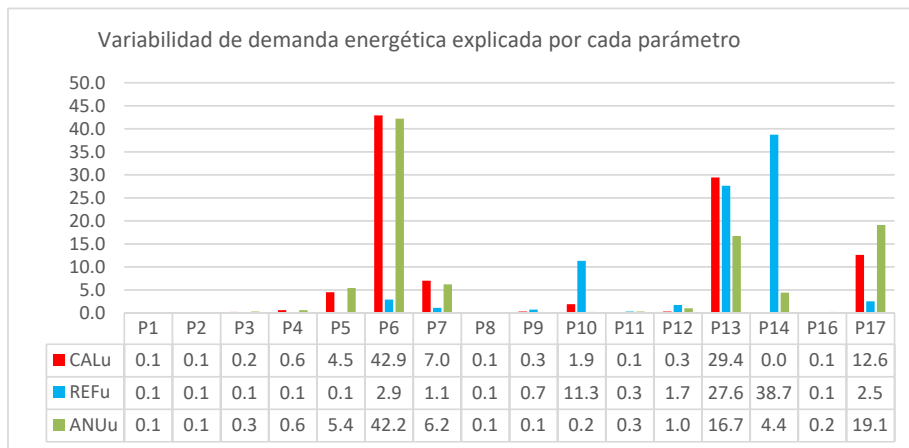


Figura 4.2.7. Valores de los coeficientes de determinación R2 (%) por separado (u) y ajustados por los demás (a). Muestreo uniforme con 10 000 casos

TABLA 4.2.4. VALORES DE LOS COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN R^2 (%) POR SEPARADO (u) Y AJUSTADOS POR LOS DEMÁS (a). MUESTREO UNIFORME

	Par	ANUAu	ANUAa
U VIDRIO	P6	42.2	41.1
PPTT	P17	19.1	19.2
g VIDRIO	P13	16.7	16.0
U MARCO	P7	6.2	6.2
E FACHADA	P5	5.4	5.9
FS VERANO	P14	4.4	4.5
m FORJADO	P12	1.0	1.2
E SUELO	P4	0.6	0.5
m FACHADA	P11	0.3	0.3
INF. HUECOS	P16	0.2	0.3
ORIENTACION	P1	0.1	0.1
E CUB	P3	0.3	0.1
a MARCO	P10	0.2	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1
a CUBIERTA	P8	0.1	0.1
a FACHADA	P9	0.1	0.1

	Par	CALEu	CALEa
U VIDRIO	P6	42.9	41.9
g VIDRIO	P13	29.4	27.8
PPTT	P17	12.6	12.3
U MARCO	P7	7.0	6.8
E FACHADA	P5	4.5	5.0
a MARCO	P10	1.9	1.6
E SUELO	P4	0.6	0.4
a FACHADA	P9	0.3	0.3
m FORJADO	P12	0.3	0.3
INF. HUECOS	P16	0.1	0.2
E CUB	P3	0.2	0.1
ORIENTACION	P1	0.1	0.1
m FACHADA	P11	0.1	0.1
a CUBIERTA	P8	0.1	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1
FS VERANO	P14	0.0	0.0

	Par	REFRu	REFRa
FS VERANO	P14	38.7	38.6
g VIDRIO	P13	27.6	25.8
a MARCO	P10	11.3	11.1
PPTT	P17	2.5	3.0
U VIDRIO	P6	2.9	2.9
m FORJADO	P12	1.7	2.0
a FACHADA	P9	0.7	1.0
U MARCO	P7	1.1	1.0
m FACHADA	P11	0.3	0.4
a CUBIERTA	P8	0.1	0.1
E CUB	P3	0.1	0.1
ORIENTACION	P1	0.1	0.1
INF. HUECOS	P16	0.1	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1
E SUELO	P4	0.1	0.1
E FACHADA	P5	0.1	0.1

En fondo blanco, parámetros con R^2 ajustado inferior al 2%

Los puentes térmicos -P17- se cuelan entre estos tres parámetros relacionados con los huecos en fachada, aunque hay que recordar que muchos de los puentes térmicos considerados están situados en éstas: jambas, dintel y alfeizar.

Todo esto nos lleva a considerar que los huecos son los que más determinan la variación de la demanda energética de calefacción en los casos generados a partir del modelo 2.

Del resto de variables, solo el espesor del aislamiento en fachada -P5- obtiene un $R^2(a)$ superior al 2%, en este caso se queda en el 5%. Destaca la escasa influencia del aislamiento en suelos y cubierta así como los parámetros de inercia térmica y absorptancia. Confirmamos también que la orientación en este edificio, por configuración hexagonal, no es relevante.

P6. Transmitancia térmica U de los vidrios

Los mejores casos están situados en la zona del valor mínimo del parámetro.

Según argumentamos en el capítulo 3.2, vidrios con U próximas a $1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ no son difícil de conseguir, aunque los vidrios más utilizados están entre 2,5 y 3,5. El valor óptimo estaría, pues situado en torno a la unidad.

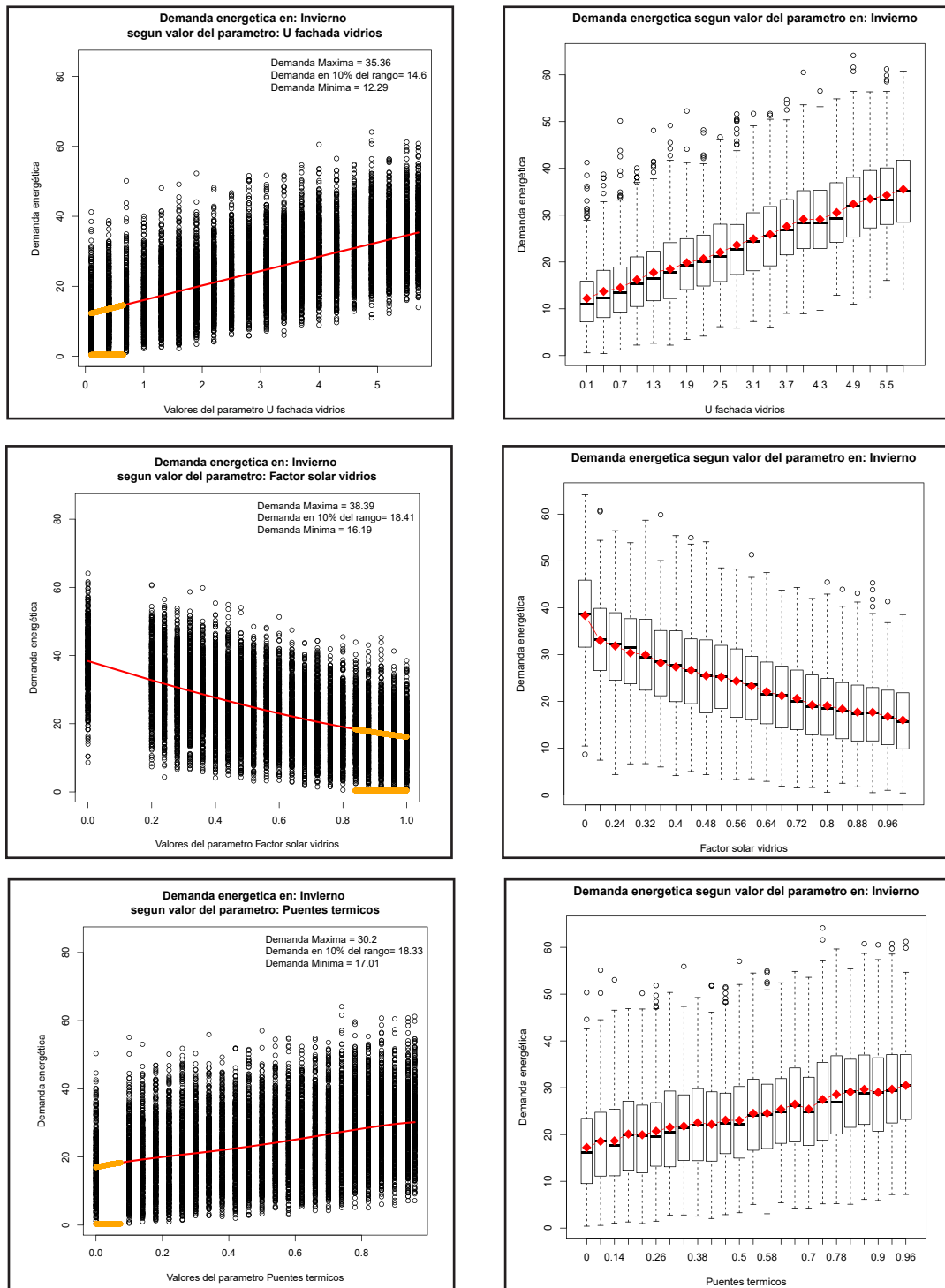


Figura 4.28. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P6, P13 y P17. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

P13. Factor solar g del vidrio

Este parámetro se muestra determinante en un 27,8%. Los valores más altos de P13 son los que dan mejores resultados. P13=1 equivale a un $g=0,85$, un valor que podemos considerar máximo de captación solar a través de un vidrio monolítico.

En invierno, construir con vidrios lo más transparentes posibles -que dejan pasar al máximo la radiación solar- se muestra fundamental. En estos casos es más influyente que en los basados en el modelo 1. Podríamos bajar P13 hasta 0,83 ($g=0,7$) sin que la demanda media se modifique más de un 10%, lo que permitiría ir a vidrios con cámara sin empeorar en exceso los resultados.

P17. Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

Los valores mínimos de este parámetro obtienen demandas más bajas en calefacción. Las medias obtenidas varían entre 17 y 30 kWh/m².año, y su R² ajustado queda en el 12,3%.

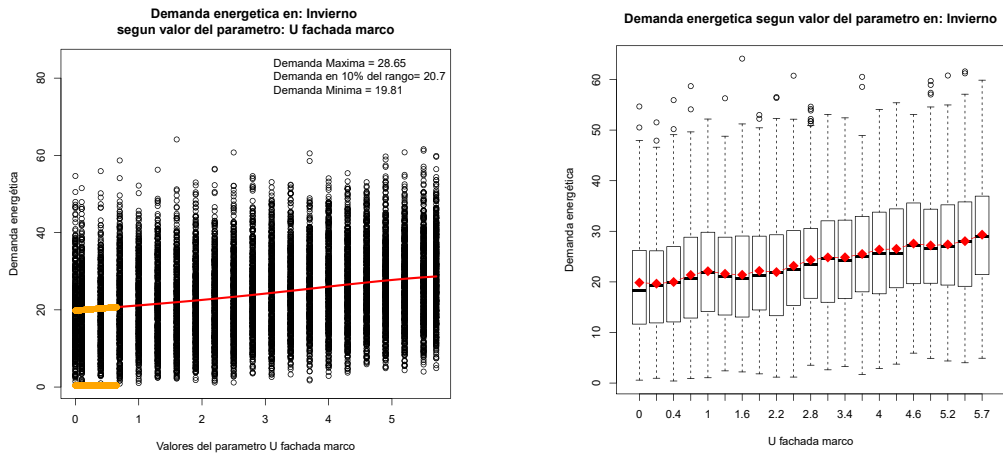
Es el primer parámetro relacionado con la parte opaca de la envolvente y, aunque es influyente, queda lejos de los dos primeros.

P7 Transmitancia térmica U de los marcos

Los valores bajos de U en los marcos de los huecos de fachada obtienen, de media, los valores más bajos de demanda en calefacción. El edificio original, con marcos de madera, está en una buena posición respecto a esta variable, con valores en torno a 2,2. Los marcos metálicos de aluminio comercializados con rotura de puente térmico, pueden acercarse al valor 1. Analizando las gráficas vemos que podemos llegar a valores próximos a 0,8 sin aumentar la demanda más de un 10% respecto al valor de U mínimo.

P5 Espesor del aislamiento térmico en fachada

De los parámetros de aislamiento térmico de la envolvente opaca (cubierta, suelo y fachada) es la única que se sitúa en un lugar relevante, aunque su coeficiente de determinación queda en un 5%. Actuar sobre el aislamiento térmico de la fachada opaca se muestra poco influyente en el total, para edificios generados a partir de la torre hexagonal. Es el edificio más compacto de los estudiados. Si analizamos la gráficas observamos, como viene ocurriendo, que son los primeros centímetros



los más influyentes y el resto, se muestran menos determinantes. Conviene incidir

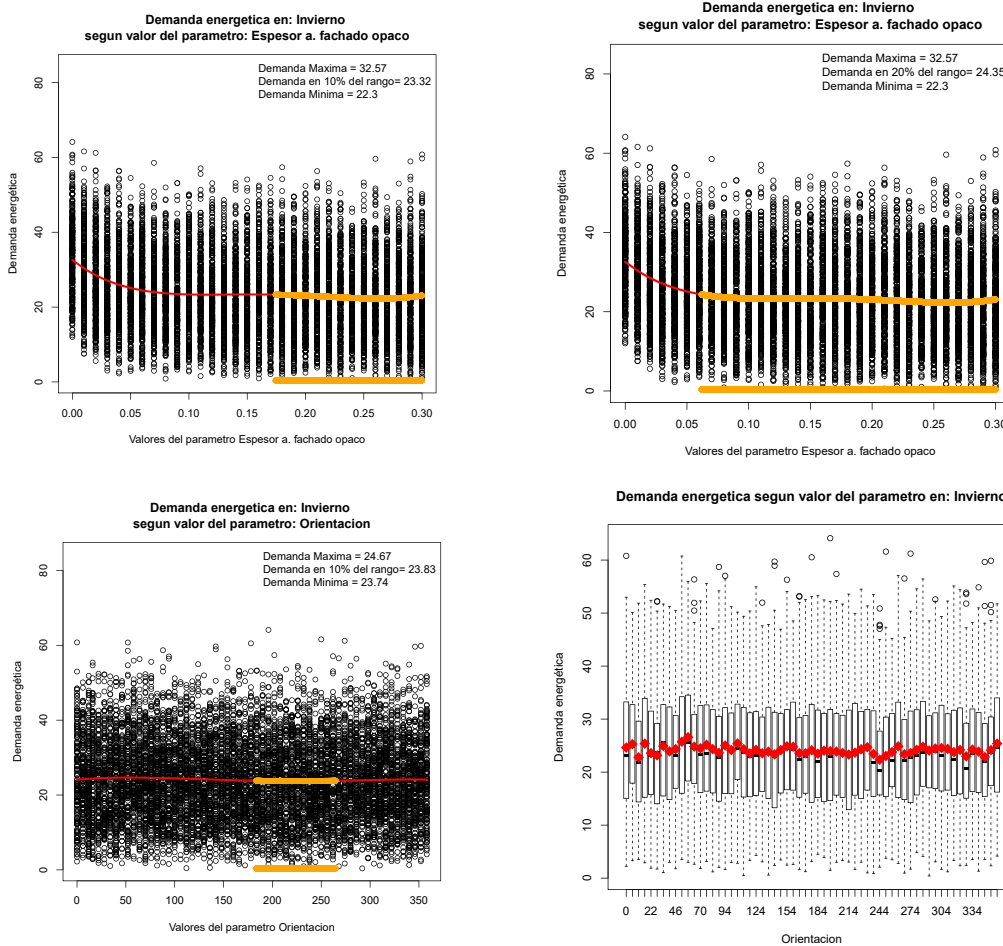


Figura 4.2.9. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función de los parámetro P4, P5 y P1. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%, derecha 20%

en que este valor del 5% no quiere decir que únicamente varíe la demanda en ese porcentaje, sino que representa la influencia sobre la variación de la demanda energética media entre los 10 000 casos de estudio.

A la vista de la figura 5.2.11, pasar de 6 centímetros del aislamiento térmico considerado solo podrá alterar de media un 20% la demanda, aunque la curva se muestra prácticamente como una recta horizontal desde ese valor. Por lo tanto, hasta 6 cm la influencia es alta, pero desde ese valor, empieza a ser más irrelevante, por lo que la demanda dependerá principalmente de otros factores.

De los valores que muestran una baja o nula determinación en el resultado obtenido podemos comentar:

P2 Altitud

Confirma lo observado en el test uniparamétrico de este modelo y del modelo 1, con lo que tiene escasa incidencia.

P1 Orientación

Como ya hemos justificado, el diseño hexagonal de la torre le hace presentarse de un modo muy parecido ante distintas orientaciones, por lo que confirmamos lo que cabría esperar de un edificio con tres ejes de simetría (no exacta, dado que las viviendas no son exactamente iguales, pero si aproximada).

Representamos la orientación del edificio en la figura 4.2.10. y los resultados obtenidos en las gráficas de la figura 4.2.9.

P11 y P12, masa de forjados y fachada opaca

La determinación de estos factores resulta casi irrelevante, aunque el edificio original mostró cierta sensibilidad en los test uniparamétricos. La combinación de todos los parámetros los relegan a posiciones de mínima influencia.

Valores altos de masa en fachadas y forjados obtienen los mejores resultados, con variaciones medias que no llegan a 1 kWh/m².año en la fachada, y a dos en forjados. Para este caso estas cantidades de mejora son mínimas pero, si en un futuro las exigencias aumentan, será importante conocer este hecho.

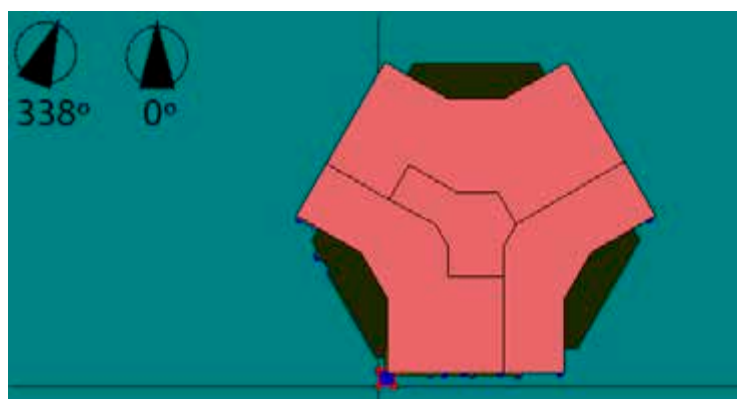


Figura 4.2.10. Orientación del edificio en función del parámetro P1. El valor 338° corresponde con el edificio original

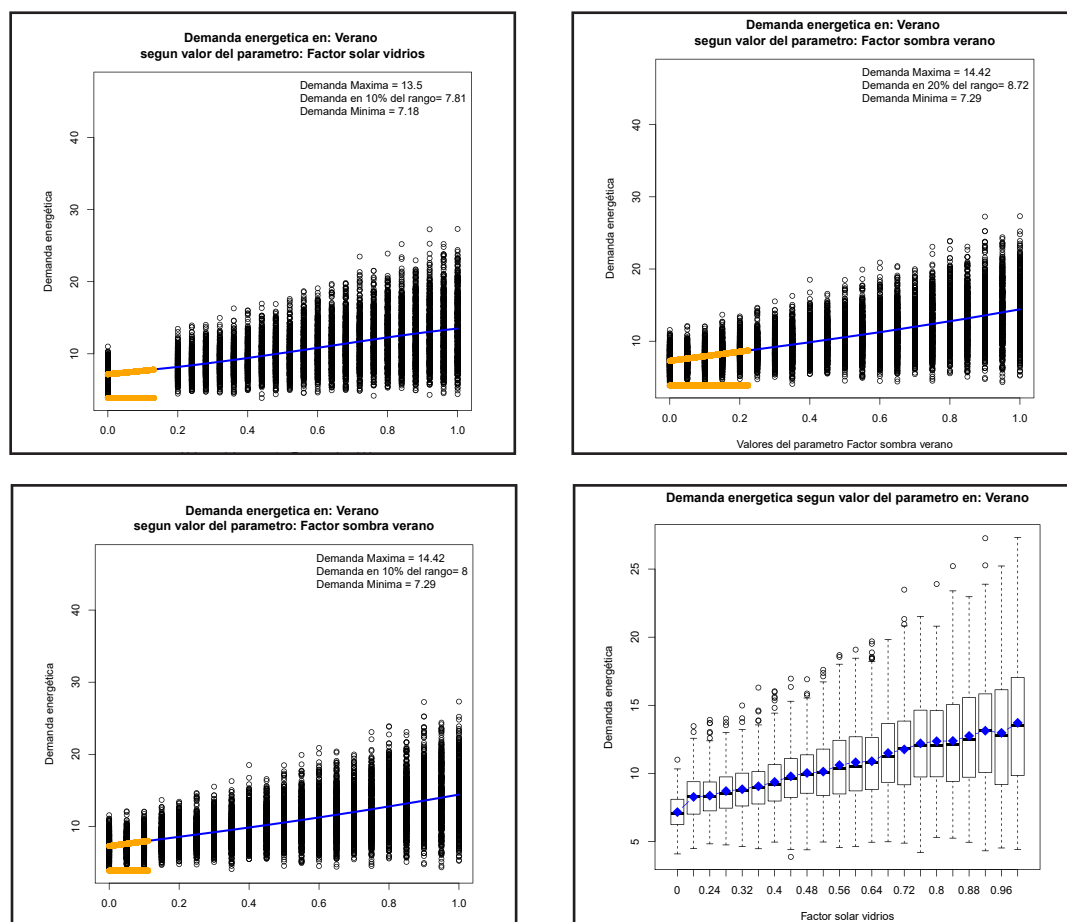


Figura 4.2.11. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P13 y P14. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

PERIODO REFRIGERACIÓN

En refrigeración, los parámetros relacionados con la radiación solar alcanzan los mayores coeficientes de determinación, como también observamos en los test uniparamétricos y en los casos basados en el modelo 1.

Los relacionados con la conducción térmica de la envolvente opaca pierden la relevancia mostrada en el periodo de calefacción, por lo que aislamientos térmicos de fachada, cubierta o suelo son poco o nada influyentes en refrigeración. Algo influyen los que definen los huecos, ya que la U de vidrios queda como el quinto parámetro más influyente, aunque con un valor muy bajo, el 2,9% aunque los mejores resultados se obtienen con valores contrarios a los de calefacción.

El parámetro más determinante en la variación de la demanda energética es el factor de sombra en verano -P14-, que plantea una protección solar de los huecos específica en los meses de este periodo. Alcanza un R^2 ajustado del 38,6%.

El factor solar de los vidrios -P13- se sitúa en segundo lugar. Es aplicable a todo el año, por lo que la radiación que deja de sumarse a las cargas térmicas de verano, también deja de mejorar las ganancias pasivas en invierno. Esto se verá reflejado en la demanda anual. Tiene un R^2 de 25,8%.

Respecto a la absorción de los elementos, únicamente la de los marcos se presenta como determinante, con un R^2 de 11,1%. La absorción de la fachada se muestra mucho menos determinante, resultado inesperado que debemos analizar.

El primer parámetro relacionado con el aislamiento térmico de la envolvente es el P17, puentes térmicos. Queda en cuarto lugar, con una determinación mostrada de un 3%, muy alejado de los tres primeros pero con posibilidades de mejora.

La inercia térmica de los forjados -P12- muestra cierta relevancia, con un R^2 del 2%. La altitud -P2- también es irrelevante en este periodo. Lo mismo ocurre con la infiltración de aire en los huecos -P16-: la estanqueidad al aire de las carpinterías no parecen influir en el comportamiento térmico estival.

Espesores de aislamiento en cubierta, fachada y suelo se muestran nada influyentes. Los tres quedan junto con la altitud con R^2 ajustado igual a cero. Como observamos en los test uniparamétricos, en algunos casos puede ser hasta contraproducente.

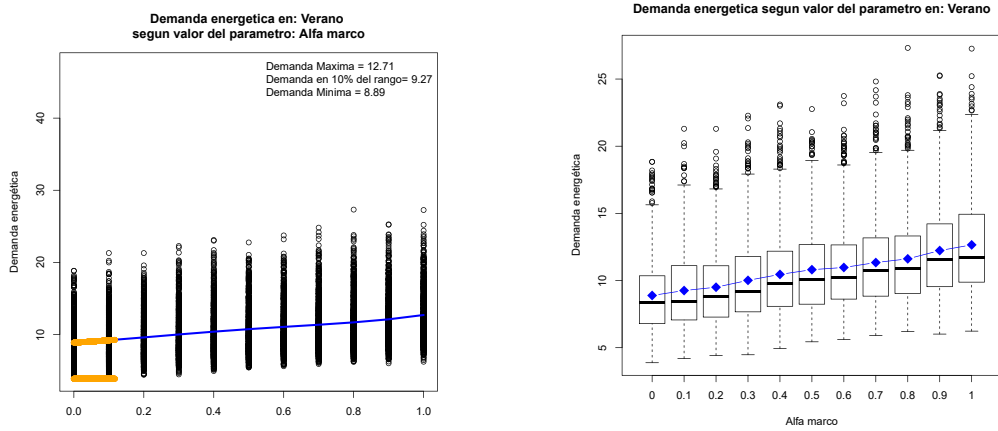


Figura 4.2.12. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P10. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%, derecha 20%

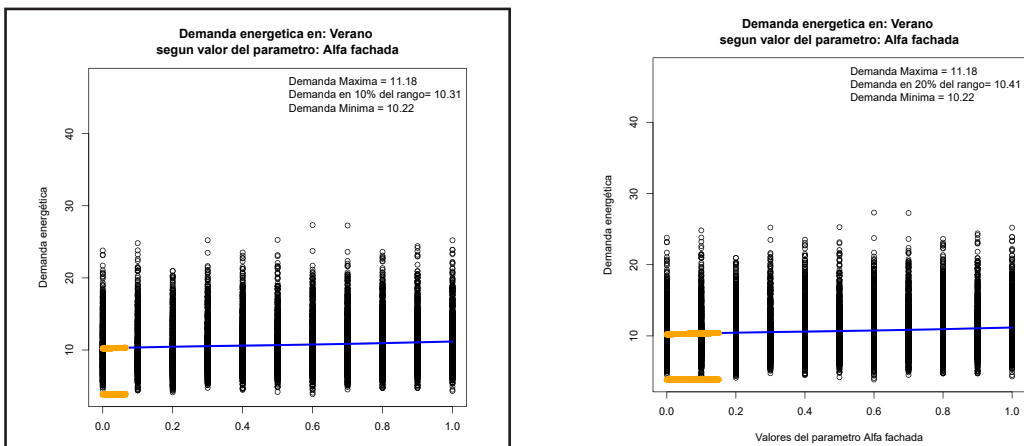


Figura 4.2.13. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función del parámetro P9. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%, derecha 20%

Pasemos a analizar los parámetros más representativos:

P14 Factor de sombra en verano

El R^2 de este parámetro se acerca al 40%. La regresión nos muestra una variación lineal, con disminución del resultado de demanda hacia el valor mínimo. Este resultado, como cabía esperar, nos indica que una correcta protección solar de los huecos puede explicar gran parte de la variabilidad entre las demandas en verano de los casos de estudio. Es de reseñar que el edificio original contempla este hecho desde el diseño arquitectónico, con los sistemas de lamas plegables que protegen los grandes huecos de las terrazas.

Podemos entender que el valor óptimo queda en torno a 0,2, como argumentamos en los casos basados en el modelo 1.

P13. Factor solar g del vidrio

El comportamiento de este parámetro es lineal, con los mejores resultados en la zona de factor solar mínimo. El valor de $g=0,3$ ($P13 = 0,35$) puede considerarse como valor óptimo en el periodo de calefacción, como hemos argumentado anteriormente.

P 8, P9 y P10 Absortancia de la cubierta, la fachada y los marcos

La radiación solar incidente en las partes opacas de la envolvente también tienen relevancia en los resultados obtenidos.

De los tres elementos evaluados, cubierta, fachada y carpinterías, es la última la que se muestra más determinante. El color de los marcos de carpintería explica el 11,1% de la variabilidad de la demanda energética para los edificios generados a partir del modelo 2. Es un dato muy destacable (como en los casos basados en el modelo 1) dado que la superficie ocupada por los marcos es pequeña en relación con cubiertas o fachadas opacas. Su determinación es mayor que en el Modelo 1.

Si observamos el muestreo sensible, disponible en el anejo de resultados, vemos que éste parámetro P10 obtiene un R^2 ajustado de 9,4, por lo que parece que es un dato a considerar. La absortancia de la fachada queda con un coeficiente de determinación muy bajo, el 1%, y el de la cubierta se acerca a cero, con un 0,1%.

En las gráficas representamos los resultados (fig. 4.2.12 y siguientes). El rango de variación de los valores medios se sitúa en unos 4 kWh/m²año, un valor considerable dado que el límite actual de la demanda energética en verano está situado en 15. Los valores de absortancia bajos -colores claros-, son los que mejoran la demanda energética del edificio, como cabía esperar. Por lo tanto, marcos muy reflectantes, de colores claros, son la mejor opción para el periodo de verano.

Constatamos que la influencia del color de la fachada -P9-, que se mostró muy relevante en el primer test de variación uniparamétrica, pierde peso cuando lo evaluamos de modo combinado con el resto: aun así, no debe ser descartado pues el edificio original si mostró la sensibilidad a su variación, que estos diez mil edificios no han mostrado. Además, si observamos el muestreo sensible, el P9 obtiene un R^2 ajustado de 3,3%

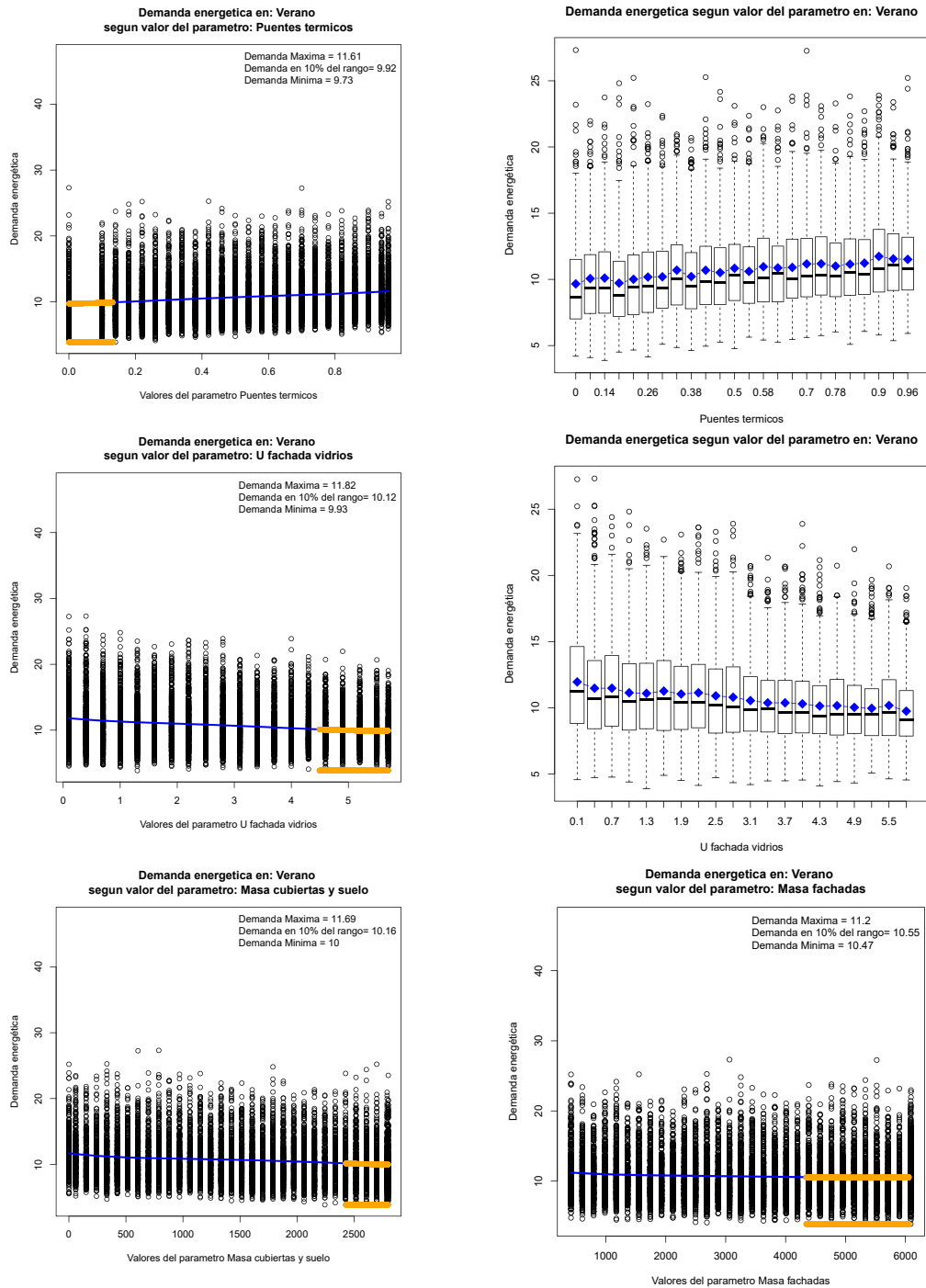


Figura 4.2.14. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos). Arriba parámetro P17, centro P6, abajo izquierda P12, abajo derecha P11.

P17. Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

Este parámetro se sitúa tras los tres más influyentes, con un R^2 de 3%. Es el primer parámetro relacionado con el aislamiento térmico por conducción.

Trabajar al máximo la reducción de los puentes térmicos -que representa el valor 0-, representa una pequeña reducción en los valores medios de demanda.

Su influencia es lineal, con pequeña pendiente hacia los valores mínimos.

P6 Transmitancia térmica U del vidrio

El siguiente parámetro de conducción térmica es la U del vidrio, con un parecido R^2 al anterior.

El resto de parámetros de aislamiento térmico quedan con coeficiente de determinación nulo, es decir, con influencia nula en la demanda energética de verano. Solo otro relacionado con los huecos, el P7 U del marco, alcanza el 1%.

El valor óptimo de este parámetro nos lleva a vidrios con U muy fácil de conseguir en el mercado y de signo contrario al que mejor se comporta en invierno.

P11 y P12, Masa del forjado y masa de la fachada

De los menos influyentes, la masa de los forjados es la que obtiene un R^2 mayor, con un 2%.

El otro parámetro, el P11 masa de la fachada, queda en última posición con influencia nula.

Los valores bajos de masa de forjados aumentan ligeramente la demanda energética del edificio. Igual ocurre con la masa de la fachada, pero siendo menos influyente.

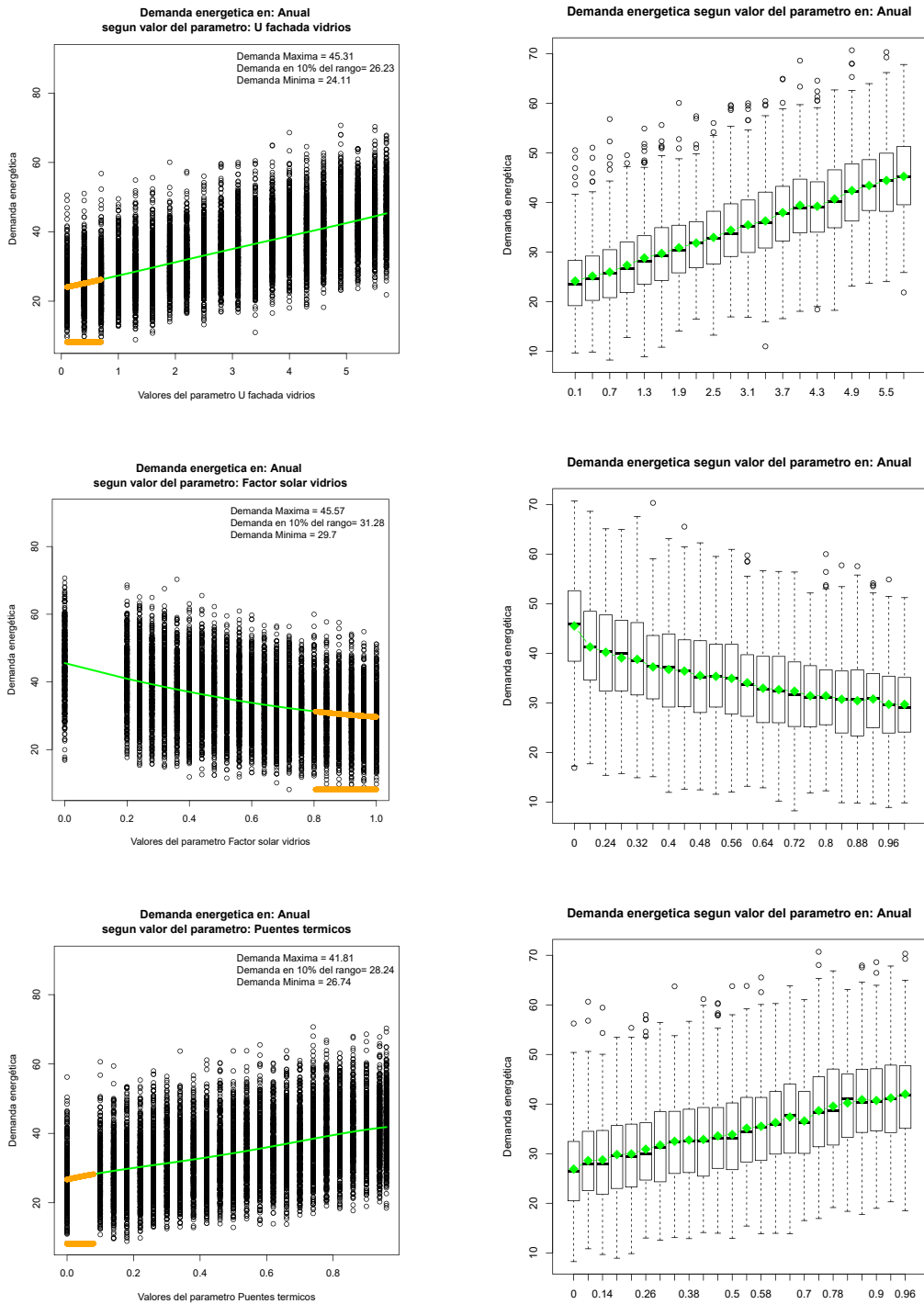


Figura 4.2.15. Representación gráfica de los resultados de demanda energética anual obtenidos en el muestreo uniforme (10 000 casos) en función de los parámetros, arriba P6, centro P13, abajo P17. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda energética anual.

PERIODO ANUAL

La demanda energética en el periodo anual es el resultado de la suma de las demandas de calefacción y refrigeración.

Los resultados de los R^2 son muy parecidos a los obtenidos para el periodo de calefacción, con diferencias en cuanto al porcentaje y el orden.

Los parámetros relacionados con la conducción térmica son los más influyentes: U del vidrio -P6- y puentes térmicos -P17- son los dos que más influyentes en un ciclo anual.

El tercer parámetro que mejor explica la demanda energética anual es el factor solar g del vidrio -P6-. Es el primero de los relacionados con la radiación solar y obtiene un R^2 del 16%.

A distancia les siguen la U de los marcos, que junto con la del vidrio marca la importancia de los huecos en este tipo de edificios, y el espesor de aislamiento en fachada, con un coeficiente de determinación del 5,9%

La protección solar de los huecos -P14- se muestra como el último de los parámetros de mayor influencia. Quedó el primero en refrigeración, lo que lo sitúa en una posición relevante en el ciclo anual.

Todas las absorptancias de los elementos de la envolvente pierden el protagonismo que tienen en verano.

El único parámetro de inercia térmica que pasa del 1% es la masa de los forjados -P12. El resto queda con escasa o nula influencia.

Queda claro que, durante todo el año, las características de los huecos son fundamentales para reducir la demanda energética.



4.3. RESULTADOS CASOS BASADOS EN EL MODELO 3. EDIFICIO HEXAGONAL BASAMENTO

Aplicamos la metodología propuesta al tercer edificio, seleccionado como modelo para generar los casos de estudio.

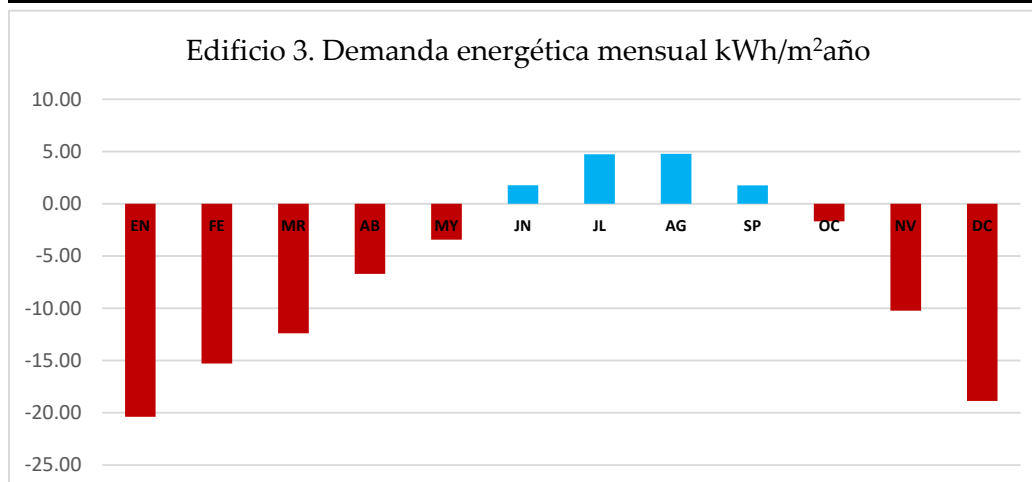
4.3.1. Resultados del edificio original

Cuantificamos la demanda energética del edificio original con la aplicación informática de simulación energética de edificios seleccionada. Al igual que en la torre del Conjunto Hexagonal (modelo 2), consideramos la protección solar estacional que disponen los huecos de las terrazas, con un coeficiente P14 igual a 0,2. En los test, para poder aplicar el procedimiento propuesto, partimos de un valor de P14 igual a 1 en todos los huecos con objeto de realizar la variación conjunta: por este hecho, el valor de demanda en refrigeración del edificio original respecto al caso cero de la batería de cálculos varía.

Con los datos obtenidos en la investigación, procedemos a modelizar el edificio en el software de simulación obteniendo los siguientes resultados:

TABLA 4.3.1. RESULTADOS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO 3

RESULTADOS A NIVEL EDIFICIO													
(kWh/m2 del edificio)													
Anual	102.02		Cal.			-89.01		Refr.					13.01
	EN	FE	MR	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DC	
	-20.39	-15.29	-12.40	-6.71	-3.44	1.76	4.73	4.77	1.75	-1.68	-10.23	-18.87	



Analizamos pormenorizadamente los datos de demanda energética, desglosándola por componentes, en calefacción y refrigeración. Los representamos en la siguiente figura:

	CALEFACCIÓN				REFRIGERACIÓN			
	PERDIDAS		GANANCIAS		PERDIDAS		GANANCIAS	
TOTAL	-141.50	-100.0%	52.60	100.0%	-19.90	-100.0%	32.70	100.0%
Fachadas opacas	-17.30	-12.2%	0.10	0.2%	-0.80	-4.0%	2.80	8.6%
Cubiertas	-24.90	-17.6%	0.00	0.0%	-1.40	-7.0%	1.90	5.8%
Suelos	-22.50	-15.9%	0.10	0.2%	-0.90	-4.5%	3.10	9.5%
Puentes Térmicos	-16.60	-11.7%	0.10	0.2%	-0.80	-4.0%	2.70	8.3%
Huecos radiación	0.00	0.0%	30.40	57.8%	0.00	0.0%	4.20	12.8%
Transmisión Huecos	-23.40	-16.5%	0.00	0.0%	-1.00	-5.0%	2.60	8.0%
Fuentes internas	0.00	0.0%	21.30	40.5%	0.00	0.0%	10.70	32.7%
Ventilación + Infiltración	-36.80	-26.0%	0.60	1.1%	-15.00	-75.4%	4.70	14.4%

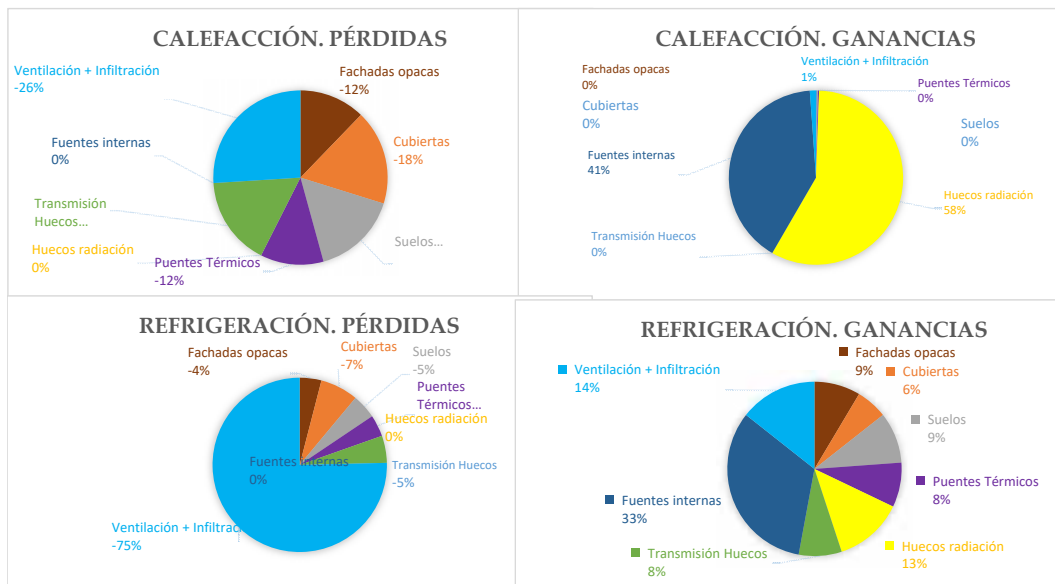


Figura 4.3.1. Datos de la demanda de calefacción y refrigeración, del edificio original 1, desglosada por componentes

Separamos pérdidas y ganancias dentro de cada periodo. En calefacción la demanda energética será igual a pérdidas menos ganancias. En refrigeración, demanda es igual a ganancia menos pérdida.

Descontando ventilación e infiltración, cuantificamos el porcentaje de demanda debida al resto de parámetros matéricos (salvo éste último) respecto al total.

	CALEFACCIÓN	REFRIGERACIÓN
GANANCIAS	58.4%	52.9%
PERDIDAS	-74.0%	-24.6%

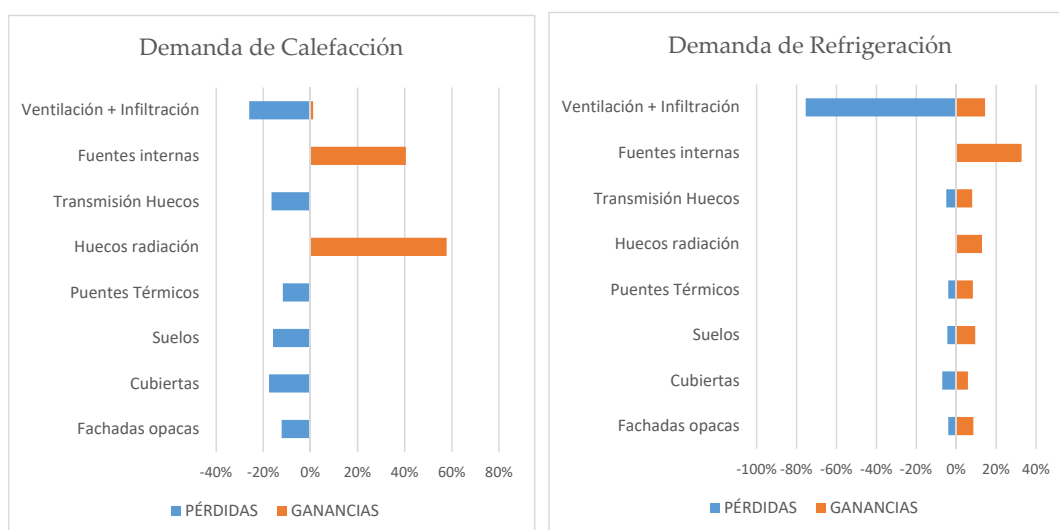


Figura 4.3.2. Datos de la demanda de calefacción y refrigeración, del edificio original 1, desglosada por componentes

El edificio se comporta muy bien en verano, tal como fue diseñado y construido. De hecho, el dato obtenido de demanda energética de refrigeración de 13,01 kWh/m².año, cumpliría las exigencias del DB HE1 para esta estación (fig. 4.3.2).

La demanda de calefacción, sin embargo, es muy alta si la comparamos con los requisitos normativos actuales.

Observamos que la influencia de la ventilación es mayor en el periodo de refrigeración, también en este edificio, sobre todo en pérdidas (fig. 4.3.1).

En calefacción, los parámetros matéricos representan alrededor del 74% de las pérdidas (más la parte de la infiltración que está incluida dentro de ventilación). Ésta representa el 26% de las pérdidas

La radiación solar a través de los huecos es el 58% de las ganancias energéticas en calefacción. El 41% de éstas son debidas a las fuentes internas. La ventilación tiene poca influencia en este periodo.

En refrigeración, las variables matéricas representan el 52,9% de las ganancias, donde las fuentes internas tienen mayor impacto (un 33%). La radiación solar, con los huecos de las terrazas muy protegidos, representa un 13%. La mayor parte de las pérdidas energéticas en refrigeración, que disminuyen la demanda energética, son consecuencia de ventilación e infiltración (75%).

4.3.2. Rangos sensibles uniparamétricos

Determinamos los rangos de valores más sensibles a la variación energética del edificio. Para ello realizamos el primer test uniparamétrico, consistente en variar cada vez un parámetro de modo independiente para ver como se comporta la demanda energética del edificio y conocer su sensibilidad a la variación.

El listado de resultados se exponen en el anejo A2.3. La serie 1 de gráficas ilustra los resultados obtenidos tras la variación de cada parámetro y está reproducida en el anejo A1.3.

Representamos los resultados obtenidos en la tabla 4.3.2, donde se expresan los valores máximos, mínimos y el rango de variación para cada uno de los test. Ordenamos los parámetros en función de los resultados, de máxima a mínima reducción demanda energética en valor absoluto alcanzada, en los tres periodos analizados, en las tablas 4.3.3.

TABLA 4.3.2. RESULTADOS DE DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m² año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO. VALORES MÍNIMOS, MÁXIMOS Y RANGO DEL MODELO 3

MODELO EDI01c		CALEFACCIÓN			REFRIGERACIÓN			ANUAL			
		MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	
P1	ORIENTACIÓN	-88.34	-91.09	-2.76	16.95	17.75	0.79	105.94	108.08	2.13	
P2	ALTITUD	-88.66	-89.03	-0.38	17.20	17.21	0.02	105.86	106.25	0.39	
P3	e CUBIERTA	-69.72	-89.01	-19.30	17.21	17.93	0.72	87.65	106.23	18.58	
P4	e SUELO	-72.91	-89.01	-16.10	17.16	17.23	0.07	90.08	106.23	16.14	
P5	e FACHADA	-79.06	-89.01	-9.95	16.41	17.21	0.80	95.47	106.23	10.75	
P6	U VIDRIO	-72.68	-89.01	-16.33	17.21	18.01	0.80	90.69	106.23	15.54	
P7	U MARCO	-86.05	-93.21	-7.16	16.99	17.37	0.38	103.42	110.20	6.78	
P8	a CUBIERTA	-76.73	-92.46	-15.73	15.58	25.30	9.72	102.03	108.04	6.01	
P9	a FACHADA	-85.59	-97.39	-11.80	13.87	18.79	4.92	104.38	111.26	6.88	
P10	a MARCO	-85.29	-89.96	-4.67	16.78	19.00	2.21	104.29	106.75	2.46	
P11	m FACHADA	-86.73	-89.58	-2.85	16.15	18.17	2.02	102.88	107.75	4.87	
P12	m FORJADO	-86.86	-92.01	-5.15	16.55	21.13	4.59	103.40	113.14	9.74	
P13	g VIDRIO	-89.01	-111.63	-22.62	11.36	17.21	5.85	106.23	122.99	16.76	
P14	fs VERANO	-89.01	-89.05	-0.03	11.35	17.21	5.86	100.40	106.23	5.82	
P16	INF. HUECOS	-87.18	-89.01	-1.83	17.05	17.21	0.16	104.23	106.23	2.00	
P17	PPTT	-74.31	-89.01	-14.70	14.91	17.21	2.30	89.22	106.23	17.00	
Σ	CONDUCCIÓN			6	-13.92		6	0.84		6	14.13
Σ	RADIACIÓN			5	-10.97		5	5.71		5	7.59
Σ	INERCI A TÉRMICA			2	-4.00		2	3.30		2	7.30
Σ	CONVECCIÓN			1	-1.83		1	0.16		1	2.00

TABLA 4.3.3.a. RESULTADOS DEMANDA ANUAL (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 3, EDIFICIO HEXAGONAL BASAMENTO

	MODELO EDI01	MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P3	e CUBIERTA	87.65	82.5%	106.23	100.0%	18.58	17.5%
P17	PPTT	89.22	84.0%	106.23	100.0%	17.00	16.0%
P4	e SUELO	90.08	84.8%	106.23	100.0%	16.14	15.2%
P6	U VIDRIO	90.69	85.4%	106.23	100.0%	15.54	14.6%
P5	e FACHADA	95.47	89.9%	106.23	100.0%	10.75	10.1%
P14	FS VERANO	100.40	94.5%	106.23	100.0%	5.82	5.5%
P8	a CUBIERTA	102.03	96.1%	108.04	101.7%	6.01	5.7%
P11	m FACHADA	102.88	96.8%	107.75	101.4%	4.87	4.6%
P12	m FORJADO	103.40	97.3%	113.14	106.5%	9.74	9.2%
P7	U MARCO	103.42	97.4%	110.20	103.7%	6.78	6.4%
P16	INF. HUECOS	104.23	98.1%	106.23	100.0%	2.00	1.9%
P10	a MARCO	104.29	98.2%	106.75	100.5%	2.46	2.3%
P9	a FACHADA	104.38	98.3%	111.26	104.7%	6.88	6.5%
P2	ALTITUD	105.86	99.7%	106.25	100.0%	0.39	0.4%
P1	ORIENTACIÓN	105.94	99.7%	108.08	101.7%	2.13	2.0%
P13	g VIDRIO	106.23	100.0%	122.99	115.8%	16.76	15.8%

CASO ORIGINAL	106.23
----------------------	---------------

TABLA 4.3.3.b. RESULTADOS DEMANDA CALEFACCIÓN (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 3, EDIFICIO HEXAGONAL BASAMENTO

	MODELO EDI01c	MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P3	e CUBIERTA	-69.72	78.3%	-89.01	100.0%	-19.2976	21.7%
P6	U VIDRIO	-72.68	81.7%	-89.01	100.0%	-16.3336	18.3%
P4	e SUELO	-72.91	81.9%	-89.01	100.0%	-16.1017	18.1%
P17	PPTT	-74.31	83.5%	-89.01	100.0%	-14.7003	16.5%
P8	a CUBIERTA	-76.73	86.2%	-92.46	103.9%	-15.7304	17.7%
P5	e FACHADA	-79.06	88.8%	-89.01	100.0%	-9.952	11.2%
P10	a MARCO	-85.29	95.8%	-89.96	101.1%	-4.66944	5.2%
P9	a FACHADA	-85.59	96.2%	-97.39	109.4%	-11.8002	13.3%
P7	U MARCO	-86.05	96.7%	-93.21	104.7%	-7.15621	8.0%
P11	m FACHADA	-86.73	97.4%	-89.58	100.6%	-2.85277	3.2%
P12	m FORJADO	-86.86	97.6%	-92.01	103.4%	-5.15127	5.8%
P16	INF. HUECOS	-87.18	97.9%	-89.01	100.0%	-1.83343	2.1%
P1	ORIENTACIÓN	-88.34	99.2%	-91.09	102.3%	-2.75529	3.1%
P2	ALTITUD	-88.66	99.6%	-89.03	100.0%	-0.3758	0.4%
P13	g VIDRIO	-89.01	100.0%	-111.63	125.4%	-22.6177	25.4%
P14	FS VERANO	-89.01	100.0%	-89.05	100.0%	-0.03347	0.0%

CASO ORIGINAL	-89.01
----------------------	---------------

TABLA 4.3.3.c. RESULTADOS DEMANDA REFRIGERACIÓN (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO, ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 3, EDIFICIO HEXAGONAL BASAMENTO

MODELO EDI01c	MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P14 FS VERANO	11.35	66.0%	17.21	100.0%	5.86	34.0%
P13 g VIDRIO	11.36	66.0%	17.21	100.0%	5.85	34.0%
P9 a FACHADA	13.87	80.6%	18.79	109.1%	4.92	28.6%
P17 PPTT	14.91	86.6%	17.21	100.0%	2.30	13.4%
P8 a CUBIERTA	15.58	90.5%	25.30	147.0%	9.72	56.5%
P11 m FACHADA	16.15	93.8%	18.17	105.6%	2.02	11.7%
P5 e FACHADA	16.41	95.3%	17.21	100.0%	0.80	4.7%
P12 m FORJADO	16.55	96.1%	21.13	122.8%	4.59	26.7%
P10 a MARCO	16.78	97.5%	19.00	110.4%	2.21	12.9%
P1 ORIENTACIÓN	16.95	98.5%	17.75	103.1%	0.79	4.6%
P7 U MARCO	16.99	98.7%	17.37	100.9%	0.38	2.2%
P16 INF. HUECOS	17.05	99.0%	17.21	100.0%	0.16	1.0%
P4 e SUELO	17.16	99.7%	17.23	100.1%	0.07	0.4%
P2 ALTITUD	17.20	99.9%	17.21	100.0%	0.02	0.1%
P3 e CUBIERTA	17.21	100.0%	17.93	104.2%	0.72	4.2%
P6 U VIDRIO	17.21	100.0%	18.01	104.6%	0.80	4.6%

CASO ORIGINAL	17.21
----------------------	--------------

Nota: consideramos el caso original con un factor de sombra en todos los huecos (parámetro P14) igual a uno. Este hecho produce un aumento de la demanda del caso original respecto al edificio original y nos sirve para realizar los test uniparamétricos, partiendo de un valor fijo uno.

Los mínimos corresponden a la demanda energética más baja, obtenida variando el parámetro indicado (representado en porcentaje y en valor absoluto).

Comentamos los resultados:

PERIODO DE CALEFACCIÓN

Como sucede en los dos modelos anteriores, el edificio se muestra más sensible a la variación de los parámetros relacionados con la conducción. La adecuada selección de valores de estos parámetros provoca las mayores reducciones de demanda.

El espesor del aislamiento en cubierta, parámetro P3, es el que por si solo obtiene la demanda más baja. Podemos mejorar hasta un 21,7% trabajando únicamente con él.

La transmitancia térmica del vidrio -P6-, puede hacer descender la demanda de calefacción casi un veinte por ciento. El edificio se comporta de modo parecido con el espesor del aislamiento en suelos, con una posibilidad de mejora similar.

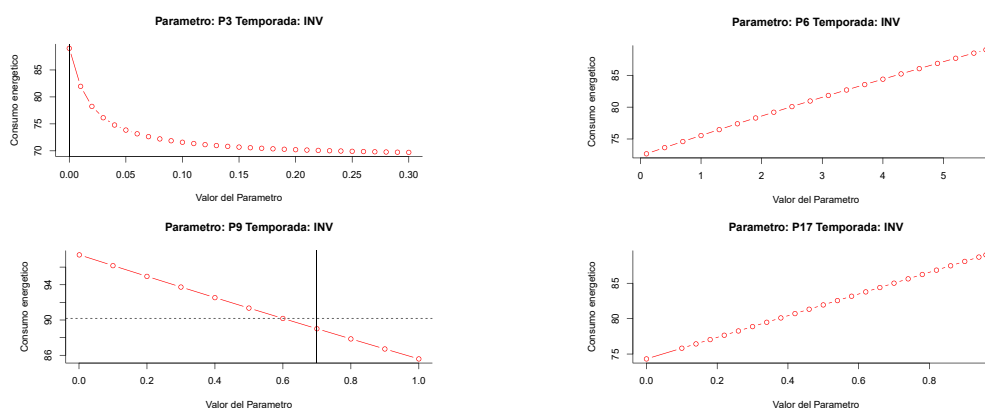


Figura 4.3.3. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 3. Demanda de calefacción

La reducción de la transmitancia en los puentes térmicos -P17- puede reducir la demanda en más de un quince por ciento.

Como quinto parámetro con mayores posibilidades de mejora se sitúa uno relacionado con la radiación solar: la absorptancia de la cubierta -P08-, que puede bajar la demanda en un 13,8% o subirla en un 3,9%. Hemos partido de una fachada de color verde oscuro, con absorptancia de 0,7, y una cubierta de color claro, con un valor de 0,2. Oscureciendo la cubierta podemos optimizar las ganancias solares a través de ésta. Los otros dos parámetros de absorptancia, el de los marcos -P10-, y el de la fachada -P09-, pueden mejorar el edificio entre un cuatro y un cinco por ciento. El color de la fachada puede, si lo llevamos a un color más claro, aumentar la demanda en un 9,4%.

El parámetro P05, espesor de aislamiento en fachada, solo es capaz de mejorar, por sí solo, la demanda en un 11,2%, valor parecido al P08.

El resto de los parámetros pueden llegar a mejorar el edificio hasta un 4%.

La orientación -P1- se presenta muy poco determinante como era de esperar, ya que el edificio tiene una planta hexagonal y, como comentamos en el modelo 2, es sensiblemente simétrico en varios ejes.

Respecto a los parámetros de inercia térmica, comentar que su modificación puede hacer subir o bajar la demanda en tres puntos porcentuales como máximo.

El parámetro P13, factor solar g de los vidrios, puede hacer aumentar la demanda energética en un 25%. Este hecho lo hace ser el parámetro al que el edificio se muestra más sensible, seguido de P3, P6, P4 y P17.

Reducir las infiltraciones por los huecos -P16-, que parten del valor máximo, no produce excesiva mejoría, pues a penas reduce el dos por ciento la demanda.

La altitud -P2- se presenta irrelevante: su variación no altera prácticamente la demanda energética en ningún sentido. El parámetro P14 solo es aplicable a los meses de verano por lo que no muestra ninguna influencia en este periodo.

PERIODO DE REFRIGERACIÓN

El edificio original, tal como fue proyectado y construido, cumple con los requisitos normativos para la demanda energética en verano (DB HE 2013), un resultado muy destacable, como ya hemos comentado en el modelo 2.

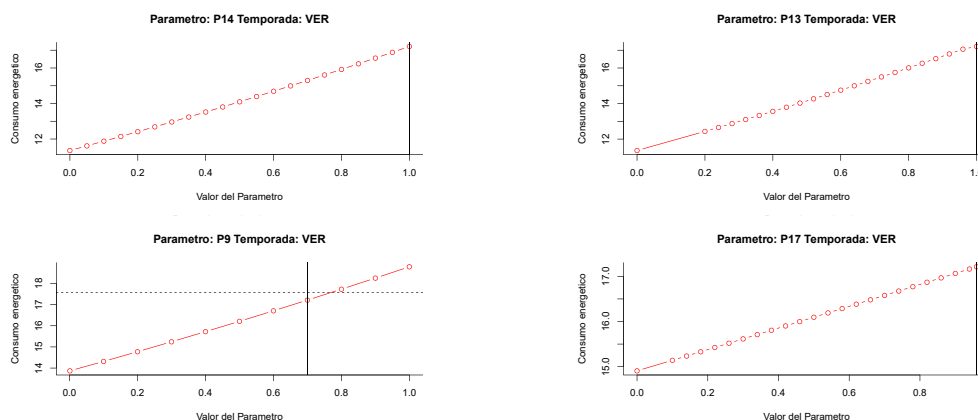


Figura 4.3.4. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 3. Demanda de refrigeración

Los dos parámetros que pueden mejorar más la demanda, por sí mismos, son las protecciones solares de los huecos -factor de sombra P14- y el factor solar del vidrio -P13-. Pueden reducir un treinta y cuatro por ciento demanda de refrigeración y llevarla a cumplimiento de las exigencias actuales o, dicho de otro modo, si no se protegen los huecos adecuadamente podemos quedar fuera de cumplimiento de normativa actual.

El tercer parámetro que obtiene los mejores resultados también está relacionado con la radiación solar. Es el parámetro P9, absorción de la fachada: diseñando un edificio con tratamiento superficial adecuado podemos reducir en un 19,4% la demanda energética de verano. La absorción de la cubierta -P8-, puede reducir también la demanda cerca del diez por ciento y la del marco -P10- aumentarla en un otro diez por ciento

El edificio se muestra sensible a la variación de los dos parámetros relacionados con la inercia térmica: el P11 -masa de la fachada opaca-, puede reducir la demanda en un 6,2% o aumentarla un 5,6%, según el caso. La masa de los forjados -P12-, puede también mejorar la demanda en un 3,9% o empeorarla en un 22,8% (en el caso de una fachada ligera, de unos 60 kg/m²).

Los parámetros relacionados con la conducción que obtienen mejores resultados son el P17 -puentes térmicos-, y el P5 -espesor del aislamiento de fachada-. La reducción de la demanda llega al 13,4% en el primero y al 4,7% en el segundo. Tienen mucho menos protagonismo que en calefacción, como viene ocurriendo en los casos anteriores.

La U del vidrio -P6- y el aislamiento en cubierta -P3-, tan influyentes en calefacción, no pueden mejorar prácticamente nada el edificio. Sin embargo puede aumentar la demanda hasta en un 4,6%.

Las infiltraciones por los huecos -P16- pueden bajar únicamente la demanda en un 1%. La altitud -P2- o el aislamiento en suelos se muestran irrelevante. La orientación, por el razonamiento anterior, influye poco.

PERIODO ANUAL

La demanda energética en periodo anual es la suma de las demandas de calefacción, ocho meses, y refrigeración, cuatro meses. Los resultados deben ser, por lo tanto, la combinación de ambos periodos.

Los parámetros que obtienen los mejores valores de demanda energética son prácticamente los mismos que en el periodo calefacción, con ligeras variaciones en la posición.

El espesor de aislamiento en cubierta consigue el máximo de reducción de demanda anual, con un 17,5%. Los puentes térmicos reducen hasta un 16%. Les sigue espesores de aislamiento térmico del suelo, U de los vidrios y espesor de aislamiento en fachada. El factor de sombra en verano -P14, actuando solo durante los cuatro meses del periodo estival, puede bajar la demanda anual en un 5,5%.

Los parámetros de absorción pierden peso al ver los datos en un ciclo anual. Teniendo en cuenta que se mueven en sentido contrario según sea el periodo calefacción o refrigeración, el agregado anual se compensa y altera poco el total.

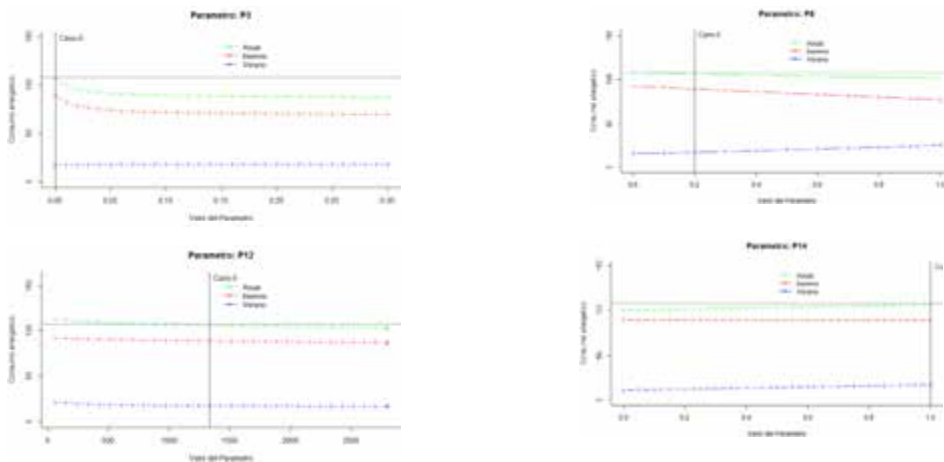


Figura 4.3.5. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 3. Demanda anual (verde) representando las demandas de calefacción (rojo) y refrigeración (azul)

El factor solar g del vidrio -P13-, que no consigue prácticamente mejorar la demanda, puede empeorarla hasta un 15,8% con valores de g bajos (vidrios muy poco transparentes). Al reducir g va mejorando el verano y a la vez, empeorando en invierno. La consideración de un invierno de ocho meses frente a un verano de cuatro inclina la balanza hacia el primero.

4.3.3. Resultados de los muestreos

Realizamos dos tipos de muestreos: uno sensible y otro uniforme, con diez mil casos cada uno. Seleccionamos el muestreo uniforme para analizar la influencia de los parámetros en la variabilidad de la demanda.

En primer lugar exponemos los resultados obtenidos en el muestreo uniforme, con los coeficientes de determinación R^2 de los parámetros, por separado (u) y ajustados por los demás (a) (fig. 4.3.6).

Seguidamente ordenamos los parámetros de mayor a menor R^2 ajustado, para considerar la acción combinada de todos. Se realiza para los tres periodos estudiados: anual, calefacción y refrigeración (tablas 4.3.4).

Para terminar, analizamos los parámetros singulares, observando los resultados representados gráficamente.

	Par	CALEu	REFRu	ANUu	CALEa	REFRa	ANUa
ORIENTACION	P1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
E CUB	P3	7.9	3.6	11.1	6.4	2.7	8.9
E SUELO	P4	8.9	0.1	9.7	7.2	0.1	8.0
E FACHADA	P5	5.7	0.1	6.2	6.1	0.1	6.5
U VIDRIO	P6	28.2	1.6	26.1	27.5	1.7	25.3
U MARCO	P7	7.0	0.7	6.1	7.0	0.7	6.2
α CUBIERTA	P8	0.6	5.7	0.1	0.6	5.8	0.1
α FACHADA	P9	0.5	2.1	0.1	0.4	2.6	0.1
a MARCO	P10	2.2	12.3	0.5	1.7	12.2	0.2
m FACHADA	P11	0.2	0.3	0.3	0.1	0.4	0.2
m FORJADO	P12	0.4	3.4	1.3	0.4	3.4	1.3
g VIDRIO	P13	21.2	20.0	13.0	19.5	18.7	11.9
FS VERANO	P14	0.0	29.3	1.9	0.0	29.4	1.8
INF. HUECOS	P16	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.3
PPTT	P17	15.4	5.3	20.8	15.3	6.0	21.0

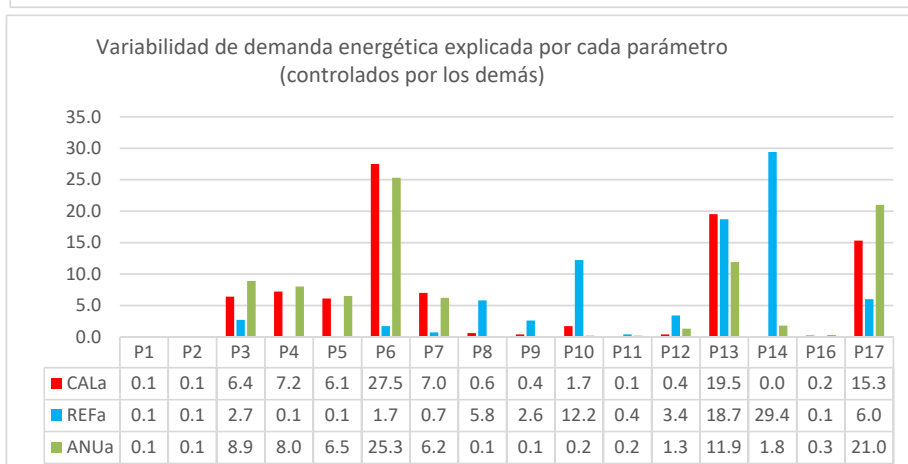
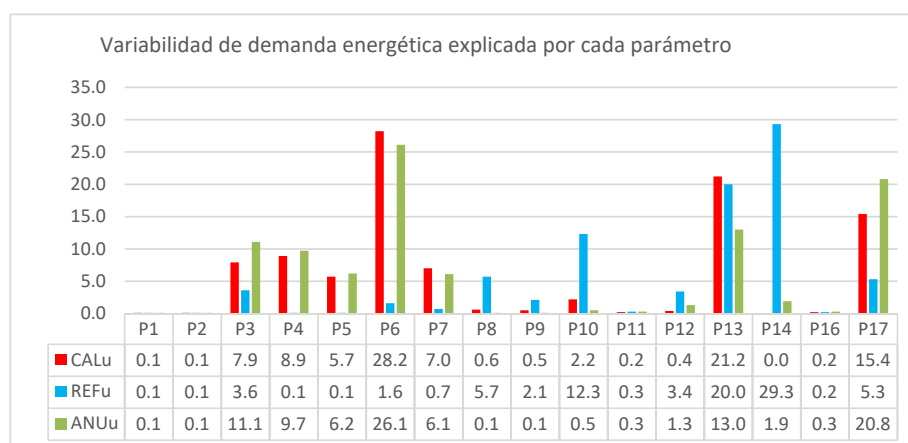


Figura 4.3.6. Valores de los coeficientes de determinación R2 (%) por separado (u) y ajustados por los demás (a). Casos basados en el Modelo 3. Muestreo uniforme con 10.000 casos

TABLA 4.3.4. VALORES DE LOS COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN R^2 (%) POR SEPARADO (u) Y AJUSTADOS POR LOS DEMÁS (a). MUESTREO UNIFORME CON 10.000 CASOS. PARÁMETROS ORDENADOS DE MAYOR A MENOR R^2 (a)

	Par	ANUA _u	ANUA _a
U VIDRIO	P6	26.1	25.3
PPTT	P17	20.8	21.0
g VIDRIO	P13	13.0	11.9
E CUB	P3	11.1	8.9
E SUELO	P4	9.7	8.0
E FACHADA	P5	6.2	6.5
U MARCO	P7	6.1	6.2
FS VERANO	P14	1.9	1.8
m FORJADO	P12	1.3	1.3
INF. HUECOS	P16	0.3	0.3
a MARCO	P10	0.5	0.2
m FACHADA	P11	0.3	0.2
ORIENTACION	P1	0.1	0.1
a CUBIERTA	P8	0.1	0.1
a FACHADA	P9	0.1	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1

	Par	CALE _u	CALE _a
U VIDRIO	P6	28.2	27.5
g VIDRIO	P13	21.2	19.5
PPTT	P17	15.4	15.3
E SUELO	P4	8.9	7.2
U MARCO	P7	7.0	7.0
E CUB	P3	7.9	6.4
E FACHADA	P5	5.7	6.1
a MARCO	P10	2.2	1.7
a CUBIERTA	P8	0.6	0.6
a FACHADA	P9	0.5	0.4
m FORJADO	P12	0.4	0.4
INF. HUECOS	P16	0.2	0.2
m FACHADA	P11	0.2	0.1
ORIENTACION	P1	0.1	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1
FS VERANO	P14	0.0	0.0

	Par	REFR _u	REFR _a
FS VERANO	P14	29.3	29.4
g VIDRIO	P13	20.0	18.7
a MARCO	P10	12.3	12.2
PPTT	P17	5.3	6.0
a CUBIERTA	P8	5.7	5.8
m FORJADO	P12	3.4	3.4
E CUB	P3	3.6	2.7
a FACHADA	P9	2.1	2.6
U VIDRIO	P6	1.6	1.7
U MARCO	P7	0.7	0.7
m FACHADA	P11	0.3	0.4
ORIENTACION	P1	0.1	0.1
E SUELO	P4	0.1	0.1
INF. HUECOS	P16	0.2	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1
E FACHADA	P5	0.1	0.1

PERIODO DE CALEFACCIÓN

El parámetro que obtiene un coeficiente de determinación mayor es el P6, transmitancia térmica U de los vidrios. Explica el 27,5% de la variabilidad de demanda de calefacción. La U del marco, que proporcionalmente tiene menos superficie, queda como el quinto parámetro más relevante, con una determinación del 7%.

El segundo más influyente también tiene que ver con los vidrios, en este caso con su factor solar g -P13-, que obtiene un R^2 (a) del 19,5%.

Los puentes térmicos -P17- se sitúan como el tercer parámetro más influyente, seguido de cuatro de los parámetros de aislamiento térmico de elementos opacos: el P4, aislamiento de suelo, P7, U del marco, P3, aislamiento de cubierta y P5, aislamiento de fachadas. Este grupo de cuatro obtiene un R^2 entre 6,1 y 7,2%.

El parámetro P5, espesor de aislamiento de fachada, es el menos influyente de todos en este caso.

Las tres variables de absorción consideradas obtienen un R^2 muy bajo. La del marco, P10, se acerca al dos por ciento y la de cubierta y fachada obtienen un 0,6 y 0,4 respectivamente. Aun resultando poco determinantes, recordamos que el edificio original si mostró cierta sensibilidad a su variación individual.

Confirmamos también que la orientación en este edificio, por configuración hexagonal, no es relevante.

P6. Transmitancia térmica U de los vidrios

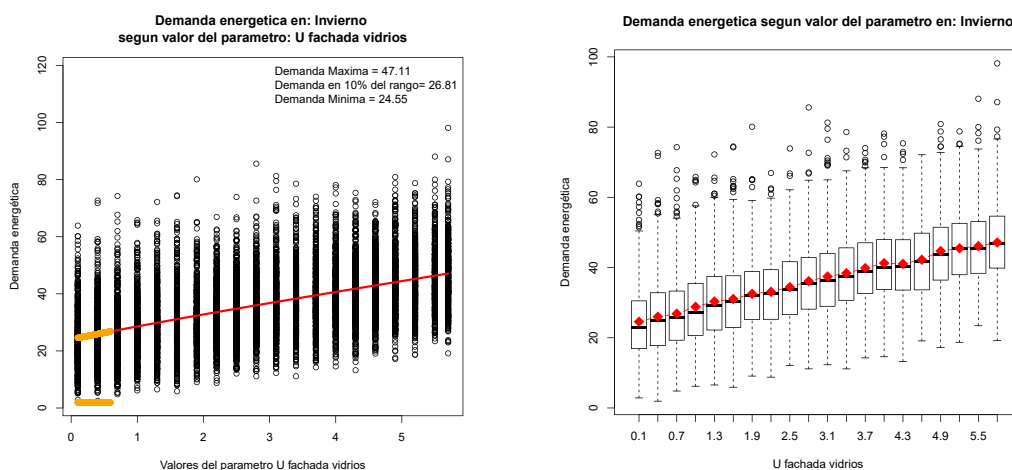


Figura 4.3.7. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función del parámetro P6. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

Los mejores casos están situados en la zona del valor mínimo del parámetro. Los vidrios con U próximas a 1 W/m².K no son difícil de conseguir, aunque los más utilizados están entre 2,5 y 3,5. El valor óptimo que minimiza la demanda estaría, pues, situado en torno a la unidad, como hemos visto en el modelo 2.

P13. Factor solar g del vidrio

Este parámetro se muestra determinante en un 19,5%. Los valores más altos de P13 son los que dan mejores resultados. P13=1 equivale a un g=0,85, un valor que podemos considerar máximo de captación solar a través de un vidrio monolítico y transparente. Es un resultado esperable que en invierno los vidrios muy transparentes llevan a mejores resultados de demanda energética.

Podemos bajar hasta un valor de P13 de 0,86 (g=0,73) sin que la demanda media se modifique más de un 10%, por lo que los valores óptimos se podrían situar en ese entorno pensando en el ciclo anual.

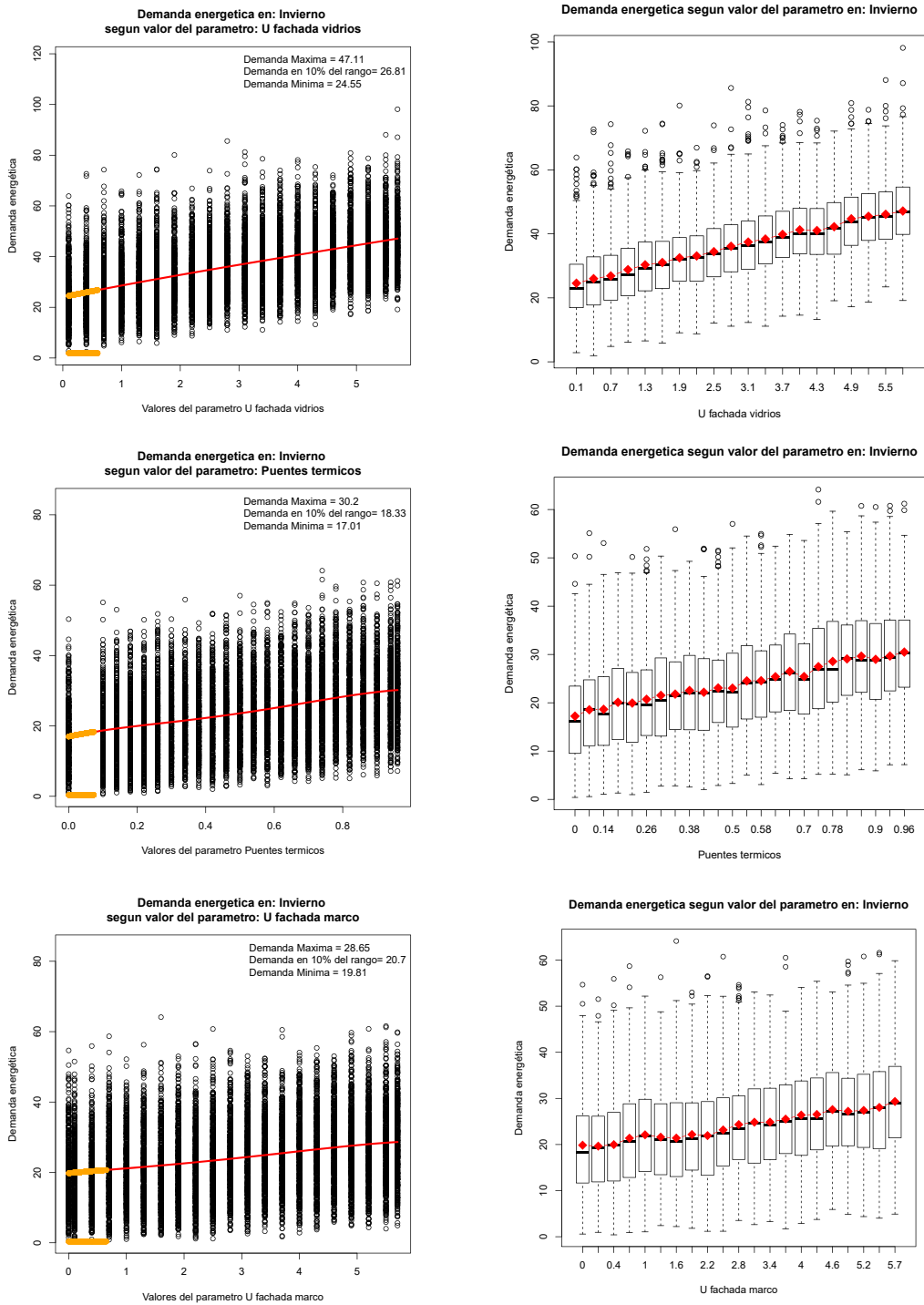


Figura 4.3.8. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los parámetros: arriba P13, centro P17, abajo P7. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

P17. Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

Los valores mínimos en la transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos son los que obtienen demandas más bajas en calefacción. Las medias obtenidas varían entre 27 y 44 kWh/m².año, y su R² ajustado queda en el 15,3%.

Es el primer parámetro relacionado con la parte opaca de la envolvente.

P7 Transmitancia térmica U de los marcos

Los valores bajos de U en los marcos de los huecos de fachada obtienen, de media, los valores más bajos de demanda en calefacción. El edificio original, con marcos de madera, está en una buena posición respecto a esta variable, con valores en torno a 2,2. Los marcos metálicos de aluminio, con rotura de puente térmico, pueden acercarse al valor 1 W/m².K.

P4 Espesor del aislamiento térmico en suelos

Los tres parámetros relacionados con el aislamiento térmico de elementos opacos (suelo, cubierta y fachada), quedan con R² entre seis y siete por ciento. Atendiendo a las gráficas, constatamos que son los primeros centímetros de la capa específica de aislamiento térmico los que se muestran muy determinantes, pero a partir de cierto espesor, las posibilidades de mejorar la demanda dependerán de otras variables.

Representamos las tres gráficas de estos parámetros (figuras 4.3.9) para observar el comportamiento. Vemos esta vez dos situaciones que nos ayudarán a plantear un valor óptimo de espesor de aislamiento: los valores a partir de los cuales no se espera una modificación de la demanda mayor a un diez por ciento, a la izquierda, y a un veinte, a la derecha.

Superar los seis centímetros del aislamiento considerado en suelos no produce una modificación de la demanda media de más de un veinte por ciento, y a partir de ocho y medio, en diez por ciento. Los valores óptimos estarán en ese rango. En la cubierta, este rango se sitúa entre los seis y los ocho centímetros.

En fachada el rango se amplía, pero se comporta prácticamente igual, quedando entre siete y dieciséis centímetros. Al ser menos influyente es necesario alcanzar valores mucho mayores para apreciar efectos positivos.

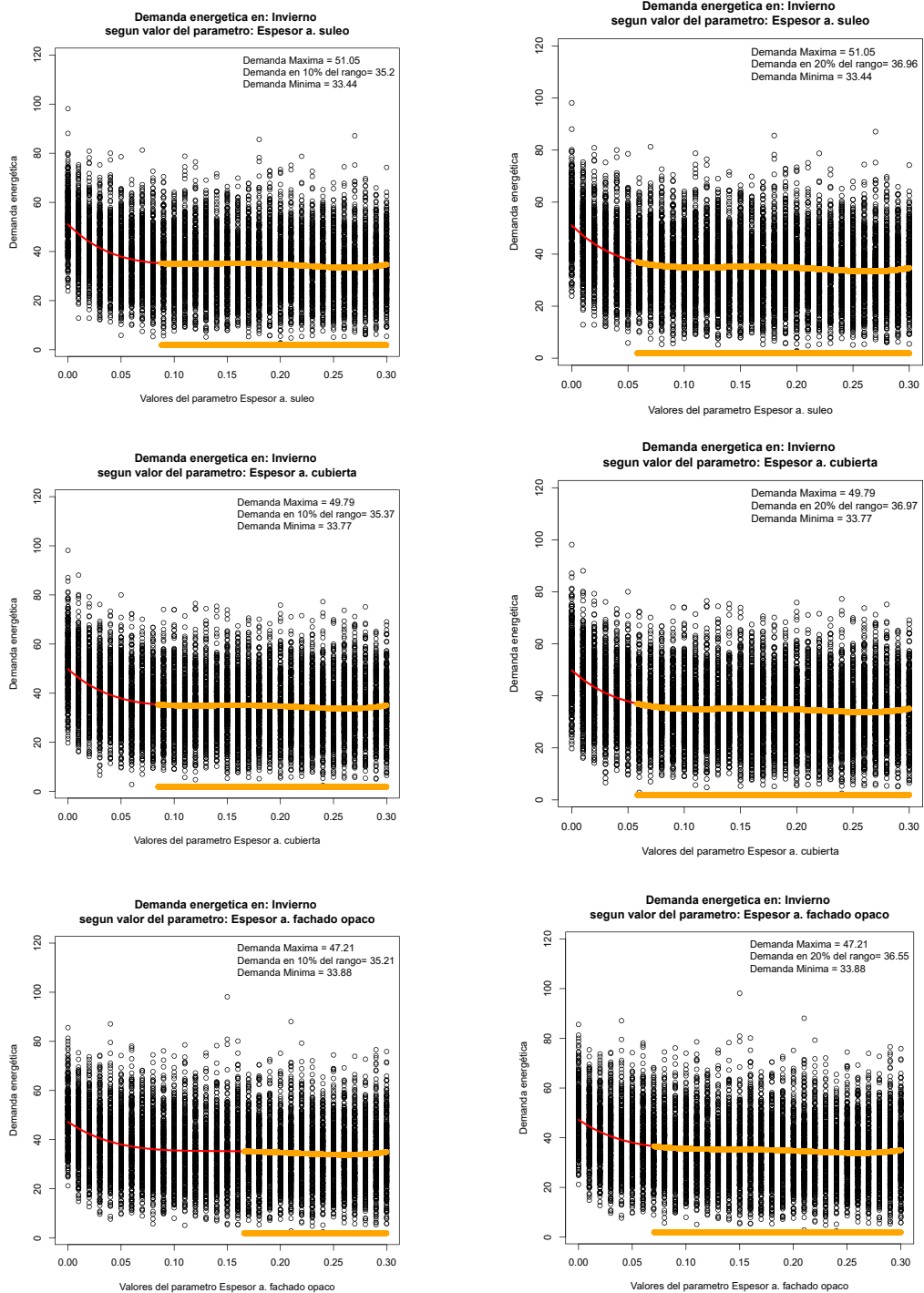


Figura 4.3.9. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los parámetros de aislamiento térmico de elementos opacos: arriba P4, centro P3, abajo P5. Valores a partir de los cuales no se modifica la demanda en un 10% (izquierda) o en un 20% (derecha)

P1 Orientación

El diseño hexagonal de la torre le hace presentarse de un modo muy parecido ante distintas orientaciones, dado que es un edificio con seis ejes de simetría (no exacta, dado que las viviendas no son exactamente iguales, pero si aproximada).

Representamos la orientación del edificio en la figura 4.3.10 y los resultados obtenidos en las gráficas de la figura 4.1.11.

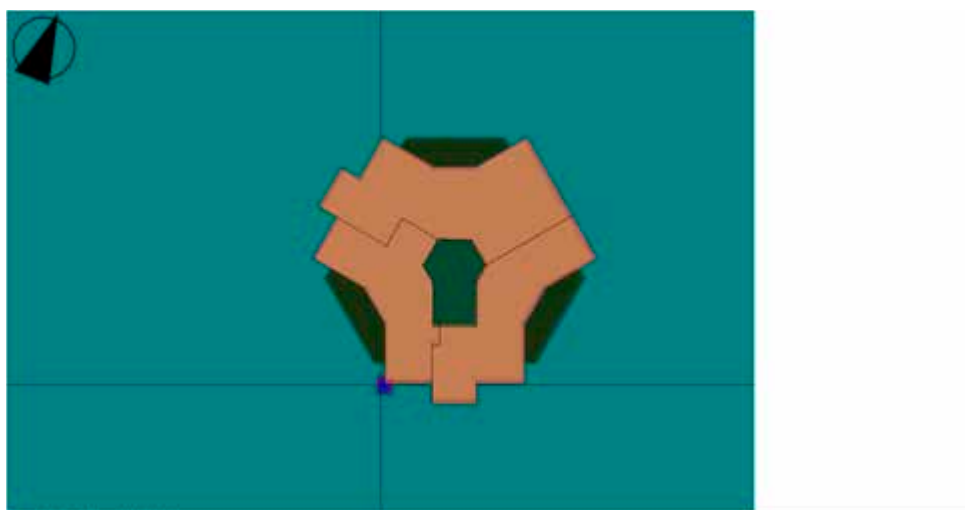


Figura 4.3.10. Orientación del edificio en función del parámetro P1. El valor 97º corresponde con el edificio original

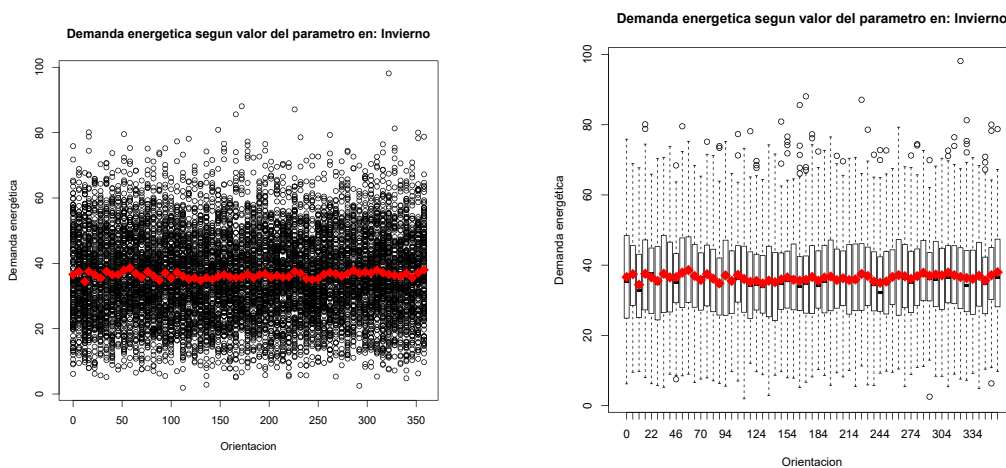


Figura 4.3.11. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función del parámetro P1. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

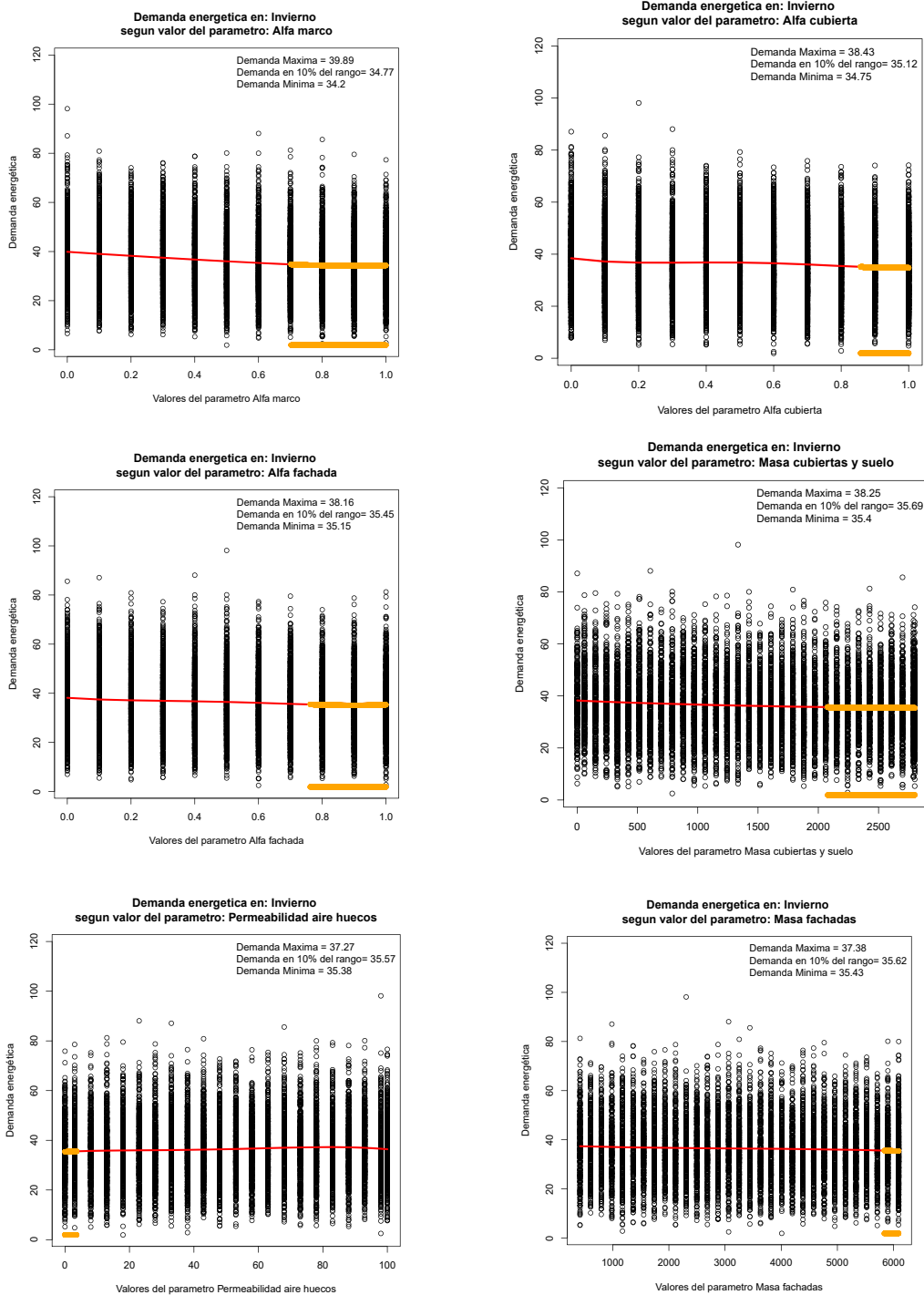


Figura 4.3.12. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los siguientes parámetros: P10 (arriba izda.), P8 (arriba dcha.), P9 (centro dcha.), P12 (centro izda.), P16 (abajo izda.), P11 (abajo dcha.)

La altitud no influye a penas en los resultados de demanda energética, al igual que hemos observado en los dos modelos anteriores.

La determinación en la variación de demanda de calefacción de los parámetros de inercia térmica resultan casi irrelevante en calefacción, aunque el edificio original mostró cierta sensibilidad en los test uniparamétrico, mejorando al aumentar la masa.

PERIODO REFRIGERACIÓN

En refrigeración, los parámetros relacionados con la radiación solar alcanzan los mayores coeficientes de determinación, como también observamos en los test uniparamétricos y en los casos basados en los dos primeros modelos. Son los más determinantes.

Las variables de aislamiento térmico de fachada, cubierta o suelo son poco o nada influyentes en verano. Ninguno obtiene un coeficiente de determinación superior el tres por ciento. En suelo y fachada la influencia es casi nula (no explica nada la variación de la demanda energética entre los 10.000 casos del muestreo uniforme), siendo el de cubierta el que presenta posibilidades de mejora en los primeros centímetros de espesor.

El más determinante es el factor de sombra en verano -P14-, que plantea una protección solar de los huecos específica en los meses de este periodo. Alcanza un R^2 del 29%. El factor solar de los vidrios -P13- se sitúa en segundo lugar, con un coeficiente de determinación R^2 de 18,7%. Estos dos parámetros han quedado en los tres modelos analizados en las dos primeras posiciones.

Las variables de absorción -color y condiciones superficiales de los elementos de la envolvente-, quedan entre las más influyentes de las seleccionadas. La de los marcos se sitúa en tercera posición, con un 12,2%, la de la cubierta se acerca al 6% y la de la fachada no llega al 3%: que la primera de todas sea la de los marcos es un hecho muy destacable.

El primer parámetro relacionado con el aislamiento térmico de la envolvente es el P17, puentes térmicos. Queda en cuarto lugar, con un 6%, alejado de los tres primeros. También se situó en esta posición en calefacción por lo que es un parámetro relevante todo el año.

La inercia térmica de los forjados -P12- muestra cierta influencia, con un R^2 del 3.4%, por detrás del color de la cubierta.

La altitud -P2- también es irrelevante en este periodo. Lo mismo ocurre con la infiltración de aire en los huecos -P16-: la estanqueidad al aire de las carpinterías no se muestra relevante en el comportamiento térmico estival.

Espesores de aislamiento térmico en fachada y suelo se muestran nada influyentes. Los dos quedan junto con la altitud con R^2 ajustado próximo a cero.

Pasemos a analizar los parámetros más representativos:

P14 Factor de sombra en verano

El R^2 de este parámetro se acerca al 30%. La regresión nos muestra una variación lineal, con disminución del resultado de demanda hacia el valor mínimo. Este resultado nos indica que una correcta protección solar de los huecos puede explicar gran parte de la variación de la demanda de refrigeración.

Es relevante que el edificio original contempla este hecho desde el diseño arquitectónico de Bonet Castellana, con los sistemas de lamas plegables que protegen los grandes huecos de las terrazas, clave para obtener la demanda estival por debajo del valor límite de 15 kWh/m².año que establece el DB HE.

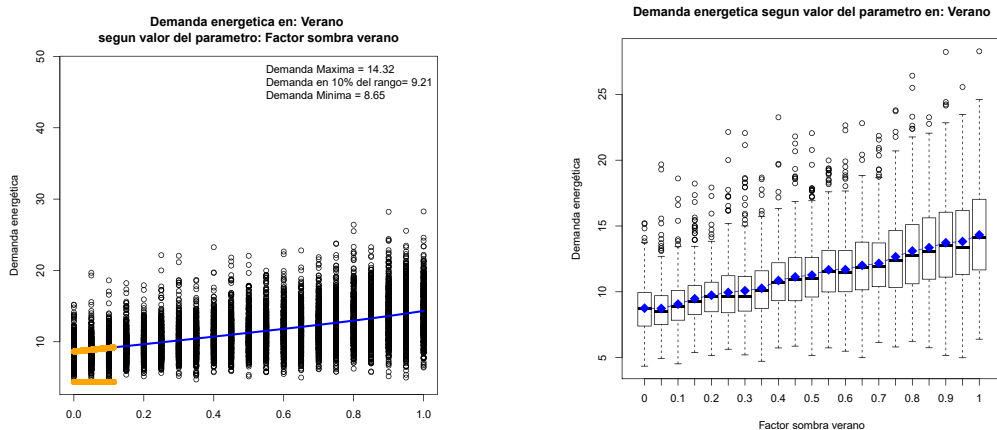


Figura 4.3.13. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función del parámetro P14. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%, derecha Boxplot.

Podemos entender que el valor óptimo queda en torno a 0,2, como argumentamos en los casos basados en los dos modelos anteriores.

P13. Factor solar g del vidrio

El comportamiento de este parámetro es lineal, con los mejores resultados en la zona de factor solar mínimo. Volvemos a constatar un comportamiento en sentido contrario en relación a lo que ocurre en invierno, es decir, valores altos de g favorecen el invierno y bajos en verano (fig. 4.3.14).

El valor de $g=0,3$ ($P13=0,35$) puede considerarse como valor óptimo en el periodo de calefacción, ya que es un mínimo actual en la tecnología de los vidrios., según hemos argumentado anteriormente.

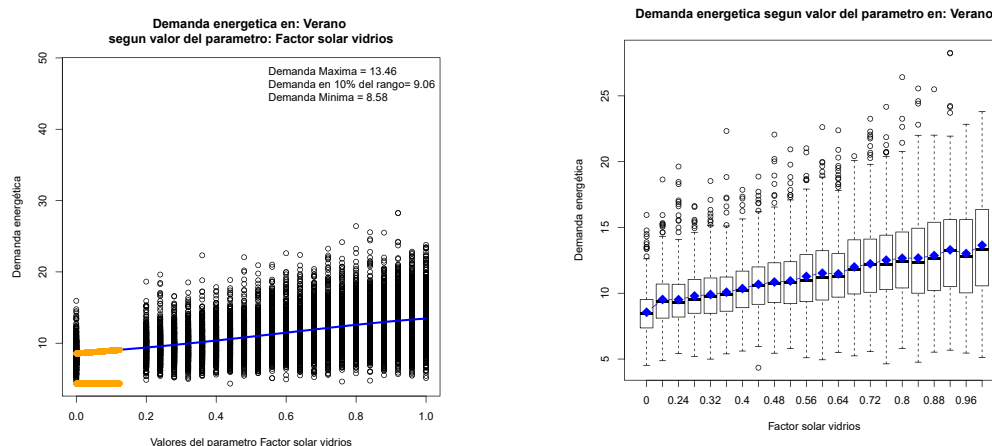


Figura 4.3.14. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función del parámetro P13. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%, derecha Boxplot.

P17 Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

La tendencia de las medias es mejorar ligeramente la demanda en calefacción para valores de P17 bajos, es decir, si eliminamos o disminuimos al máximo la transmitancia térmica lineal de éstos.

La mejora media se sitúa en unos 2,5 kWh/m².año que, aun siendo bajo, es relevante para el objetivo de edificios de demanda energética cero.

La variación de la demanda es lineal, con pequeña pendiente hacia los valores mínimos.

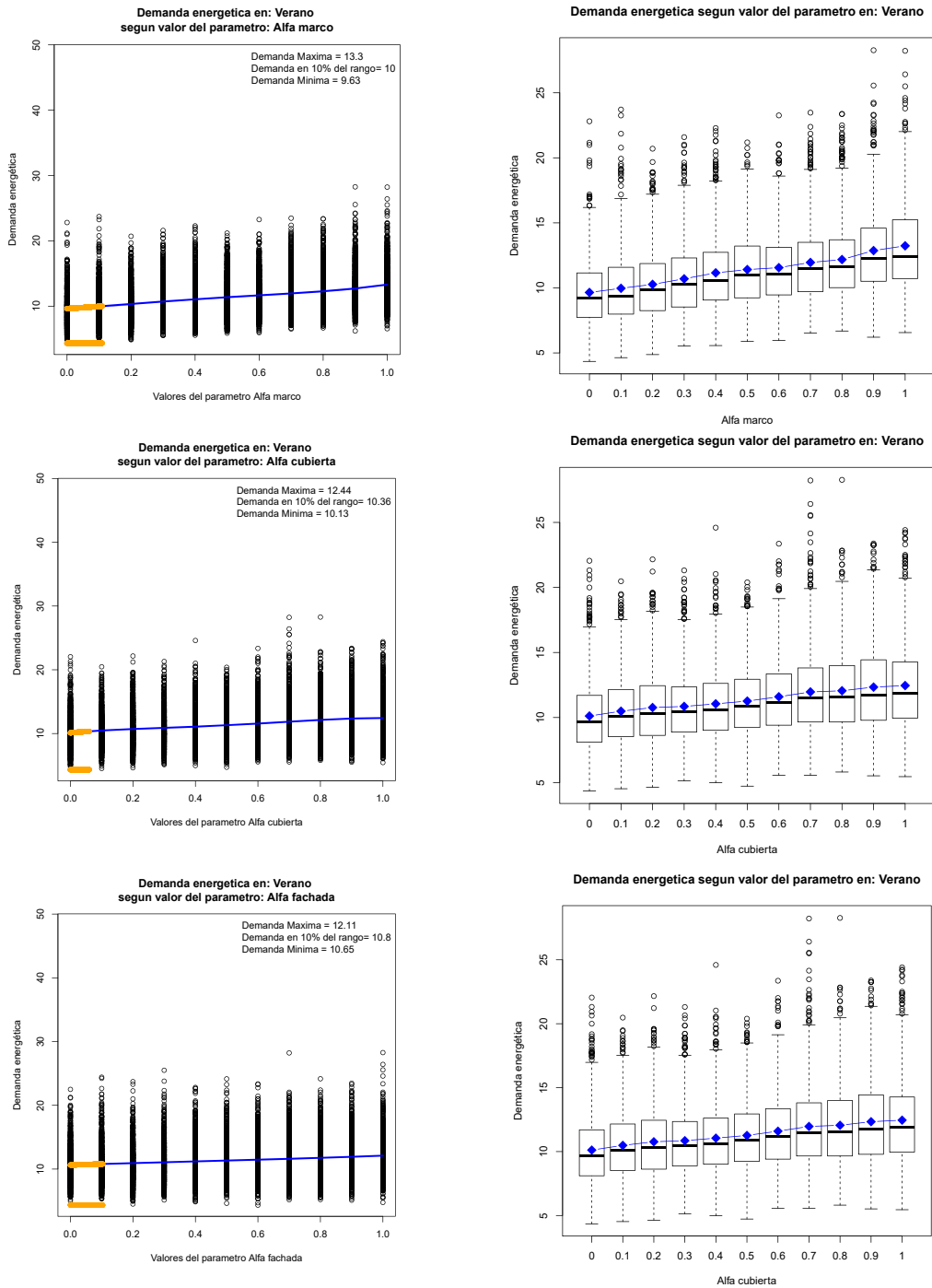


Figura 4.3.15. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los parámetros de absorción considerados. Arriba parámetro P10, centro P8, abajo P9.

P8, P9 y P10 Absortancia de la cubierta, la fachada y los marcos

La radiación solar incidente en las partes opacas de la envolvente también muestran influencia en los resultados obtenidos.

De los tres elementos evaluados, cubierta, fachada y carpinterías, es la última la que se muestra más determinante, como ocurrió en el modelo basado en la Torre Hexagonal. El color de los marcos de carpintería explica el 12,2% de variación de las demandas energéticas entre estos casos de estudio.

Si observamos el muestreo sensible, disponible en el anejo de resultados, vemos que éste parámetro P10 obtiene un R^2 ajustado de 7, por lo que parece que es un dato a considerar, a pesar de la pequeña proporción que representan en la envolvente térmica del edificio.

El resultado de R^2 de la absortancia de la cubierta se acerca al seis por ciento, la mitad de influyente que la de los marcos y prácticamente igual que el de los puentes térmicos. El menos influyente de los tres valores de absortancia es el de la fachada, con un 2,6%.

En la figura 4.3.15 representamos los resultados gráficamente. El rango de variación de los valores medios se sitúa alrededor de los 3 kWh/m²año.

Los valores de absortancia bajos -colores claros-, son los que mejoran la demanda energética en verano, como era de esperar. Por lo tanto, marcos muy reflectantes, de colores claros, son la mejor opción para el periodo de verano.

P3 Espesor del aislamiento térmico de la cubierta

Como hemos comentado, es el único parámetro relacionado con la transmisión térmica, que supera el dos por ciento de coeficiente de determinación, lo que lo sitúa como el séptimo más influyente. Es destacable que el aislamiento de la cubierta es menos relevante que su tratamiento superficial o absortancia. Aun así, es el único que muestra posibilidades de mejora en los primeros centímetros (fig. 4.3.16).

El resto de variables de espesores de aislamiento (suelo y fachada), resultan prácticamente irrelevantes. De hecho, el parámetro P5 -espesor de aislamiento en fachada- queda en último lugar, confirmando lo que venimos observando en los casos anteriores.

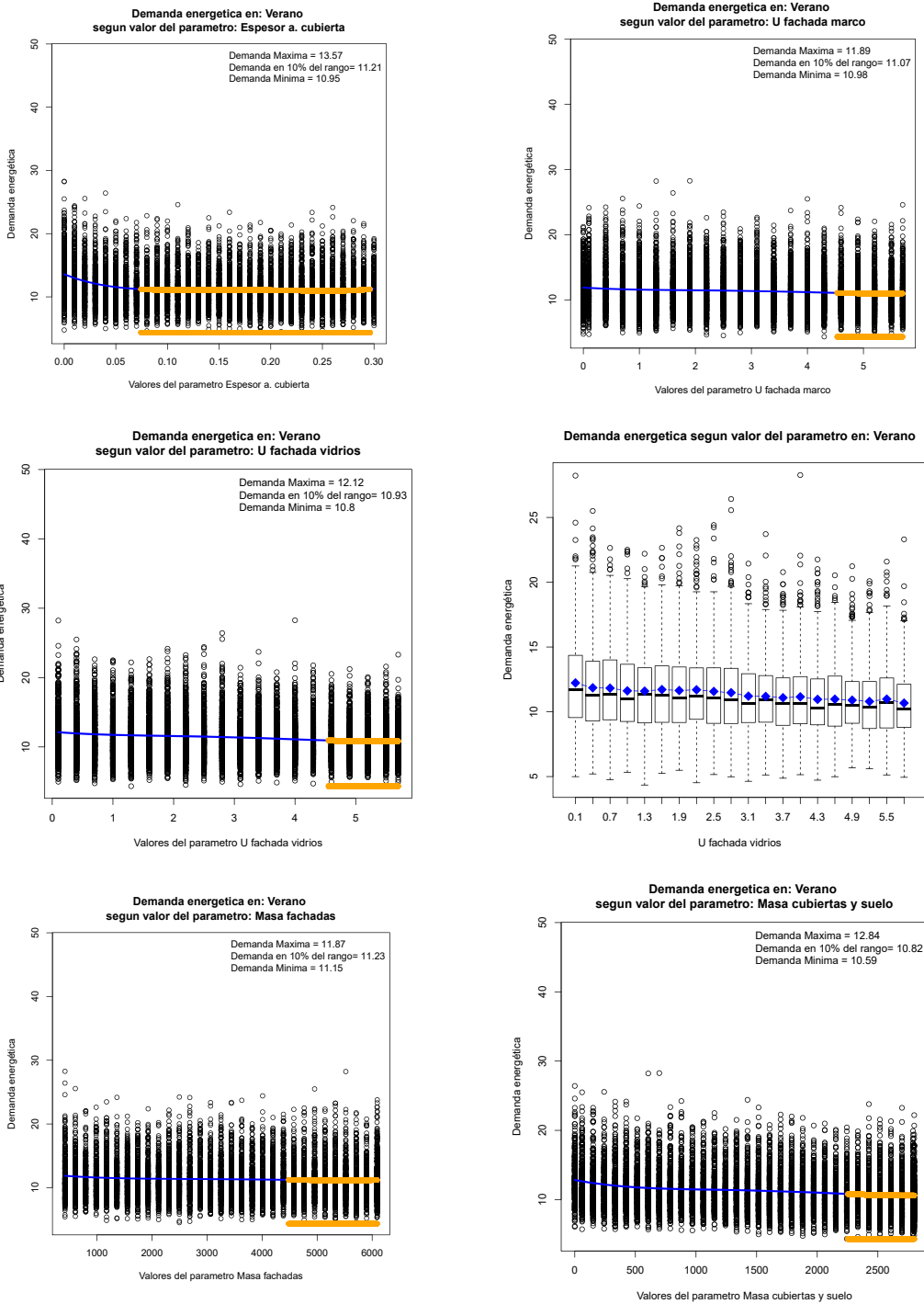


Figura 4.3.16. Representación gráfica de los resultados de demanda energética anual obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los siguientes parámetros: P3 (arriba izda.), P7 (arriba dcha.), P6 (centro), P11 (abajo izda.), P12 (abajo dcha.)

P6 y P7, transmitancia térmica de vidrio y marco

Los siguientes parámetro de conducción térmica, son la U de vidrio y marcos, Observando las gráficas (fig. 4.3.16) vemos que los mejores valores de U son los menos aislantes: carpinterías y vidrios poco aislantes benefician el comportamiento en verano: la causa probable es que facilitan la disipación de energía interior del edificio.

Si lo vemos de otro modo, aumentar la calidad en aislamiento térmico de la envolvente juega en contra, aunque ligeramente, en el periodo de verano.

P11 y P12, Masa del forjado y masa de la fachada

De las variables menos influyentes, la masa de la fachada es la que obtiene un R^2 mayor, con un 3,4%. Queda situada como la sexta variable más influyente en verano.

La inercia térmica de la fachada solo obtiene un 0,4%.

Los valores bajos de masa de forjados aumentan ligeramente la demanda energética del edificio. Igual ocurre con la masa de la fachada, pero en menor medida.

PERIODO ANUAL

Los resultados de los R^2 son muy parecidos a los obtenidos para el periodo de calefacción, con diferencias en cuanto al porcentaje y el orden.

Los parámetros relacionados con la conducción térmica son los más influyentes: U del vidrio -P6- y puentes térmicos -P17- son los dos parámetros más determinantes en la variabilidad de la demanda en un ciclo anual, con R^2 superiores al veinte por ciento. Es destacable que el valor óptimo P6 en calefacción puede empeorar ligeramente la refrigeración.

El tercer parámetro que mejor explica la variabilidad de la demanda energética anual es el factor solar g del vidrio -P6-. Es el primero de los relacionados con la radiación solar y roza el doce por ciento de determinación.

Los tres parámetros relacionados con el aislamiento térmico de la envolvente opaca (cubierta, suelo y fachada) obtienen valores entre el 6,5 y el 9%.

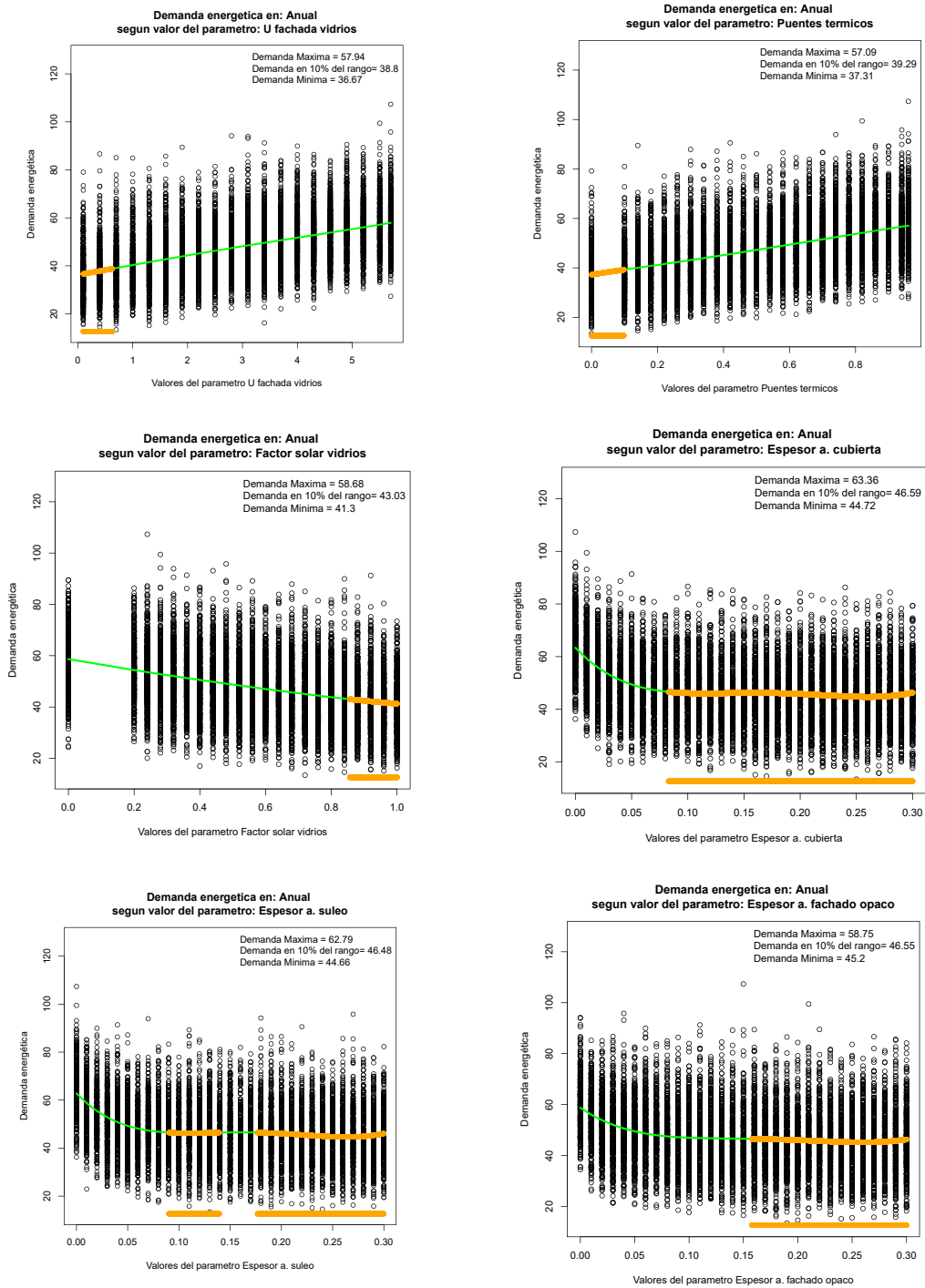


Figura 4.3.17. Representación gráfica de los resultados de demanda energética anual obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los siguientes parámetros: P6 (arriba izda.), P17 (arriba dcha.), P13 (centro izda.), P3 (centro dcha), P4 (abajo izda.), P5 (abajo dcha.)

Constatamos, por lo tanto, que los espesores de aislamiento térmico de la envolvente no son las variables más influyentes en un edificio, aunque sí están en el grupo de las más determinantes.

La transmitancia térmica del marco queda en séptimo lugar, con un 6,2%, considerando que es el parámetro con menor proporción en el total de la envolvente.

La protección solar de los huecos -P14-, tan importante en verano, pierde peso al analizar el ciclo anual completo y lidera el grupo de los menos relevantes, con cerca del 2%. Reduce únicamente la demanda de refrigeración y no se aplica en calefacción, por lo que no altera la demanda de ocho de los doce meses del año.

El único parámetro de inercia térmica que pasa del 1% es la masa de los forjados -P12.

El resto de quedan con escasa o nula influencia.

Todas las absortancias de los elementos de la envolvente pierden el poco protagonismo que mostraron en verano. Dado que influyen en sentido contrario en verano e invierno (colores claros mejoran el verano y empeoran el invierno, y viceversa), su consideración anual se anula. Parece que deberá elegirse este parámetro para corregir la estación que peores datos iniciales arroje o en la que vaya a utilizarse con mayor intensidad el edificio.

Los casos estudiados son viviendas de segunda residencia para el verano, por lo que la elección de absortancias bajas beneficiará al edificio.



4.4. RESULTADOS CASOS BASADOS EN EL MODELO 4 EDIFICIO ESCALONADO “BABILONIA”

Aplicamos la metodología propuesta al cuarto edificio, seleccionado como modelo para generar los casos de estudio.

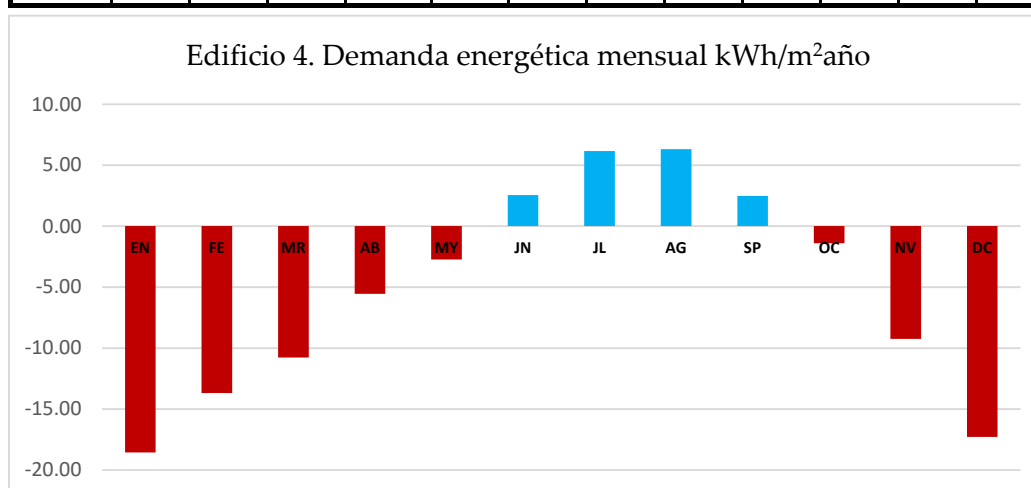
4.4.1. Resultados del edificio original

Cuantificamos la demanda energética del edificio original con la aplicación informática de simulación energética de edificios seleccionada.

Con los datos obtenidos de la investigación, procedemos a modelizar el edificio en el software de simulación obteniendo los siguientes resultados:

TABLA 4.4.1. RESULTADOS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO 4

RESULTADOS A NIVEL EDIFICIO														
(kWh/m2 del edificio)														
Anual	96.73		Cal.			-79.26			Refr.				17.47	
	EN	FE	MR	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DC		
	-18.56	-13.68	-10.78	-5.56	-2.74	2.54	6.15	6.31	2.47	-1.40	-9.25	-17.29		



Analizamos pormenorizadamente los datos de demanda energética desglosándola por componentes, en calefacción y refrigeración. Los representamos en la siguiente figura:

	CALEFACCIÓN				REFRIGERACIÓN			
	PERDIDAS		GANANCIAS		PERDIDAS		GANANCIAS	
TOTAL	-132.00	-100.0%	53.10	100.0%	-23.70	-100.0%	41.00	100.0%
Fachadas opacas	-15.80	-12.0%	0.00	0.0%	-1.50	-6.3%	1.30	3.2%
Cubiertas	-13.10	-9.9%	0.00	0.0%	-0.90	-3.8%	2.10	5.1%
Suelos	-24.30	-18.4%	0.00	0.0%	-1.90	-8.0%	2.10	5.1%
Puentes Térmicos	-22.40	-17.0%	0.10	0.2%	-1.80	-7.6%	2.80	6.8%
Huecos radiación	0.00	0.0%	30.50	57.4%	0.00	0.0%	15.80	38.5%
Transmisión Huecos	-25.90	-19.6%	0.00	0.0%	-1.90	-8.0%	2.50	6.1%
Fuentes internas	0.00	0.0%	22.10	41.6%	0.00	0.0%	11.10	27.1%
Ventilación + Infiltración	-30.50	-23.1%	0.40	0.8%	-15.70	-66.2%	3.30	8.0%

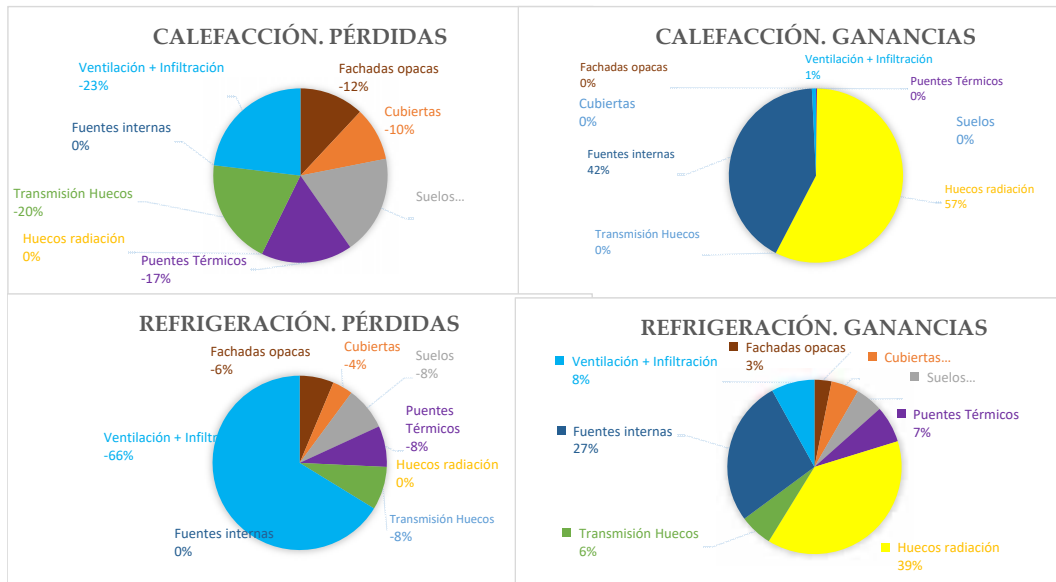


Figura 4.4.1. Datos de la demanda de calefacción y refrigeración, del edificio original 1, desglosada por componentes.

Separamos pérdidas y ganancias dentro de cada periodo. En calefacción la demanda energética será igual a pérdidas menos ganancias. En refrigeración, demanda es igual a ganancia menos pérdida.

Descontando ventilación e infiltración, cuantificamos el porcentaje de demanda debida al resto de parámetros matéricos respecto al total.

	CALEFACCIÓN	REFRIGERACIÓN
GANANCIAS	57.6%	64.9%
PERDIDAS	-76.9%	-33.8%

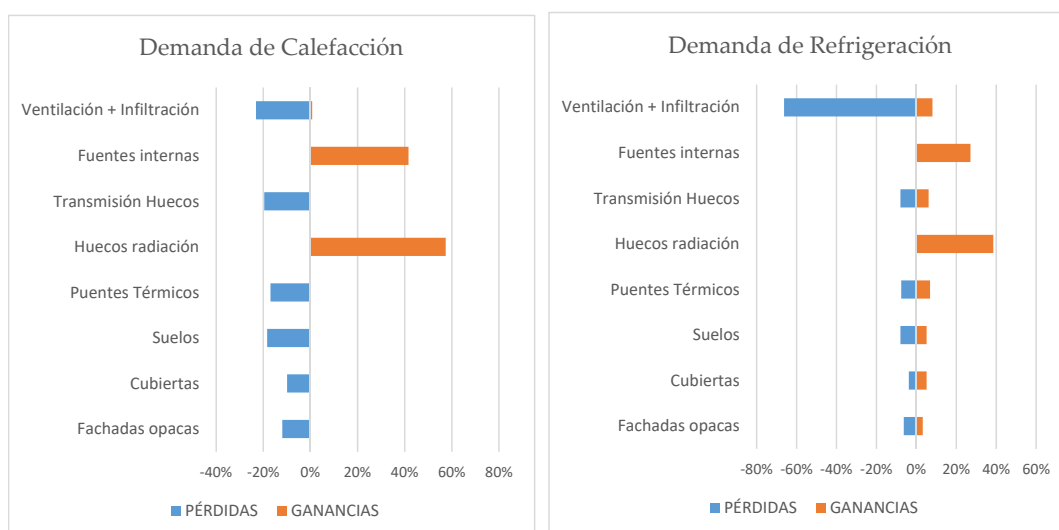


Figura 4.4.2. Datos de la demanda de calefacción y refrigeración, del edificio original 1, desglosada por componentes

El edificio se comporta muy bien en verano, tal como fue diseñado y construido. El resultado de demanda de refrigeración se acerca al cumplimiento de las exigencias actuales.

La demanda de calefacción, sin embargo es mucho más alta, como cabe esperar para un edificio de su época muy poco aislado térmicamente.

Observamos en la figura 4.4.1 que la influencia de la ventilación es mayor en el periodo de refrigeración, también en este edificio, sobre todo en pérdidas.

En calefacción, los parámetros matéricos representan alrededor del 57,6% de las pérdidas -más la parte de la infiltración que está incluida dentro de ventilación. Ésta representa el 23,1% de las pérdidas.

La radiación solar a través de los huecos es el 57,4% de las ganancias energéticas de invierno. El 41,6% de éstas es debido a las fuentes internas. La ventilación tiene poca influencia.

En refrigeración, las variables matéricas representan el 64,9% de las ganancias, donde las fuentes internas tienen mayor impacto (un 27,1%) y la radiación solar el 38,5%. La mayor parte de las pérdidas energéticas en refrigeración, que disminuyen la demanda energética, son consecuencia de ventilación e infiltración (66,2%).

4.4.2. Rangos sensibles uniparamétricos

Determinamos los rangos de valores más sensibles a la variación energética del edificio. Para ello realizamos el primer test uniparamétrico, consistente en variar cada vez un parámetro de modo independiente para ver como se comporta la demanda energética del edificio y conocer su sensibilidad a la variación paramétrica.

El listado de resultados del cálculo uniparamétrico se exponen en el anexo A2.4.1. La serie 1 de gráficas ilustra los resultados obtenidos tras la variación de cada parámetro y está reproducida en el Anexo A1.4.

Representamos los resultados obtenidos en la tabla 4.4.2, donde se expresan los valores máximos, mínimos y el rango de variación para cada uno de los test. Ordenamos los parámetros en función de los resultados, de máxima a mínima reducción demanda energética en valor absoluto alcanzada, en los tres periodos analizados, en las tablas 4.4.3.

TABLA 4.4.2. RESULTADOS DE DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m² año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO. VALORES MÍNIMOS, MÁXIMOS Y RANGO DEL MODELO 4

MODELO EDI04		CALEFACCIÓN			REFRIGERACIÓN			ANUAL		
		MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO	MÍNIMO	MÁXIMO	RANGO
P1	ORIENTACIÓN	-76.53	-84.01	-7.48	15.05	17.55	2.49	92.46	99.47	7.01
P2	ALTITUD	-78.97	-79.28	-0.31	17.47	17.47	0.01	96.44	96.75	0.31
P3	e CUBIERTA	-67.16	-79.26	-12.10	16.73	17.47	0.75	83.96	96.73	12.77
P4	e SUELO	-65.44	-79.26	-13.82	17.47	18.04	0.57	83.47	96.73	13.26
P5	e FACHADA	-69.53	-79.26	-9.73	17.47	18.01	0.54	87.54	96.73	9.19
P6	U VIDRIO	-61.93	-79.26	-17.33	17.47	18.80	1.33	80.73	96.73	16.00
P7	U MARCO	-76.33	-83.41	-7.08	17.19	17.67	0.47	94.00	100.60	6.61
P8	α CUBIERTA	-75.21	-83.60	-8.39	14.90	20.32	5.42	95.53	98.50	2.97
P9	α FACHADA	-73.09	-80.86	-7.77	16.66	20.99	4.33	94.08	97.52	3.44
P10	α MARCO	-76.61	-79.94	-3.33	17.02	19.34	2.32	95.95	96.96	1.00
P11	m FACHADA	-77.01	-79.80	-2.79	16.55	18.27	1.71	93.56	98.07	4.51
P12	m FORJADO	-77.10	-82.12	-5.01	16.79	21.01	4.22	93.90	103.13	9.23
P13	g VIDRIO	-79.26	-100.90	-21.64	10.09	17.47	7.38	96.73	110.99	14.26
P14	fs VERANO	-79.26	-79.30	-0.04	10.08	17.47	7.39	89.39	96.73	7.35
P16	INF. HUECOS	-76.27	-79.26	-2.99	17.20	17.47	0.27	93.48	96.73	3.26
P17	PPTT	-59.97	-79.26	-19.29	14.91	17.47	2.57	74.87	96.73	21.86
Σ	CONDUCCIÓN		6	-13.23		6	1.04		6	13.28
Σ	RADIACIÓN		5	-8.23		5	5.37		5	5.80
Σ	INERCI A TÉRMICA		2	-3.90		2	2.97		2	6.87
Σ	CONVECCIÓN		1	-2.99		1	0.27		1	3.26

TABLA 4.4.3.a. RESULTADOS DEMANDA ANUAL (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 4, EDIFICIO ESCALONADO “BABILONIA”

	MODELO EDI04	MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P17	PPTT	74.87	77.4%	96.73	100.0%	21.86	22.6%
P6	U VIDRIO	80.73	83.5%	96.73	100.0%	16.00	16.5%
P4	e SUELO	83.47	86.3%	96.73	100.0%	13.26	13.7%
P3	e CUBIERTA	83.96	86.8%	96.73	100.0%	12.77	13.2%
P5	e FACHADA	87.54	90.5%	96.73	100.0%	9.19	9.5%
P14	FS VERANO	89.39	92.4%	96.73	100.0%	7.35	7.6%
P1	ORIENTACIÓN	92.46	95.6%	99.47	102.8%	7.01	7.2%
P16	INF. HUECOS	93.48	96.6%	96.73	100.0%	3.26	3.4%
P11	m FACHADA	93.56	96.7%	98.07	101.4%	4.51	4.7%
P12	m FORJADO	93.90	97.1%	103.13	106.6%	9.23	9.5%
P7	U MARCO	94.00	97.2%	100.60	104.0%	6.61	6.8%
P9	a FACHADA	94.08	97.3%	97.52	100.8%	3.44	3.6%
P8	a CUBIERTA	95.53	98.8%	98.50	101.8%	2.97	3.1%
P10	a MARCO	95.95	99.2%	96.96	100.2%	1.00	1.0%
P2	ALTITUD	96.44	99.7%	96.75	100.0%	0.31	0.3%
P13	g VIDRIO	96.73	100.0%	110.99	114.7%	14.26	14.7%

CASO ORIGINAL

96.73

TABLA 4.4.3.b. RESULTADOS DEMANDA CALEFACCIÓN (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 4, EDIFICIO ESCALONADO “BABILONIA”

		MODELO 4. EDIFICIO BABILONIA					
MODELO EDI04		MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P17	PPTT	-59.97	75.7%	-79.26	100.0%	-19.29	24.3%
P6	U VIDRIO	-61.93	78.1%	-79.26	100.0%	-17.33	21.9%
P4	e SUELO	-65.44	82.6%	-79.26	100.0%	-13.82	17.4%
P3	e CUBIERTA	-67.16	84.7%	-79.26	100.0%	-12.10	15.3%
P5	e FACHADA	-69.53	87.7%	-79.26	100.0%	-9.73	12.3%
P9	a FACHADA	-73.09	92.2%	-80.86	102.0%	-7.77	9.8%
P8	a CUBIERTA	-75.21	94.9%	-83.60	105.5%	-8.39	10.6%
P16	INF. HUECOS	-76.27	96.2%	-79.26	100.0%	-2.99	3.8%
P7	U MARCO	-76.33	96.3%	-83.41	105.2%	-7.08	8.9%
P1	ORIENTACIÓN	-76.53	96.6%	-84.01	106.0%	-7.48	9.4%
P10	a MARCO	-76.61	96.7%	-79.94	100.9%	-3.33	4.2%
P11	m FACHADA	-77.01	97.2%	-79.80	100.7%	-2.79	3.5%
P12	m FORJADO	-77.10	97.3%	-82.12	103.6%	-5.01	6.3%
P2	ALTITUD	-78.97	99.6%	-79.28	100.0%	-0.31	0.4%
P13	g VIDRIO	-79.26	100.0%	-100.90	127.3%	-21.64	27.3%
P14	FS VERANO	-79.26	100.0%	-79.30	100.1%	-0.04	0.1%

CASO ORIGINAL

-79.26

TABLA 4.4.3.c. RESULTADOS DEMANDA REFRIGERACIÓN (kWh/m²año) DEL TEST UNIPARAMÉTRICO, ORDENADOS SEGÚN LOS MÍNIMOS OBTENIDOS. RELACIÓN (%) RESPECTO AL EDIFICIO ORIGINAL. MODELO 4, EDIFICIO ESCALONADO "BABILONIA"

MODELO 4. EDIFICIO BABILONIA						
MODELO EDI04	MÍNIMO		MÁXIMO		RANGO	% Variación
P14 FS VERANO	10.08	57.7%	17.47	100.0%	7.39	42.3%
P13 g VIDRIO	10.09	57.7%	17.47	100.0%	7.38	42.3%
P8 a CUBIERTA	14.90	85.3%	20.32	116.3%	5.42	31.0%
P17 PPTT	14.91	85.3%	17.47	100.0%	2.57	14.7%
P1 ORIENTACIÓN	15.05	86.1%	17.55	100.4%	2.49	14.3%
P11 m FACHADA	16.55	94.7%	18.27	104.6%	1.71	9.8%
P9 a FACHADA	16.66	95.3%	20.99	120.1%	4.33	24.8%
P3 e CUBIERTA	16.73	95.7%	17.47	100.0%	0.75	4.3%
P12 m FORJADO	16.79	96.1%	21.01	120.3%	4.22	24.2%
P10 a MARCO	17.02	97.4%	19.34	110.7%	2.32	13.3%
P7 U MARCO	17.19	98.4%	17.67	101.1%	0.47	2.7%
P16 INF. HUECOS	17.20	98.5%	17.47	100.0%	0.27	1.5%
P2 ALTITUD	17.47	100.0%	17.47	100.0%	0.01	0.0%
P5 e FACHADA	17.47	100.0%	18.01	103.1%	0.54	3.1%
P4 e SUELO	17.47	100.0%	18.04	103.3%	0.57	3.3%
P6 U VIDRIO	17.47	100.0%	18.80	107.6%	1.33	7.6%
CASO ORIGINAL			17.47			

Los mínimos corresponden a la demanda energética más baja, obtenida variando el parámetro indicado (representado en porcentaje y en valor absoluto).

Comentamos los resultados de este test uniparamétrico.

PERIODO DE CALEFACCIÓN

Como sucede en los tres modelos anteriores, el edificio se muestra más sensible a la variación de los parámetros relacionados con la conducción. La mejora por separado de estos parámetros provoca las mayores reducciones de demanda.

La reducción de la transmitancia en los puentes térmicos -P17- puede reducir la demanda en un veinticinco por ciento.

La transmitancia térmica del vidrio -P6-, puede hacer descender la demanda de calefacción un dieciocho por ciento.

Tras estos dos parámetros, el edificio muestra mayor sensibilidad a la mejora de las variables relacionadas con el espesor de aislamiento térmico. El del suelo -P4-, considerado totalmente expuesto al exterior, reduce en un 17,4 % la demanda. El de la cubierta -P3-, lo hace en un 15,3% y el de la fachada -P5- en un 12,3%.

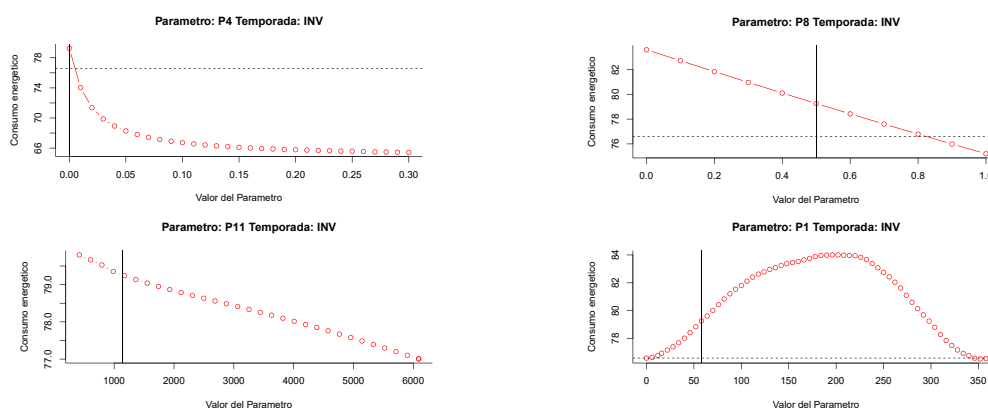


Figura 4.4.3. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 4. Demanda de calefacción

Como quinto parámetro con mayores posibilidades de mejora se sitúa uno relacionado con la radiación solar: La absorptancia de la fachada -P9-, que puede bajar la demanda en un 7,8% o subirla en un 2%. La de la cubierta -P8-, puede reducir o incrementar la demanda en un 5%, según el valor considerado.

Hemos partido de una fachada blanca, con un valor de absorptancia α de 0,2, y una cubierta de color intermedio, con un valor α de 0,5. Oscureciendo la cubierta podemos optimizar las ganancias solares a través de ésta. La absorptancia del marco de la carpintería exterior -P10-, queda más alejada. Produce un descenso del 3,3% o un incremento del 1%. El color de ésta considerado como original es blanco ($\alpha=0,2$)

El resto de los parámetros, por sí solos, pueden llegar a mejorar el edificio hasta un 4%.

La orientación -P1- se presenta poco influyente. Su modificación a lo largo de los 360 grados produce variaciones que pueden reducir la demanda en un 3% o aumentarla en un 6%. La decisión sobre la orientación en este edificio puede alterar un total de un 9,4% los resultados de demanda de calefacción. El edificio ha sido modelizado con uno de los módulos que contiene viviendas simétricas orientadas a los dos mares.

Respecto a los parámetros de inercia térmica, comentar que su modificación puede hacer subir o bajar la demanda en tres puntos porcentuales como máximo.

El parámetro P13, factor solar g de los vidrios, puede hacer aumentar la demanda energética en un 27,3%. Este hecho lo hace ser el parámetro al que el edificio se muestra más sensible, seguido de P17, P6, P4 y P3.

Reducir las infiltraciones por los huecos -P16-, que parten del valor máximo, no produce excesiva mejoría, pues apenas reduce el cuatro por ciento.

La altitud -P2- se presenta irrelevante: su variación no altera prácticamente la demanda energética en ningún sentido. El parámetro 14 solo es aplicable a los meses de verano por lo que no muestra ninguna influencia en este periodo.

PERIODO DE REFRIGERACIÓN

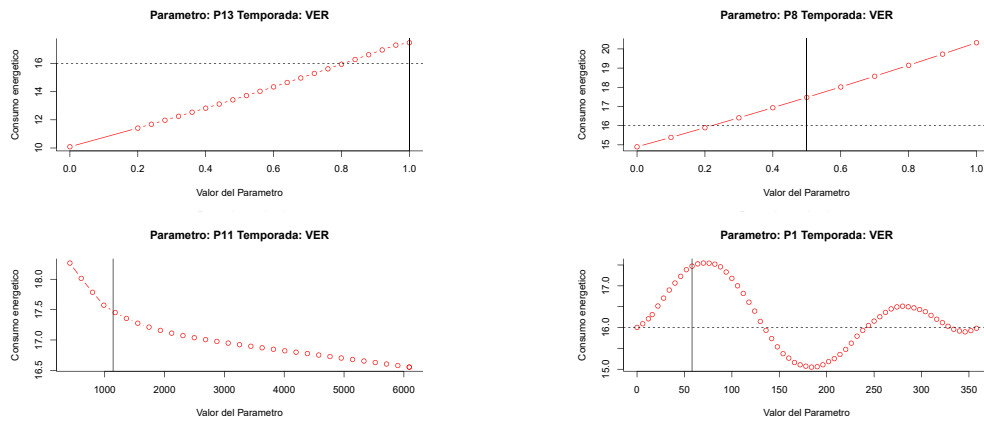


Figura 4.4.4. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 4. Demanda de refrigeración

El edificio original, tal como fue proyectado y construido, queda muy cerca del cumplimiento de los requisitos normativos que limitan la demanda energética en verano en edificios residenciales.

Los dos parámetros que pueden mejorar más la demanda por sí mismos son las protecciones solares de los huecos -factor de sombra P14- y el factor solar del vidrio -P13-. Pueden reducir un cuarenta y dos por ciento demanda de refrigeración y llevarla a cumplimiento de las exigencias actuales o, dicho de otro modo, el edificio tal como fue proyectado solo debe protegerse adecuadamente del soleamiento para cumplir con la norma actual. De hecho, es lo que han hecho muchas de las viviendas.

El tercer parámetro que obtiene los mejores resultados también está relacionado con la radiación solar. Es el parámetro P8, absortancia de la cubierta: modificando el tratamiento superficial de la cubierta podemos reducir en un 14,7% la demanda energética de verano del edificio original.

La absorción de la fachada -P8-, puede reducir también la demanda cerca del cinco por ciento, pero el dato más relevante es que la puede aumentar en un veinte.

La absorción de los marcos de carpintería exterior -P10-, blancos de partida, pueden aumentar la demanda hasta un 10,7%, dato destacable dado que la proporción de éstos en el total de la envolvente no es muy grande.

El edificio se muestra sensible a la variación de los dos parámetros relacionados con la inercia térmica: el P11 -masa de la fachada opaca-, puede reducir la demanda en un 5,3% o aumentarla un 4,6%, según el caso y la masa de los forjados -P12-, puede mejorar la demanda en un 3,9% o empeorarla, y este es un resultado muy relevante, en un 20.3% (en el caso de una fachada ligera, de unos 60 kg/m²).

El parámetro relacionado con la conducción que obtiene mejores resultados es el P17 -puentes térmicos-, con posibilidad de mejora de un quince por ciento.

El edificio se muestra muy poco sensible al aumento de espesores de aislamiento en cubierta (solo un cuatro por ciento).

La demanda puede llegar a aumentar en un tres por ciento si aumentamos el aislamiento de la fachada -P5- o del suelo -P4-. Este hecho también es particularmente interesante: una fachada más aislada provoca el aumento de la demanda energética en verano.

La U del vidrio -P6- no puede mejorar prácticamente nada el edificio. Sin embargo puede aumentar la demanda hasta en un 7,6% si se proyectan vidrios de transmitancia térmica más reducida, un efecto parecido al descrito para los parámetros P4 y P5.

La orientación es más influyente en este periodo. Puede reducir en un catorce por ciento la demanda. Parece que el peor de los valores se da en una orientación próxima a la real, ya que solo puede empeorar en un 0,4%.

Las infiltraciones por los huecos -P16- solo pueden bajar la demanda en un 1,5%.

La altitud -P2- se muestran irrelevante.

PERIODO ANUAL

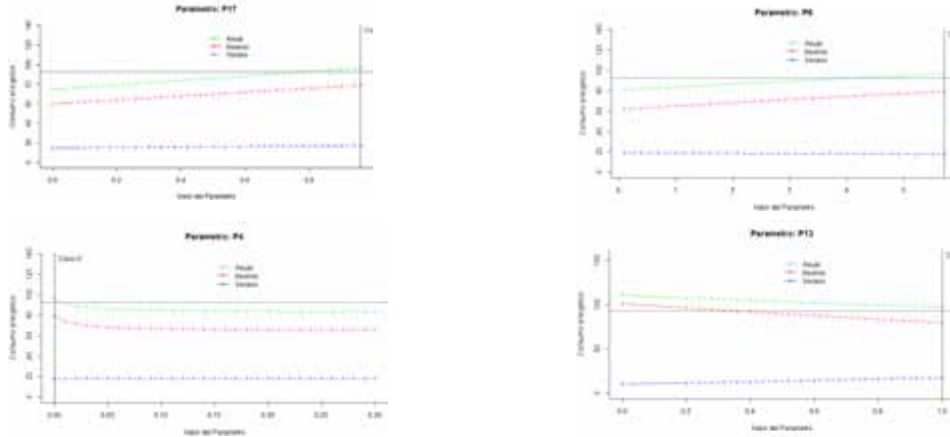


Figura 4.4.5. Gráficas de cuatro test uniparamétricos del modelo 4. Demanda anual (verde) representando las demandas de calefacción (rojo) y refrigeración (azul)

La demanda energética en periodo anual es la suma de las demandas de calefacción, ocho meses, y refrigeración, cuatro meses. Los resultados deben ser, por lo tanto, la combinación de ambos periodos.

Los cinco parámetros que obtienen los mejores valores de demanda energética son los mismos que en el periodo calefacción, y en la misma posición.

La mejora de los puentes térmicos obtiene la mayor reducción de la demanda anual, con un 22,6%. Le sigue la transmitancia térmica del vidrio, que mejora cuanto más se reduce (efecto contrario a lo que ocurre en verano) y los tres espesores de aislamiento térmico de los elementos opacos de la envolvente: suelos, cubierta y fachada, con reducciones totales entre un 10 y un 14%.

El factor de sombra en verano -P14, actuando solo durante los cuatro meses del periodo estival, puede bajar la demanda anual en un 7,6%. El factor solar no le sigue, como ocurre en verano, ya que su efecto es contrario en los dos periodos. No consigue mejorar la demanda anual, sin embargo puede empeorarla hasta un 14,7% con valores de g bajos (vidrios muy poco transparentes). Al reducir g va mejorando el verano y a la vez, empeorando en invierno. La consideración de un invierno de ocho meses frente a un verano de cuatro inclina la balanza hacia el primero, pero a costa del segundo.

Los parámetros de absorción pierden influencia al ver los datos en un ciclo anual. También se mueven en sentido contrario según sea el periodo considerado.

4.4.3. Resultados de los muestreos

Realizamos dos tipos de muestreos: uno sensible y otro uniforme, con diez mil casos cada uno. Seleccionamos el muestreo uniforme para analizar la influencia de los parámetros.

En primer lugar exponemos los resultados obtenidos en el muestreo uniforme, con los coeficientes de determinación R^2 de los parámetros, por separado (u) y ajustados por los demás (a) (figura 4.4.6.)

Seguidamente ordenamos los parámetros de mayor a menor R^2 ajustado, para considerar la acción combinada de la totalidad. Se realiza para los tres periodos estudiados: anual, calefacción y refrigeración (Tabla 4.4.4.)

Para terminar, analizamos los parámetros que se muestran más influyentes y los que arrojan algún otro resultado interesante. Observamos los resultados representados gráficamente.

PERIODO DE CALEFACCIÓN

El parámetro que obtiene un coeficiente de determinación mayor es el P6, transmitancia térmica U de los vidrios. Explica cerca del treinta por ciento de la variabilidad de la demanda de calefacción. La U del marco, que proporcionalmente tiene menos superficie, queda como el cuarto parámetro más influyente, con una determinación del 7%. La U de las carpinterías, pues, se muestra muy importantes en este periodo.

Los puentes térmicos -P17- se sitúan como el segundo parámetro más influyente, con un R^2 de casi el veinticinco por ciento.

El tercero también tiene que ver con los vidrios, aunque en este caso relacionado con la radiación: el factor solar g -P13-, que obtiene un coeficiente de determinación de más del quince por ciento.

Los cuatro parámetros siguientes están relacionados con la conducción, pero ya con menor influencia: a la U del marco, que ya hemos comentado, le siguen los tres de aislamiento térmico en la envolvente opaca: el espesor del aislamiento del suelo explica el cinco por ciento, similar al de la cubierta. El de la fachada queda solo en el tres y medio por ciento, siendo de todos el menos influyente.

Muestreo uniforme Modelo 4. 10 000 casos

	Par	CALEu	REFRu	ANUAu	CALEa	REFRa	ANUAa
ORIENTACION	P1	1.7	0.7	1.4	1.6	0.4	1.3
ALTITUD	P2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
E CUB	P3	5.7	1.0	7.0	4.7	0.6	5.6
E SUELO	P4	6.2	0.1	6.6	5.0	0.1	5.5
E FACHADA	P5	2.9	0.1	3.1	3.5	0.1	3.6
U VIDRIO	P6	31.0	2.2	27.7	29.8	2.3	26.5
U MARCO	P7	6.5	0.6	5.7	6.6	0.6	5.9
α CUBIERTA	P8	0.2	2.2	0.1	0.2	2.2	0.1
α FACHADA	P9	0.3	1.4	0.1	0.3	1.8	0.1
a MARCO	P10	1.3	10.3	0.2	1.0	10.2	0.1
m FACHADA	P11	0.2	0.4	0.3	0.1	0.5	0.3
m FORJADO	P12	0.5	3.1	1.3	0.5	3.4	1.4
g VIDRIO	P13	17.3	22.9	9.3	15.8	21.5	8.4
FS VERANO	P14	0.0	33.1	2.0	0.0	33.2	2.0
INF. HUECOS	P16	0.3	0.2	0.4	0.5	0.1	0.6
PPTT	P17	25.2	6.7	32.5	24.9	7.5	32.7

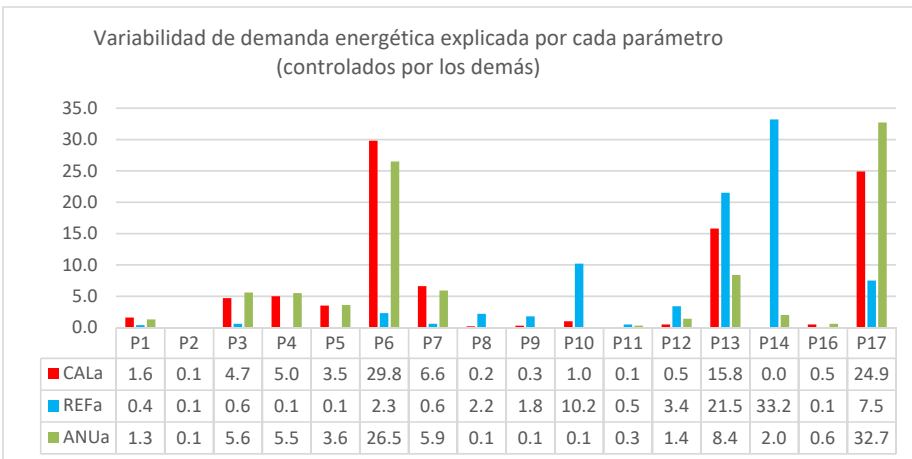
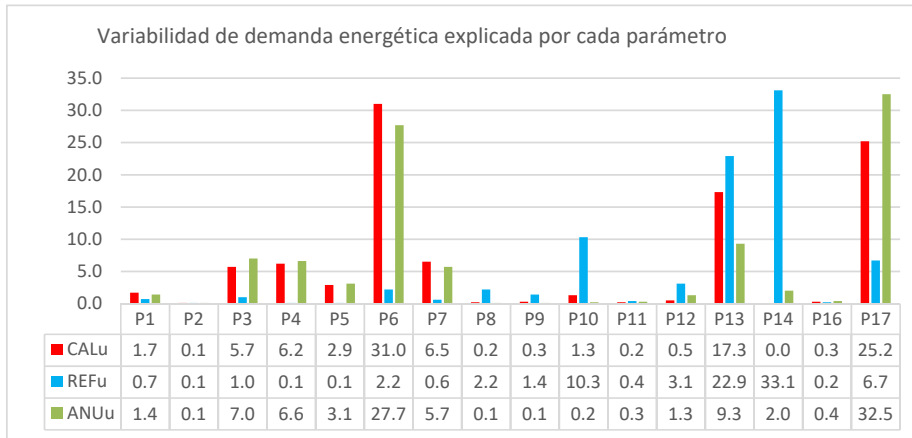


Figura 4.4.6. Valores de los coeficientes de determinación R2 (%) por separado (u) y ajustados por los demás (a). Muestreo uniforme con 10.000 casos basados en el Modelo 4

TABLA 4.4.4. VALORES DE LOS COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN R² (%) POR SEPARADO (u) Y AJUSTADOS POR LOS DEMÁS (a). MUESTREO UNIFORME CON 10.000 CASOS. PARÁMETROS ORDENADOS DE MAYOR A MENOR R²(a)

	Par	ANUAu	ANUAa
PPTT	P17	32.5	32.7
U VIDRIO	P6	27.7	26.5
g VIDRIO	P13	9.3	8.4
U MARCO	P7	5.7	5.9
E CUB	P3	7.0	5.6
E SUELO	P4	6.6	5.5
E FACHADA	P5	3.1	3.6
ES VERANO	P14	2.0	2.0
m FORJADO	P12	1.3	1.4
ORIENTACION	P1	1.4	1.3
INF. HUECOS	P16	0.4	0.6
m FACHADA	P11	0.3	0.3
a MARCO	P10	0.2	0.1
a CUBIERTA	P8	0.1	0.1
a FACHADA	P9	0.1	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1

	Par	CALEu	CALEa
U VIDRIO	P6	31.0	29.8
PPTT	P17	25.2	24.9
g VIDRIO	P13	17.3	15.8
U MARCO	P7	6.5	6.6
E SUELO	P4	6.2	5.0
E CUB	P3	5.7	4.7
E FACHADA	P5	2.9	3.5
ORIENTACION	P1	1.7	1.6
a MARCO	P10	1.3	1.0
m FORJADO	P12	0.5	0.5
INF. HUECOS	P16	0.3	0.5
a FACHADA	P9	0.3	0.3
a CUBIERTA	P8	0.2	0.2
m FACHADA	P11	0.2	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1
ES VERANO	P14	0.0	0.0

	Par	REFRu	REFRa
ES VERANO	P14	33.1	33.2
g VIDRIO	P13	22.9	21.5
a MARCO	P10	10.3	10.2
PPTT	P17	6.7	7.5
m FORJADO	P12	3.1	3.4
U VIDRIO	P6	2.2	2.3
a CUBIERTA	P8	2.2	2.2
a FACHADA	P9	1.4	1.8
E CUB	P3	1.0	0.6
U MARCO	P7	0.6	0.6
m FACHADA	P11	0.4	0.5
ORIENTACION	P1	0.7	0.4
E SUELO	P4	0.1	0.1
INF. HUECOS	P16	0.2	0.1
ALTITUD	P2	0.1	0.1
E FACHADA	P5	0.1	0.1

Las tres variables de absorción consideradas obtienen un R² muy bajo. La del marco, parámetro P10, queda en el uno por ciento y la de cubierta y fachada quedan como muy poco relevantes. Aun resultando poco determinantes, recordamos que el edificio se mostró más sensible a su variación individual, por lo que no es descartable para un caso concreto.

La orientación obtiene un resultado muy bajo, por debajo del dos por ciento.

Las masas de forjados y fachada tampoco se muestran influyentes.

Como ha ocurrido en todos los casos, la altitud no es relevante, quedando en último lugar, con un coeficiente de determinación del cero por ciento, como el factor de sombra, que no es aplicable a estos ocho meses de calefacción.

Pasamos a analizar los parámetros más destacados:

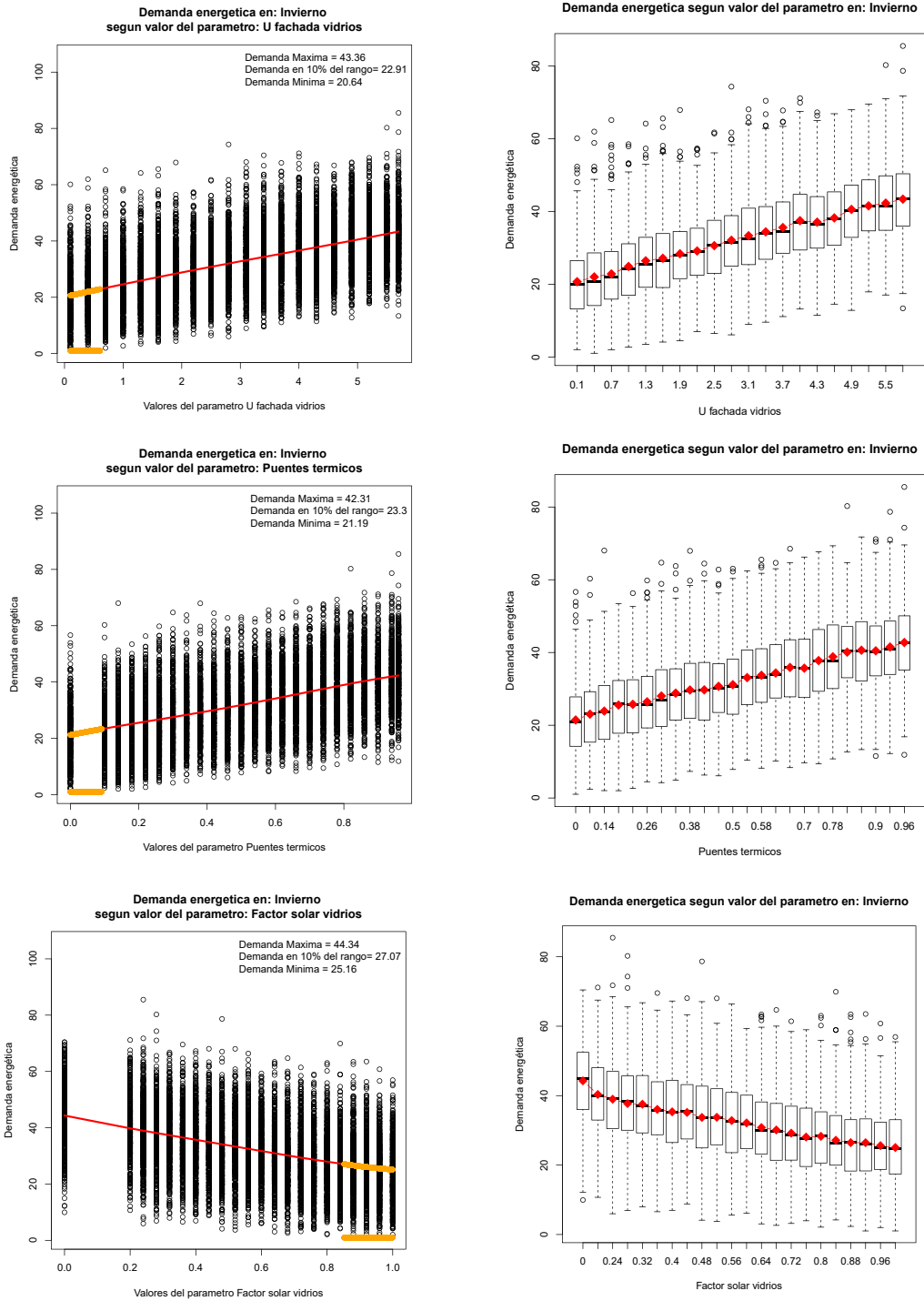


Figura 4.4.7. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los parámetros: arriba P6, centro P17, abajo P13. Izquierda, curva de regresión, indicando la zona con una variación inferior al 10%. Derecha boxplot de la demanda.

P6. Transmitancia térmica U de los vidrios

Los mejores casos están situados en la zona del valor mínimo del parámetro, que representa una baja transmisión de calor por conducción.

El valor óptimo estaría situado en torno a la unidad, por motivos, básicamente económicos, pero establecemos la relevancia en el control de esta prestación de este material.

P17. Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

Los valores más bajos de este parámetro son los que obtienen las menores demandas de calefacción. Las medias obtenidas varían entre 21 y 42 kWh/m².año, y su R² ajustado queda cerca del veinticinco por ciento.

Es el primer parámetro relacionado con la parte opaca de la envolvente, aunque algunos de estos puentes térmicos configuran los huecos (jambas, dinteles o alféizares).

P13. Factor solar g del vidrio

Este parámetro se muestra determinante en casi un dieciséis por ciento. Los valores más altos de P13 son los que dan mejores resultados.

P13=1 equivale a un $g=0,85$, un valor que podemos considerar máximo de captación solar a través de un vidrio monolítico y transparente.

En invierno, los vidrios muy transparentes llevan a mejores resultados de demanda energética. La energía transmitida al edificio por radiación o captación solar pasiva, se muestra muy influyente, como cabía esperar.

Podemos bajar hasta un valor de P13 de 0,86 ($g=0,73$) sin que la demanda media se modifique más de un 10%, por lo que los valores óptimos se podrían situar en ese entorno, que corresponde con un vidrio doble transparente con cámara de aire sencilla.

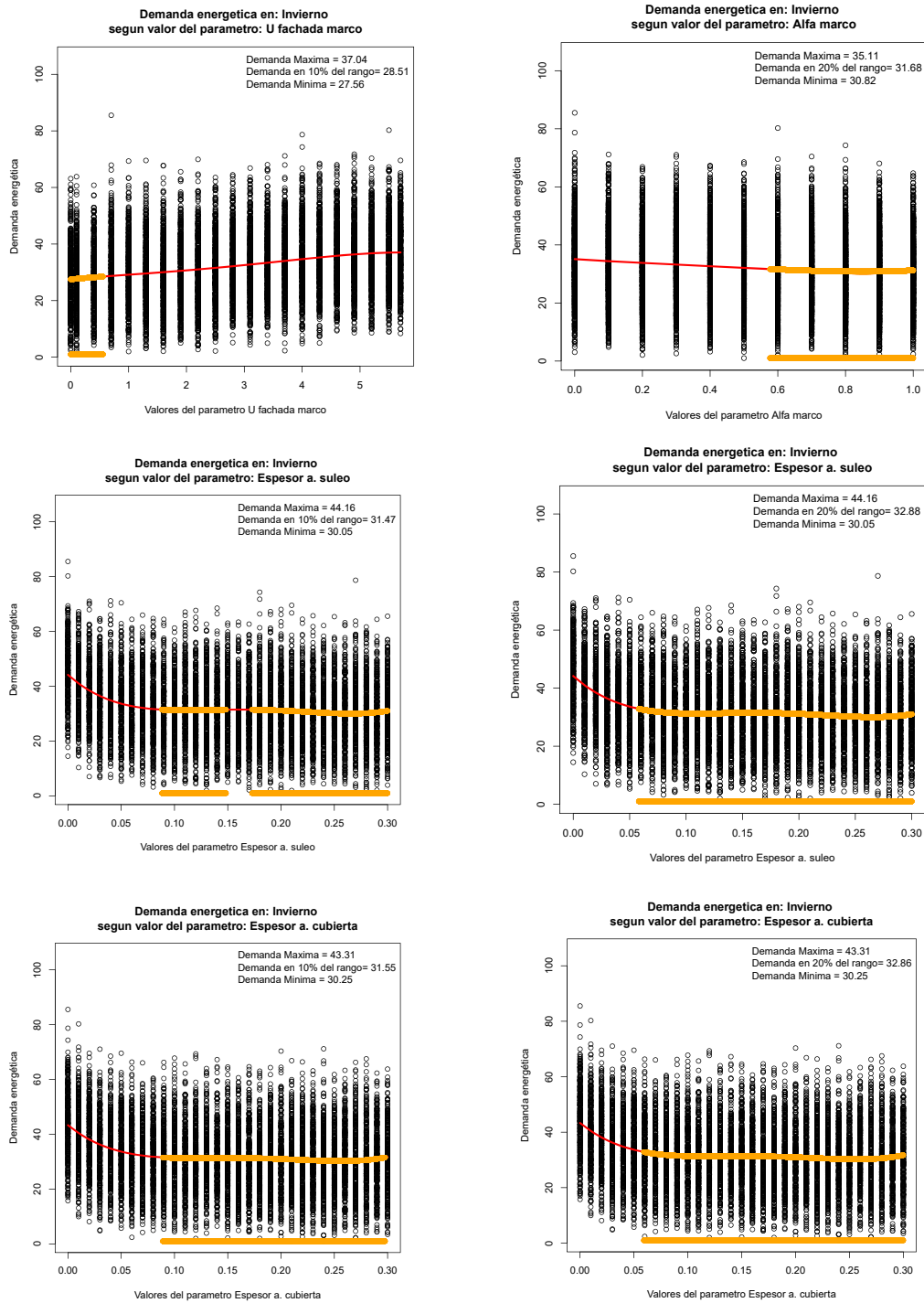


Figura 4.4.8. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los parámetros: arriba P7, centro P4, abajo P3. Valores a partir de los cuales no se modifica la demanda en un 10% (izquierda) o en un 20% (derecha)

P7 Transmitancia térmica U de los marcos

Los valores bajos de U en los marcos de los huecos obtienen, de media, los valores más bajos de demanda en calefacción. El edificio original, con marcos de madera, está en una buena posición respecto a esta variable, con valores en torno a $2,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Los marcos metálicos de aluminio, con rotura de puente térmico existentes en el mercado, pueden acercarse al valor 1.

En el análisis de las gráficas vemos que podemos llegar a valores próximos a 0,7 sin aumentar la demanda media obtenida más de un 10% y a 1,2 sin hacerlo más de un 20%. Los valores óptimos de este parámetro estarán en ese entorno.

P4 Espesor del aislamiento térmico en suelos

Los tres parámetros relacionados con el aislamiento térmico de elementos opacos (suelo, cubierta y fachada), quedan con valor de R^2 entre el tres y medio y el cinco por ciento. Atendiendo a las gráficas, constatamos que son los primeros centímetros de la capa específica de aislamiento térmico los que se muestran muy determinantes, pero a partir de cierto espesor, las posibilidades de mejorar la demanda dependerán de otras variables. Esto viene ocurriendo en todos los modelos. Además, el más determinante en la variabilidad de la demanda, por un estrecho margen, vuelve a ser el aislamiento del suelo.

En las gráficas de resultados (fig. 4.4.8 y 4.4.9) vemos, esta vez, dos situaciones distintas para estudiar el valor óptimo de cada variable: los valores a partir de los cuales no se espera una modificación de la demanda mayor a un diez por ciento, a la izquierda, y a un veinte, a la derecha.

Superar los ocho centímetros y medio del aislamiento considerado en suelos, no produce una modificación de la demanda media, de más de un diez por ciento, y a partir de seis centímetros, no más de un veinte por ciento. Los valores óptimos estarán en ese rango (de 6 a 8,5 cm).

P3 Espesor del aislamiento térmico en cubierta

En la cubierta, este rango se sitúa entre valores parecidos a los del suelo

No parece que aislar por encima de nueve centímetros sea determinante. El resultado final, a partir de ahí, dependerá principalmente del resto de parámetros.

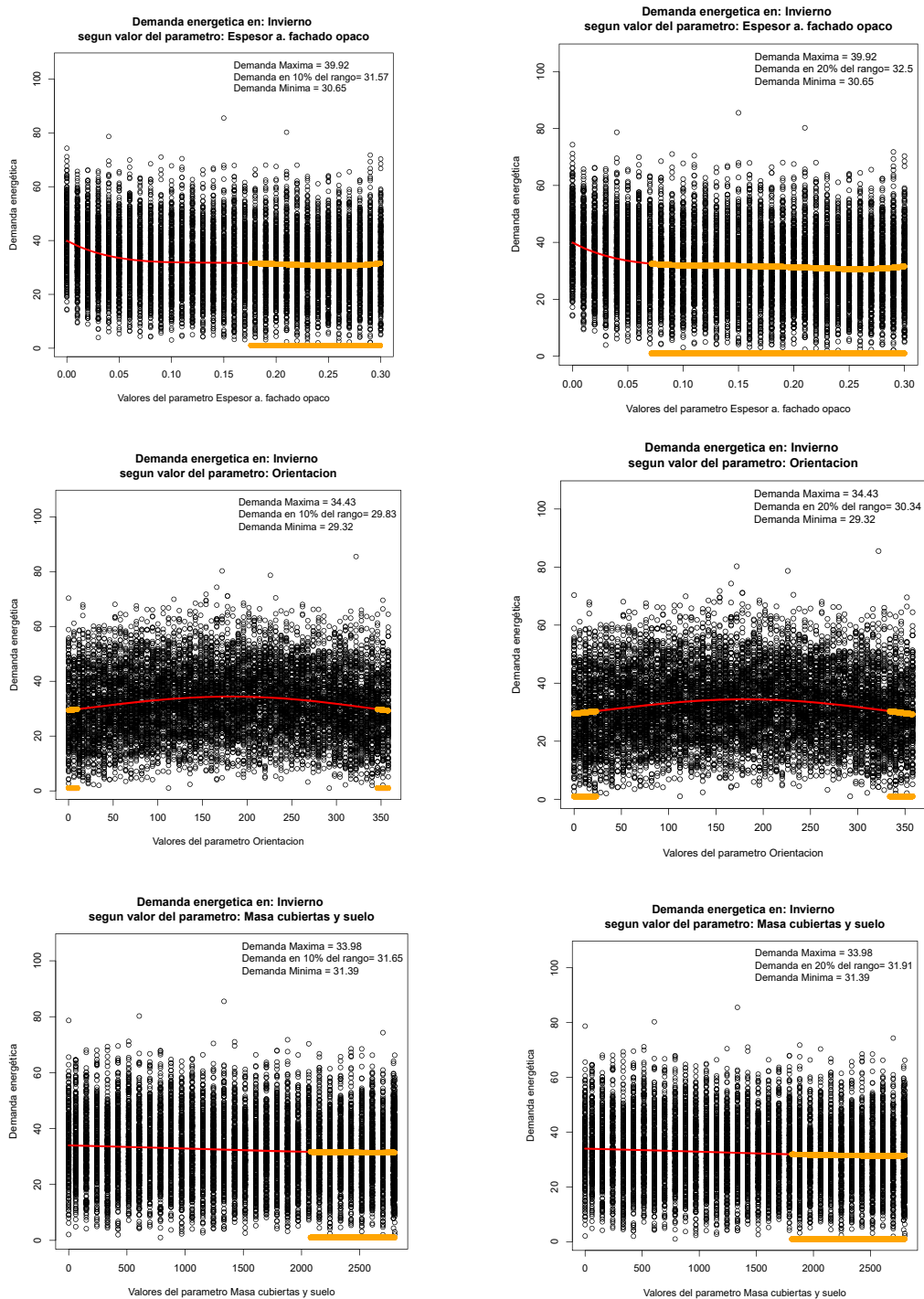


Figura 4.4.9. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de calefacción obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los parámetros: arriba P5, centro P1, abajo P12. Valores a partir de los cuales no se modifica la demanda en un 10% (izquierda) o en un 20% (derecha)

P05 Espesor del aislamiento térmico en fachada opaca

En fachada el rango se amplía, existiendo menor variación media de la demanda con los primeros centímetros de aislamiento. El comportamiento es prácticamente igual, quedando entre siete y diecisiete centímetros: es necesario aislar más la fachada para una reducción similar a la producida en los dos parámetros anteriores (fig. 4.4.9a).

P1 Orientación

El edificio modelizado corresponde a dos tipos de vivienda por planta orientados cada uno a un mar: al Mediterráneo y al Mar Menor.

La orientación 180º es la que obtiene los mejores resultados de media, pero la variación total no es muy alta. Ya observamos este efecto en el test uniparamétrico, lo que confirma que corresponde con la orientación óptima para este tipo de edificios, generados a partir del modelo 4.

La determinación en la variabilidad de la demanda de los parámetros de inercia térmica es casi nula, aunque el edificio original mostró cierta sensibilidad. Los valores que consiguen las demandas mínimas son los de alta inercia térmica (fig. 4.4.9c)

La altitud no tiene influencia, conforme a lo observado en los tres modelos anteriores.

PERIODO REFRIGERACIÓN

En refrigeración, los parámetros relacionados con la radiación solar alcanzan, también en estos casos de estudio, los mayores coeficientes de determinación.

Las variables de aislamiento térmico de fachada, cubierta o suelo son poco o nada influyentes en verano. Ninguno obtiene un coeficiente de determinación superior al uno por ciento, salvo los puentes térmicos que pasan de los siete puntos porcentuales.

El más determinante es el factor de sombra en verano -P14-, que plantea una protección solar de los huecos específica en los meses de este periodo. Alcanza un R^2 del 33,2%.

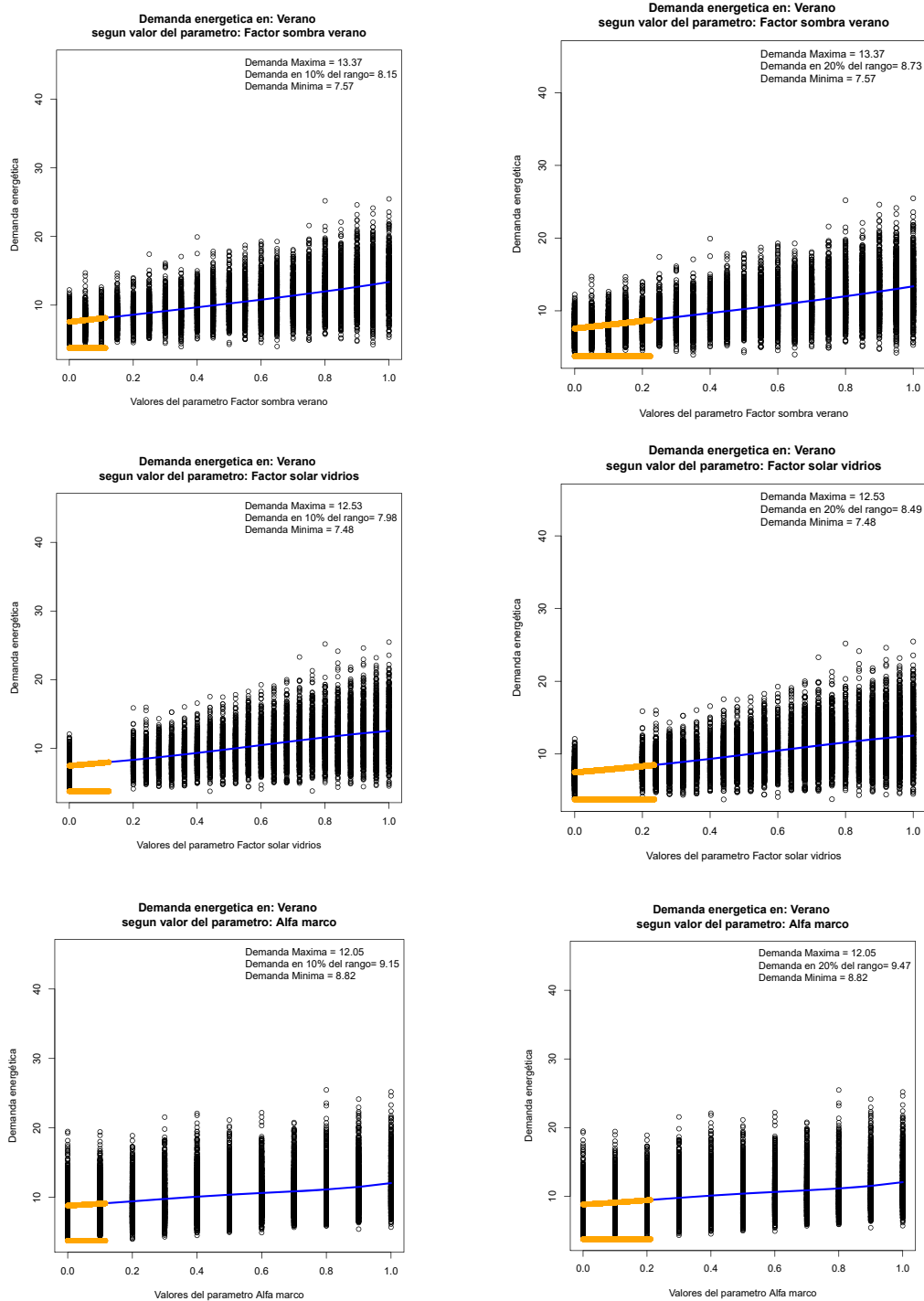


Figura 4.4.10. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los parámetros: arriba P14, centro P13, abajo P10. Valores a partir de los cuales no se modifica la demanda en un 10% (izquierda) o en un 20% (derecha)

El factor solar de los vidrios -P13- se sitúa en segundo lugar, con un coeficiente de determinación R^2 de 21,5%.

Estos dos parámetros han quedado, en todos los casos de estudio analizados, en las dos primeras posiciones.

Las variables de absorción -color y condiciones superficiales de los elementos-, quedan entre las más influyentes. La de los marcos se sitúa en tercera posición, con un 10,2%, la de la cubierta y la fachada quedan en torno al dos por ciento.

La inercia térmica de los forjados -P12- muestra cierta influencia, con un R^2 del 3,4%, por detrás de los puentes térmicos. La de la fachada, sin embargo, queda con una determinación cercana al cero.

La altitud -P2- también es irrelevante en este periodo. Lo mismo ocurre con la infiltración de aire en los huecos -P16-.

Pasemos a analizar los parámetros más representativos:

P14 Factor de sombra en verano

El R^2 de este parámetro es del 33,2%. La regresión nos muestra una variación lineal, con disminución del resultado de demanda hacia el valor mínimo. Este resultado nos indica que una correcta protección solar de los huecos puede explicar gran parte de la variabilidad de la demanda de verano en estos casos de estudio.

Podemos entender, con criterios análogos a los expuestos en los otros casos, que el valor óptimo queda en torno a 0,2.

P13. Factor solar g del vidrio

El comportamiento de este parámetro es lineal, con los mejores resultados en la zona de factor solar mínimo. Volvemos a constatar un comportamiento en sentido contrario en relación a lo que ocurre en invierno, es decir, valores altos de g favorecen el invierno y bajos, en verano. Es un resultado previsible. Lo cuantificamos en un 21,5%

El valor de $g=0,3$ ($P13=0,35$) puede considerarse como valor óptimo en el periodo de calefacción.

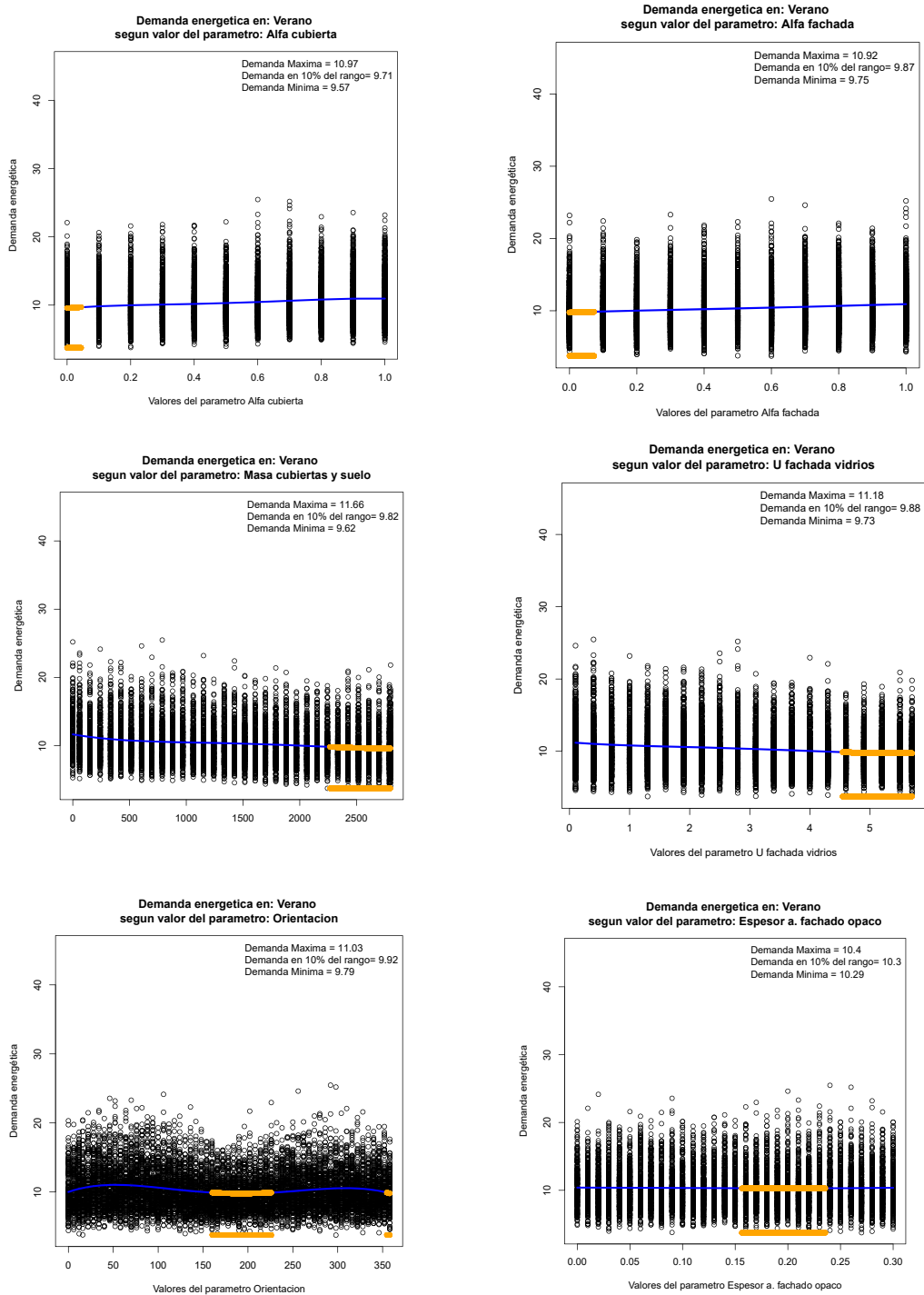


Figura 4.4.11. Representación gráfica de los resultados de demanda energética de refrigeración obtenidos en el muestreo uniforme (10.000 casos) en función de los parámetros: arriba dcha. (P9), arriba izda (P8), centro decha (P6), centro izda. (P12), abajo izda (P5), abajo dcha. (P1) (Valores a partir de los cuales no se modifica la demanda en un 10%).

P8, P9 y P10 Absortancia de la cubierta, la fachada y los marcos

La radiación solar incidente en las partes opacas de la envolvente también muestran influencia en los resultados obtenidos.

De los tres elementos evaluados, cubierta, fachada y carpinterías, es la última la que se muestra más determinante y ha venido ocurriendo en el resto de los modelos. El color de los marcos de carpintería explica el 10,2% de la variabilidad de la demanda energética estival en estos casos.

El resultado de R^2 de la absortancia de la cubierta queda en el 2,2%. El menos influyente de los tres valores de absortancia es el de la fachada, con un 2,6%.

En la figura 4.4.11 representamos los resultados gráficamente.

Los valores de absortancia bajos -colores claros-, son los que mejoran la demanda energética en verano, como era de esperar. Por lo tanto, marcos muy reflectantes, de colores claros, son la mejor opción para el periodo de verano.

P17 Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

La tendencia de las medias es mejorar ligeramente la demanda en calefacción para valores de P17 bajos, es decir, si eliminamos o disminuimos al máximo la transmitancia térmica lineal de éstos.

La mejora media se sitúa en unos 2,6 kWh/m².año que, aun siendo bajo, es relevante para el objetivo de edificios de demanda energética cero.

La variación de la demanda es lineal, con pequeña pendiente hacia los valores mínimos.

P3, P4 y P5 Espesor del aislamiento térmico de cubierta, suelo y fachada

Los parámetros obtienen valores del R^2 por debajo del 0,6%, es decir, su influencia en la variación de la demanda es muy baja.

Si observamos las gráficas (fig. 4.4.11) vemos como las medias son prácticamente horizontales desde el valor de espesor nulo.

P6 y P7, transmitancia térmica de vidrio y marco

Los siguientes parámetro de conducción térmica según su importancia, son la U de vidrio y marcos. Observando las gráficas vemos que los mejores valores de U son los menos aislantes: el valor óptimo de estos parámetros es, por tanto, el de mayor transmisión de calor, al contrario que el calefacción: aumentar la calidad en aislamiento térmico de las carpinterías, por consiguiente, juega en contra en el periodo de verano.

Los valores de R^2 del parámetro P6 quedan en el 2,3% y, el del marco muy cercano al cero, con un valor de 0,6%.

P12 Masa del forjado

Aún no siendo de las más influyentes, la masa del forjado obtiene un R^2 de 3,4%. Queda situada como la quinta variable más influyente en verano.

La inercia térmica de la fachada solo obtiene un 0,5%.

Los valores bajos de masa de forjados aumentan ligeramente la demanda energética del edificio. Igual ocurre con la masa de la fachada, pero en menor medida.

P1 Orientación

La orientación, observando el gráfico de la figura 4.4.11.c, mejora ligeramente los datos en el entorno del ángulo 200° , pero el rango total es muy bajo. Parece que la relevancia de la orientación en los casos generados a partir de este modelo es muy baja, como muestra su coeficiente de determinación R^2 .

PERIODO ANUAL

Los resultados de los R^2 son muy parecidos a los obtenidos para el periodo de calefacción, con diferencias en cuanto al porcentaje y el orden.

Los parámetros relacionados con la conducción térmica son los más influyentes: puentes térmicos y U del vidrio son los dos parámetros más determinantes en un ciclo anual, con R^2 superiores al veinticinco por ciento.

El tercer parámetro que mejor explica la variabilidad de la demanda energética anual es el factor solar g del vidrio -P6-. Es el primero de los relacionados con la radiación solar y queda en el ocho con cuatro por ciento.

Cuatro parámetros relacionados con el aislamiento térmico de la envolvente quedan en las siguientes posiciones: la U del marco, espesor de aislamiento de cubierta y suelo, se acercan al seis por ciento de determinación. Por detrás queda el espesor del aislamiento en fachada, con un tres con seis por ciento.

La protección solar de los huecos en verano -P14-, tan importante en verano, pierde peso al analizar el ciclo anual completo y lidera el grupo de los menos relevantes, con un 2%. Reduce únicamente la demanda de refrigeración si se diseña correctamente, por lo que no tiene relevancia en ocho de los doce meses del año.

El único parámetro de inercia térmica que pasa del 1% es la masa de los forjados -P12-.

La orientación tiene poca relevancia en este periodo anual. Su R^2 ajustado pasa levemente el uno por ciento.

El resto de parámetros quedan con escasa o nula influencia. Todas las absortancias de los elementos de la envolvente pierden el poco protagonismo que mostraron en verano. Dado que influyen en sentido contrario en verano e invierno (colores claros mejoran el verano y empeoran el invierno, y viceversa), su efecto anual se anula o, dicho de otro modo, es mejor analizarlo de modo estacional para tomar la mejor decisión al respecto.

TABLA 4.5.1. RESULTADOS DE LAS DEMANDAS ENERGÉTICAS MEDIAS REPRESENTADAS EN LA CURVA DE REGRESIÓN (ANEJO 1) OBTENIDAS PARA EL MUESTREO UNIFORME CON 10.000 CASOS EN LOS CUATRO MODELOS

Parámetro	Modelo	Demanda calefacción media				Demanda refrigeración media				
		Dcal máxima	Dcal mínima	Diferencia		Dref máxima	Dref mínima	Diferencia		
		kWh/m ² año	kWh/m ² año	kWh/m ² año	%	kWh/m ² año	kWh/m ² año	kWh/m ² año	%	
P1	Orientación	1	60.40	41.99	18.41	30.48%	18.62	13.51	5.11	27.44%
		2	24.67	23.74	0.93	3.77%	11.16	10.54	0.62	5.56%
		3	37.07	35.80	1.27	3.43%	11.85	11.10	0.75	6.33%
		4	34.43	29.32	5.11	14.84%	11.03	9.79	1.24	11.24%
P2	Altitud	1	53.72	52.46	1.26	2.35%	16.76	16.39	0.37	2.21%
		2	24.49	23.64	0.85	3.47%	10.80	10.37	0.43	3.98%
		3	36.73	35.79	0.94	2.56%	11.51	11.11	0.40	3.48%
		4	32.81	32.02	0.79	2.41%	10.45	10.15	0.30	2.87%
P3	e cubierta	1	78.00	48.24	29.76	38.15%	20.23	15.82	4.41	21.80%
		2	25.89	23.82	2.07	8.00%	11.20	10.61	0.59	5.27%
		3	49.79	33.77	16.02	32.18%	13.57	10.95	2.62	19.31%
		4	43.31	30.25	13.06	30.15%	11.54	10.14	1.40	12.13%
P4	e suelo	1	79.87	47.76	32.11	40.20%	16.69	16.32	0.37	2.22%
		2	26.78	23.19	3.59	13.41%	10.76	10.60	0.16	1.49%
		3	51.05	33.44	17.61	34.50%	11.74	11.22	0.52	4.43%
		4	44.16	30.05	14.11	31.95%	10.65	10.22	0.43	4.04%
P5	e fachada	1	69.32	48.97	20.35	29.36%	16.60	16.38	0.22	1.33%
		2	32.57	22.30	10.27	31.53%	10.80	10.64	0.16	1.48%
		3	47.21	33.88	13.33	28.24%	11.54	11.28	0.26	2.25%
		4	39.92	30.65	9.27	23.22%	10.40	10.29	0.11	1.06%
P6	U vidrio	1	66.20	39.15	27.05	40.86%	18.02	15.34	2.68	14.87%
		2	35.36	12.29	23.07	65.24%	11.82	9.93	1.89	15.99%
		3	47.11	24.55	22.56	47.89%	12.12	10.80	1.32	10.89%
		4	43.36	20.64	22.72	52.40%	11.10	9.73	1.37	12.34%
P7	U marco	1	57.76	48.78	8.98	15.55%	17.22	16.02	1.20	6.97%
		2	28.65	19.81	8.84	30.86%	11.42	10.21	1.21	10.60%
		3	41.43	31.00	10.43	25.17%	11.80	10.98	0.82	6.95%
		4	37.40	27.56	9.84	26.31%	10.82	10.02	0.80	7.39%
P8	Abs. Cubierta	1	56.80	49.70	7.10	12.50%	18.79	14.00	4.79	25.49%
		2	24.70	23.75	0.95	3.85%	10.91	10.41	0.50	4.58%
		3	38.43	34.75	3.68	9.58%	12.44	10.13	2.31	18.57%
		4	33.55	31.43	2.12	6.32%	10.97	9.57	1.40	12.76%
P9	Abs. fachada	1	57.35	50.37	6.98	12.17%	18.08	14.79	3.29	18.20%
		2	25.14	23.25	1.89	7.52%	11.18	10.22	0.96	8.59%
		3	38.16	35.15	3.01	7.89%	12.11	10.65	1.46	12.06%
		4	33.75	31.45	2.30	6.81%	10.92	9.75	1.17	10.71%
P10	Abs. marco	1	57.83	50.30	7.53	13.02%	19.07	14.27	4.80	25.17%
		2	26.85	22.49	4.36	16.24%	12.71	8.89	3.82	30.06%
		3	39.89	34.20	5.69	14.26%	13.30	10.37	2.93	22.03%
		4	35.11	30.82	4.29	12.22%	12.05	8.82	3.23	26.80%
P11	m fachada	1	54.17	51.51	2.66	4.91%	16.78	16.37	0.41	2.44%
		2	24.79	23.32	1.47	5.93%	11.20	10.47	0.73	6.52%
		3	37.38	35.43	1.95	5.22%	11.87	11.15	0.72	6.07%
		4	33.22	31.34	1.88	5.66%	10.86	10.11	0.75	6.91%
P12	m forjado	1	56.15	51.46	4.69	8.35%	18.91	15.56	3.35	17.22%
		2	25.31	23.55	1.76	6.95%	11.69	10.00	1.69	14.46%
		3	38.25	35.40	2.85	7.45%	12.84	10.59	2.25	17.52%
		4	33.98	31.39	2.59	7.62%	11.66	9.62	2.04	17.50%
P13	g vidrio	1	74.21	40.56	33.65	45.34%	19.79	11.84	7.95	40.17%
		2	38.39	16.19	22.20	57.83%	13.50	7.18	6.32	46.81%
		3	50.10	30.06	20.04	40.00%	13.46	8.58	4.88	36.26%
		4	51.81	37.68	14.13	27.27%	13.53	7.48	6.05	44.72%
P14	Factor de Sombra en refrigeración	1					21.33	12.06	9.27	43.46%
		2					14.42	7.29	7.13	49.45%
		3					14.32	8.65	5.67	39.59%
		4					13.37	7.57	5.80	43.38%
P16	Inf huecos	1	54.90	50.20	4.70	8.56%	16.99	16.10	0.89	5.24%
		2	24.75	23.40	1.35	5.45%	10.94	10.51	0.43	3.93%
		3	37.27	35.38	1.89	5.07%	11.54	11.15	0.39	3.38%
		4	33.48	31.27	2.21	6.60%	10.65	10.15	0.50	4.69%
P17	PP.TT.	1	67.59	36.71	30.88	45.69%	18.82	14.08	4.74	25.19%
		2	30.20	17.01	13.19	43.68%	11.61	9.73	1.88	16.19%
		3	44.54	27.29	17.25	38.73%	12.55	10.02	2.53	20.16%
		4	42.31	21.19	21.12	49.92%	11.63	8.97	2.66	22.87%

NOTA: valores extraídos de las Gráficas criterio de optimización C5 del anejo A1

4.5. OPTIMIZACIÓN

A la vista de los resultados, procedemos a aplicar los criterios de optimización descritos en el punto 3.3.

Seleccionamos las gráficas del criterio de optimización descrito en el procedimiento como criterio 5, una vez descartados los otros cuatro. Exponemos en la Tabla 4.5.1 los resultados de las demandas energéticas medias obtenidas en las curvas de regresión del muestreo uniforme, indicando la diferencia entre la máxima y la mínima demanda energética media indicada en valor absoluto y porcentaje respecto a la máxima. Realizaremos dos combinaciones para la optimización:

- a- Buscando la combinación de orientación y altitud óptimas.
- b- Fijando los valores de orientación y altitud del edificio original.

El primero serviría para propuestas en obra nueva y el segundo para intervención en edificios. También nos muestra la influencia de los dos primeros parámetros respecto al resto.

En cada una de ellos realizaremos dos propuestas para los valores de los todos los parámetros salvo los relacionados con la absorción (P8, 9 y 10), buscando en primer lugar, los valores del parámetro con una variación máxima del 10% respecto al que aporta el mejor resultado de demanda energética y luego del 20% para calcular dos supuestos. De este modo obtenemos un rango de valores óptimos.

Como ejemplo mostramos la selección del rango de valores del parámetro P03 en el Modelo 1, obteniendo un rango de 5,5 a 8,5 cm. (figura 4.5.1) **Optimización**

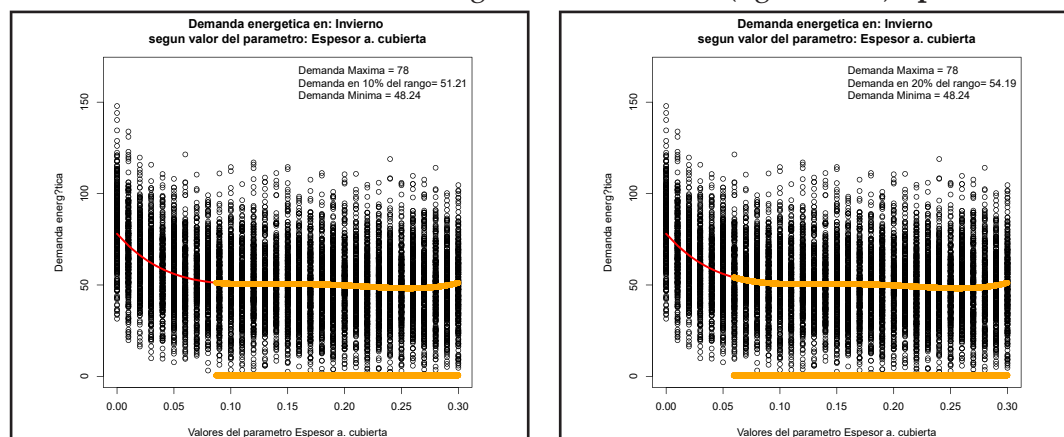


Figura 4.5.1. Selección de los dos valores óptimos de espesor de aislamiento térmico en cubierta (P3). Izquierda variación máxima 10% (P3=8,5 cm), derecha variación máxima 20% (P3=5,5 cm)

Edificio 1, viviendas Maralet

En el edificio original orientación y altitud no pueden ser modificadas. La altitud se ha mostrado nada relevante por lo que no la modificamos. Realizamos optimización con la orientación original y con la mejor orientación.

TABLA 4.5.1.a. VALORES DE LOS PARÁMETROS QUE OPTIMIZAN LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO 1, ADMITIENDO UNA VARIACIÓN MÁXIMA DE UN 10% Y UN 20% (kWh/m².año)

	ORIENTACIÓN (°)	ALTITUD (m)	e CUBIERTA (cm)	e SUELO (cm)	e FACHADA (cm)	U VIDRIO (W/m ² K)	U MARCO (W/m ² K)	α CUBIERTA	α FACHADA	α MARCO	m FACHADA (kg/m ³)	m FORJADOS (kg/m ³)	ε VIDRIO (W/W)	ε VERANO (W/W)	INF. HUECOS (m ² /ha ²)	PP.TT. (W/mK)
CASO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P16	P17
0	218	5	0	0	0	5.7	2.2	0.6	0.96	0.2	1140	1330	1	1	100	0.96
ANU	218/0	5	8.5-5.5	9.5-5.5	17-8	0.7-1.2	0.5-1.1	1-1	1-1	0.9-0.9	5800-5500	2150-1700	1-1	0.27-0.36	8-13	0.12-0.22
CAL	218/0	5	8.5-5.5	5.5-8.5	17.5-8	0.6-1.1	0.4-0.9	1-1	1-1	1-1	5900-5700	2150-1700	1-1	1-1	5-10	0.1-0.2
REF	218/0	5	7-5	0-0	0-0	5.7-5.7	5.7-5.7	0-0	0-0	0-0	3200-2000	2150-1600	0.35-0.35	0.2-0.24	23-30	0.15-0.24

Nota: se indica el rango con 10%-20%

TABLA 4.5.1.b. RESULTADOS DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m².año) DE LA OPTIMIZACIÓN DEL EDIFICIO 1 CON LA ORIENTACIÓN ORIGINAL. VARIACIÓN SOBRE LA DEMANDA MÍNIMA DEL 10 Y 20%

TABLA 4.5.1.c. RESULTADOS DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m².año) DE LA

Orientación Original (218°)	Calefacción		Refrigeración		Anual	
Caso 0	-145.43		22.62		168.05	
	10%	20%	10%	20%	10%	20%
Anual Optimizado	-11.93	-22.94	20.42	22.87	32.38	45.80
Refrigeración Optimizado	-127.52	-134.55	6.40	7.07	133.93	141.62
Calefacción Optimizado	-10.62	-21.27	34.66	34.41	45.28	55.68

OPTIMIZACIÓN DEL EDIFICIO 1 CON LA ORIENTACIÓN QUE APORTA LOS MEJORES RESULTADOS. VARIACIÓN SOBRE LA DEMANDA MÍNIMA DEL 10 Y 20%

Orientación Óptima (0°)	Calefacción		Refrigeración		Anual	
Caso 0	-145.43		22.62		168.05	
	10%	20%	10%	20%	10%	20%
Anual Optimizado	-0.85	-6.98	19.59	22.02	20.44	29.00
Refrigeración Optimizado	-118.12	-124.96	6.39	7.05	124.51	132.01
Calefacción Optimizado	-0.48	-5.82	34.55	34.24	35.04	40.06

Exponemos los resultados por periodos, ordenando los parámetros según la influencia mostrada en el resultado (tabla 4.1.4).

Calefacción

- Buscar la mejor orientación reduce considerablemente la demanda sobre el edificio optimizado (10,62 a 0,48 con 10% y 21,27 a 5,82 kWh/m².año con 20%).
- La Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos será mínima (TTL<0,2)
- Factor solar del vidrio máximo.
- La U de los huecos debe ser baja, en torno a 1 W/m²K. Esto dificulta la combinación con el anterior: los vidrios de U baja suelen tener g bajo.
- Aislamiento en cubierta y suelo 5,5 y 9 cm.
- Aislamiento en fachada superiores, entre 8 y 17,5 cm.
- Las absorptancias y las masas, máximas.
- Infiltración de aire en huecos mínima, con clases 3 o 4.

Refrigeración

- Valores bajos de factor solar g del vidrio y
- Máxima protección solar estacional de huecos (FS en torno a 0,20)
- Las absorptancias mínimas en la envolvente
- La TTL de los puentes térmicos será baja, menor a 0,24
- La orientación no altera los resultados en estas combinaciones.
- U de vidrios y marcos poco aislante, con valor máximo.
- Masas de forjados y fachada alta. Permite reducirla respecto a calefacción.
- Solo necesitamos de aislamiento en cubierta, espesor óptimo 5 cm.
- Aislar fachada y suelos puede aumentar ligeramente la demanda.

Anual

- En los parámetros que actúan con efecto contrario en ambos periodos (U en huecos y absorptancias de la envolvente) se debe optar por favorecer la calefacción aunque pueda aumentar ligeramente la demanda de refrigeración.
- Protección solar estacional de huecos (FS menor a 0,36)
- Los espesores de aislamientos térmicos, como en calefacción.
- En el resto, valores parecidos a la calefacción.

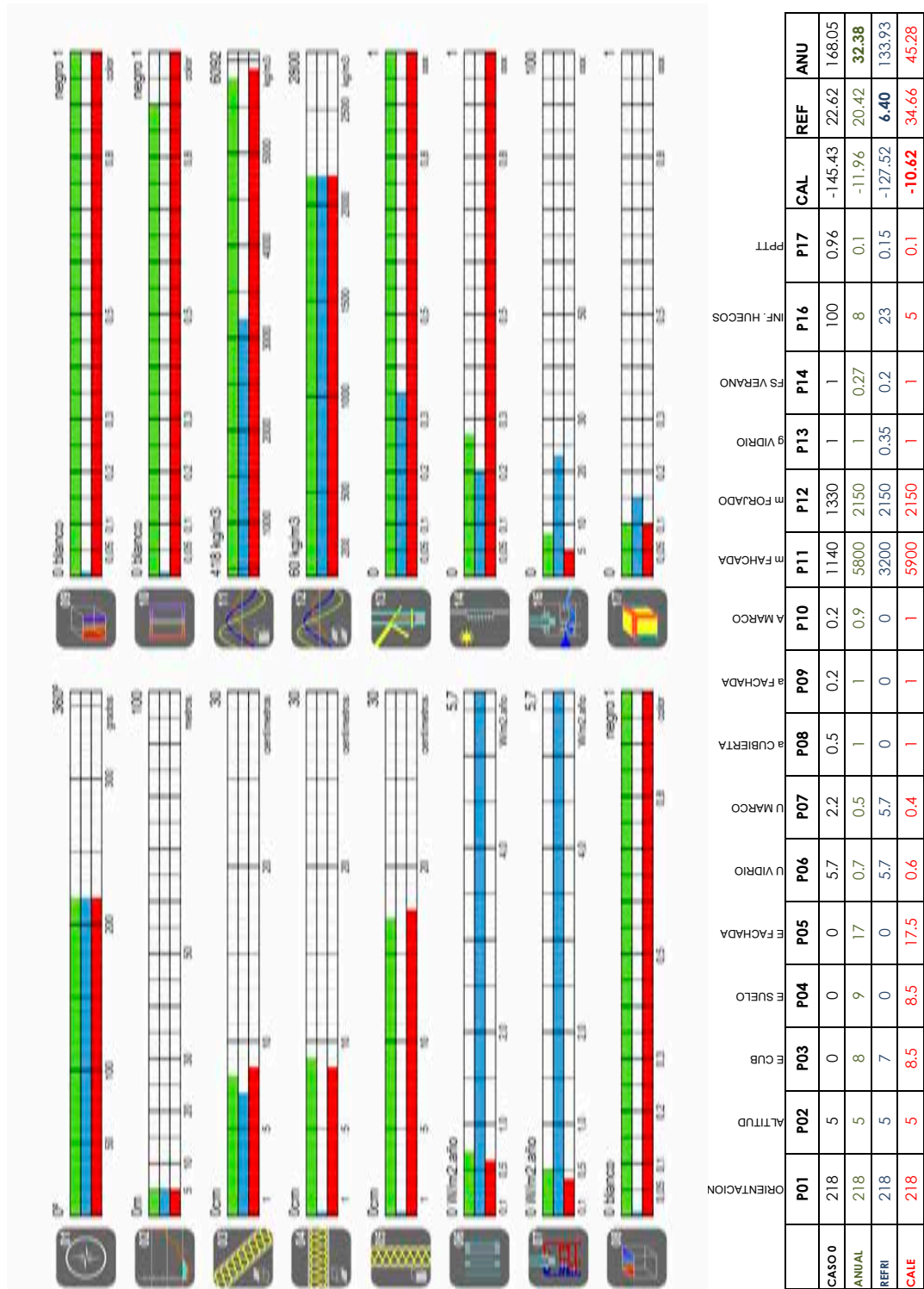


Figura 4.5.2. Modelo 1. Valores óptimos en los tres periodos considerados. Orientación original. Aceptamos en cada parámetro un 10% de diferencia respecto a la menor demanda energética.

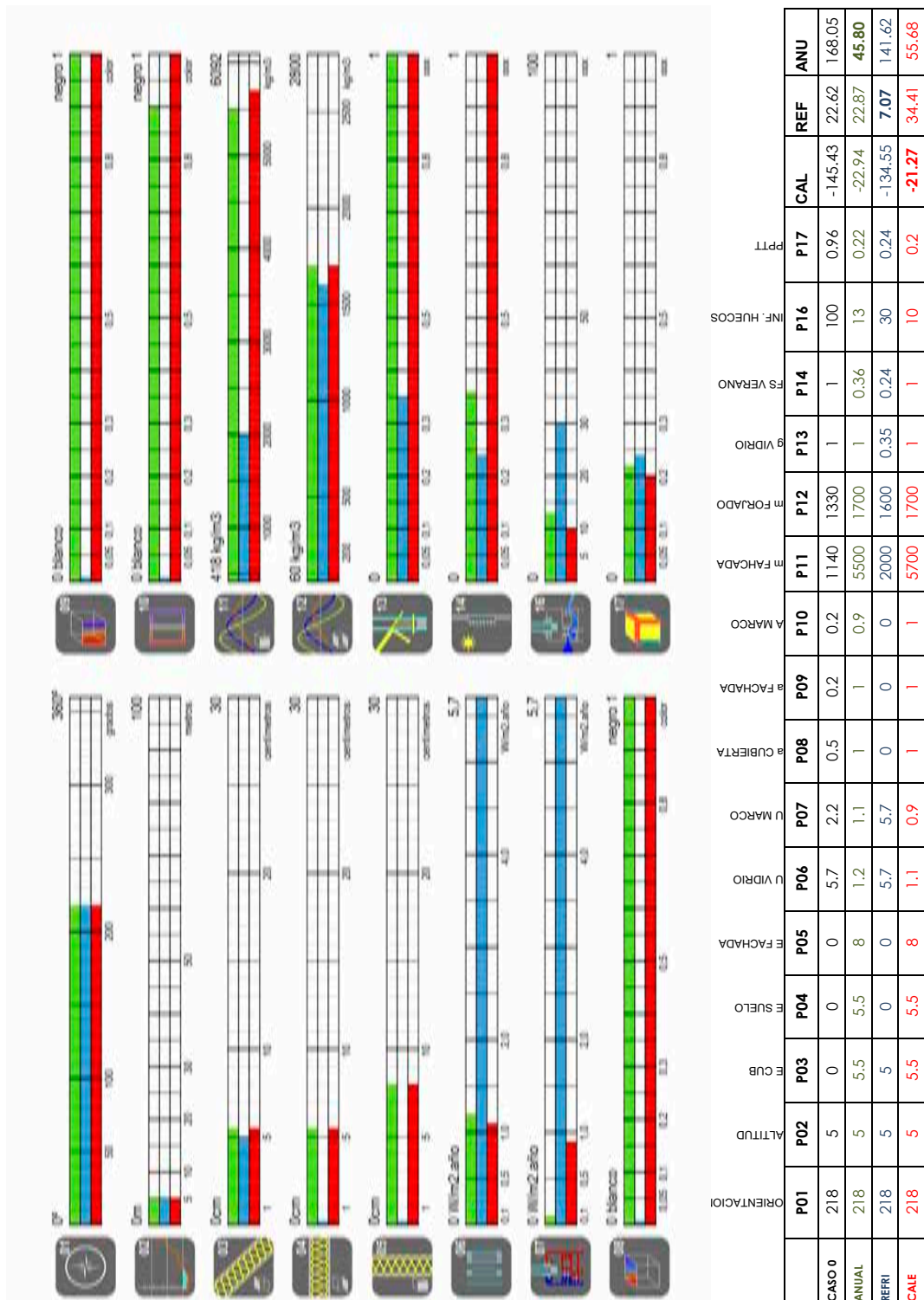


Figura 4.5.3. Modelo 1. Valores óptimos en los tres periodos considerado. Orientación original. Aceptamos en cada parámetro un 20% de diferencia respecto a la menor demanda energética.

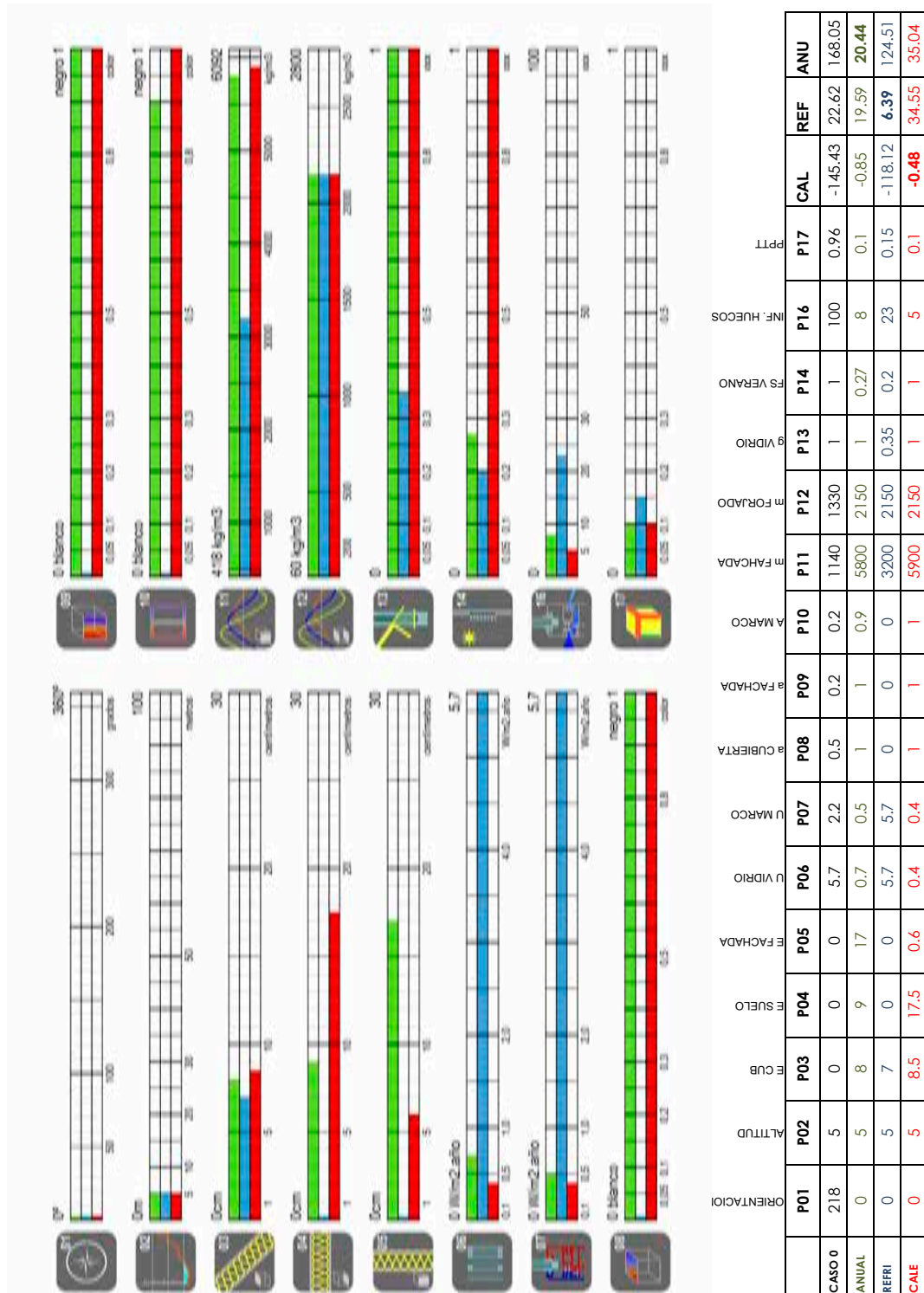


Figura 4.5.4. Modelo 1. Valores óptimos en los tres periodos considerados. Orientación óptima. Aceptamos en cada parámetro un 10% de diferencia respecto a la menor demanda energética.

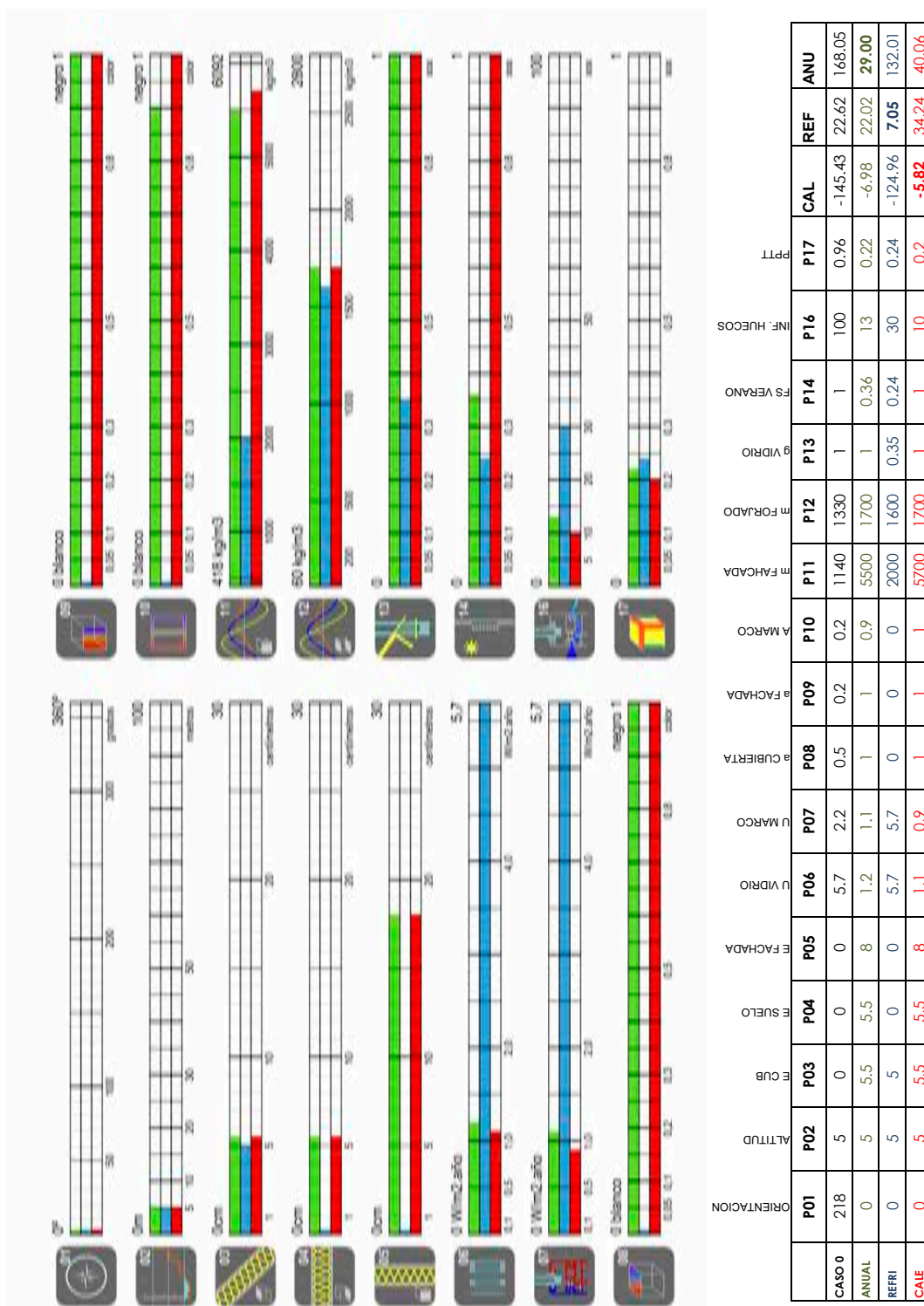


Figura 4.5.5. Modelo 1. Valores óptimos en los tres periodos considerados. Orientación óptima. Aceptamos en cada parámetro un 20% de diferencia respecto a la menor demanda energética.

4.5.1. Optimización Edificio 2, Hexagonal Torre

En este caso descartamos de partida los parámetros 1 y 2, a la vista de los resultados obtenidos.

TABLA 4.5.2.a. VALORES DE LOS PARÁMETROS QUE OPTIMIZAN LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO 2, ADMITIENDO UNA

	ORIENTACIÓN (°)	ALTITUD (m)	e CUBIERTA (cm)	e SUELO (cm)	e FACHADA (cm)	U VIDRIO (W/m ² K)	U MARCO (W/m ² K)	α CUBIERTA	α FACHADA	α MARCO	m FACHADA (kg/m ³)	m FORJADOS (kg/m ³)	g VIDRIO (W/W)	FS VERANO (W/W)	INF. HUECOS (m ² /h.m ²)	PP.TT. (W/mK)
CASO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P16	P17
0	338	5	0	0	0	5.7	2.2	0.6	0.96	0.2	1140	1330	1	1	100	0.96
ANU	338	5	5.5-4	5.5-4	17-6	0.7-1.3	0.9-1.6	0.2-0.2	0.8-0.8	0.7-0.7	5800-5500	2050-1700	1-1	0.27-0.36	4-15	0.12-0.18
CAL	338	5	5.5-4	5.5-4	17-6	0.7-1.2	0.7-1.4	1-1	1-1	1-1	5900-5700	1700-1400	1-1	1-1	3-7	0.1-0.18
REF	338	5	5.5-4	0-0	0-0	5.7-5.7	5.7-5.7	0-0	0-0	0-0	4250-3700	2400-2200	0.35-0.35	0.2-0.24	23-30	0.18-0.23

Nota: se indica el rango con 10%-20%

VARIACIÓN MÁXIMA DE UN 10% Y UN 20% (kWh/m².año)

TABLA 4.5.2.b. RESULTADOS DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m².año) DE

Orientación Original (218°)	Calefacción		Refrigeración		Anual	
Caso 0	-43.58		20.45		64.04	
	10%	20%	10%	20%	10%	20%
Anual Optimizado	-1.62	-5.09	12.12	12.83	13.74	17.92
Refrigeración Optimizado	-54.94	-56.24	4.90	5.21	59.84	61.45
Calefacción Optimizado	-1.03	-3.78	27.79	26.27	28.82	30.05

LA OPTIMIZACIÓN DEL EDIFICIO 2 CON LA ORIENTACIÓN ORIGINAL.
VARIACIÓN SOBRE LA DEMANDA MÍNIMA DEL 10 Y 20%

El hecho de ser el edificio más compacto le hace partir de unas demandas de calefacción menores, como hemos visto en el capítulo 4.

Observamos que no hay gran diferencia entre los resultados admitiendo un 10% de los del 20% y sin embargo, sí es grande en algunos valores adoptados de los parámetros, sobre todo en calefacción y anual. La situación óptima, por tanto, estará más cerca de la segunda opción, así que la tomamos como propuesta.

Exponemos los resultados por periodos, ordenando los parámetros según la influencia mostrada sobre el resultado (tabla 4.2.4).

Calefacción

- La U de los vidrios debe ser baja, menor de $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Factor solar del vidrio máximo ($g=0,85$, difícil de conseguir con vidrios dobles)
- La TTL de los puentes térmicos será mínima
- La U de los marcos será también baja, pudiendo llegar a $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Aislamiento en torno a 6 centímetros, descartando el valor de 17 por excesivo¹.

Las absorptancias serán máximas, especialmente las de los marcos.

- Aislamiento en cubierta y suelo de 4 cm.
- Las masas de la envolvente, máximas.
- Infiltración de aire en huecos mínima, con clases 3 o 4.

Refrigeración

- Máxima protección solar estacional de huecos (FS menor a 0,24)
- Valores bajos de factor solar g de los vidrios
- Las absorptancias mínimas en la envolvente, principalmente de los marcos.
- La TTL de los puentes térmicos será baja
- U de vidrios y marcos poco aislante, con valor máximo.
- Masas de forjados y fachada alta. Permite reducirla respecto a calefacción.
- Solo necesitamos algo de aislamiento en cubierta.
- Podemos optar por no aislar fachada y suelo.

Anual

- En los parámetros que actúan con efecto contrario en ambos periodos (U en huecos y absorptancias de la envolvente) se debe optar por favorecer la calefacción aunque pueda aumentar ligeramente la demanda de refrigeración.
- Los espesores de aislamientos térmicos, como en calefacción.
- Protección solar estacional de huecos (FS menor a 0,36)
- En el resto, valores parecidos a la calefacción.

¹ Por el razonamiento anterior, dado que hay menos de $3 \text{ kWh/m}^2\text{.año}$ entre el 10 y el 20%

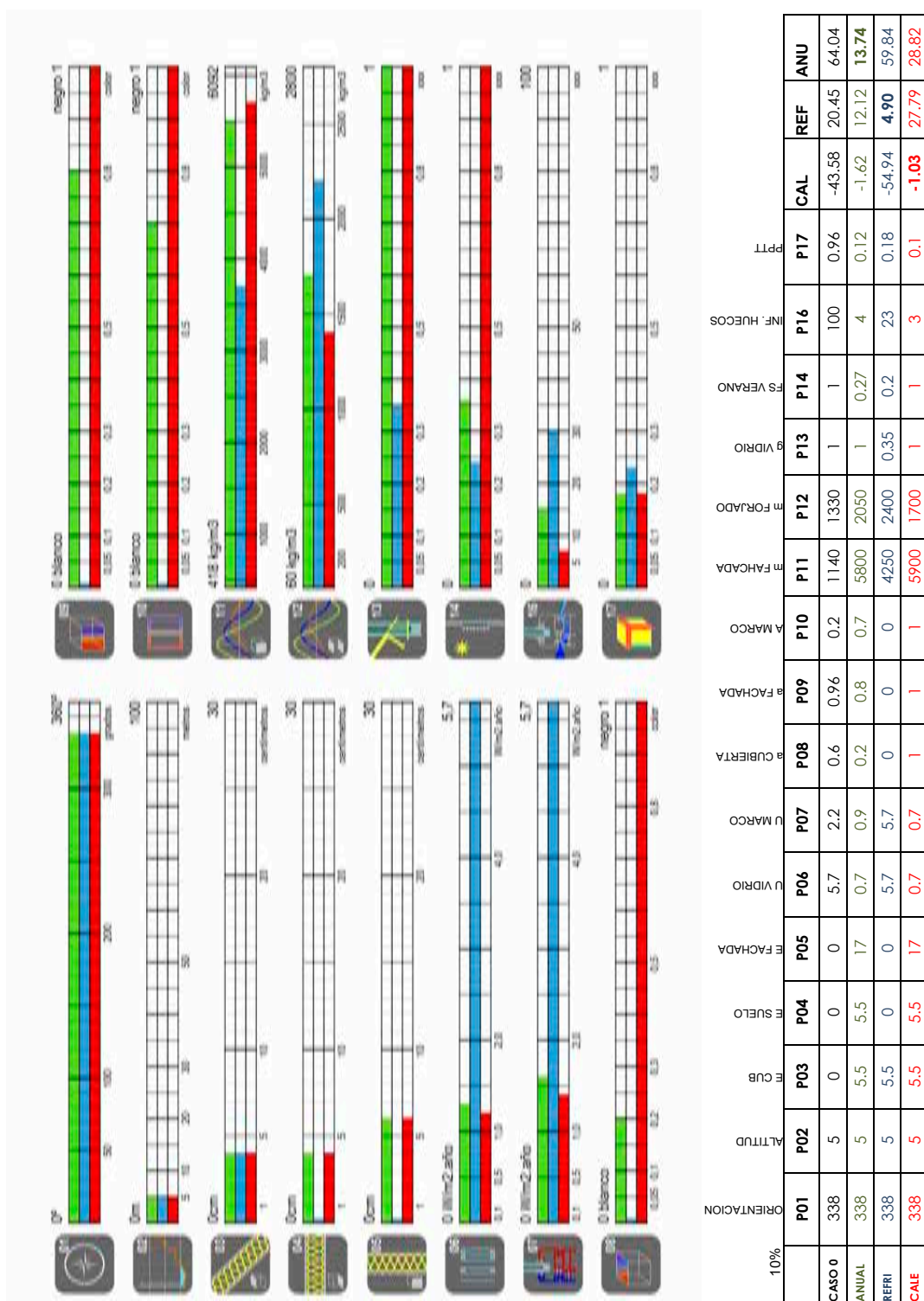


Figura 4.5.7. Modelo 2. Valores óptimos en los tres periodos considerados. Orientación original. Aceptamos en cada parámetro un 20% de diferencia respecto a la menor demanda energética

4.5.2. Optimización edificio 3, Edificio Hexagonal Basamento

En este caso descartamos de partida los parámetros 1 y 2, a la vista de los resultados obtenidos y por razonamiento análogo al caso anterior.

TABLA 4.5.3.a. VALORES DE LOS PARÁMETROS QUE OPTIMIZAN LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO 3, ADMITIENDO UNA VARIACIÓN MÁXIMA DE UN 10% Y UN 20% (kWh/m².año)

	ORIENTACIÓN (°)	ALTITUD (m)	e CUBIERTA (cm)	e SUELO (cm)	e FACHADA (cm)	U VIDRIO (W/m ² K)	U MARCO (W/m ² K)	α CUBIERTA	α FACHADA	α MARCO	m FACHADA (kg/m ³)	m FORJADOS (kg/m ³)	g VIDRIO (W/W)	FS VERANO (W/W)	INF. HUECOS (m ³ /h.m ²)	PP.TT. (W/m ² K)
CASO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P16	P17
0	97	5	0	0	0	5.7	2.2	0.2	0.7	0.2	1140	1330	1	1	100	0.96
ANU	97	5	8-5.5	9-5.5	15.5-7	0.7-1.2	0.7-1.2	0.9-0.9	0.7-0.7	0.75-0.75	5600-5100	2050-1800	1-1	0.30-0.40	7-17	0.1-0.2
CAL	97	5	8-6	8.5-5.5	16.5-7	0.6-1.1	0.6-1.1	1-1	1-1	1-1	5800-5500	1700-1700	1-1	1-1	3-14	0.1-0.22
REF	97	5	7-5	0-0	0-0	5.7-5.7	5.7-5.7	0-0	0-0	0-0	4500-3700	2250-1900	0.35-0.35	0.2-0.25	23-30	0.13-0.2

Nota: se indica el rango con 10%-20%

TABLA 4.5.3.b. RESULTADOS DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m².año) DE LA OPTIMIZACIÓN DEL EDIFICIO 3 CON LA ORIENTACIÓN ORIGINAL. VARIACIÓN SOBRE LA DEMANDA MÍNIMA DEL 10 Y 20%

Orientación Original (218°)	Calefacción		Refrigeración		Anual	
Caso 0	-89.01		17.21		106.23	
	10%	20%	10%	20%	10%	20%
Anual Optimizado	-5.73	-12.21	13.2	14.58	18.93	26.79
Refrigeración Optimizado	-83.60	-87.14	5.61	5.99	89.21	93.13
Calefacción Optimizado	-4.48	-10.56	25.27	24.64	29.76	35.21

Los modelos 3 y 4 tienen una compacidad intermedia, entre el 1 y el 2.

Observamos entre los dos supuestos existe diferencia relevante en los periodos de calefacción y anual. En el primero duplicamos la demanda -aun siendo la obtenida con el 20% un muy buen resultado- y en el segundo se obtiene un dato un cincuenta por ciento superior. En verano apenas hay diferencia, por lo que optaremos por los valores menos exigentes.

Exponemos los resultados por periodos, ordenando los parámetros según la influencia mostrada sobre el resultado (tabla 4.3.4).

Calefacción

- La U de los vidrios debe ser baja, entre 0,7 y 1,2 W/m²K
- Factor solar del vidrio máximo (g=0,85, difícil de conseguir con vidrios dobles)
- La TTL de los puentes térmicos será mínima
- Aislamiento de suelo y cubierta entre 5,5 y 9 cm
- Aislamiento de fachada opaca de 7 cm., descartando 16,5 cm por excesivo².
- La U de los marcos será baja, entre 0,6 y 1,1 W/m²K.
- Las absortancias serán máximas, especialmente las de los marcos.
- Las masas de la envolvente, máximas.
- Infiltración de aire en huecos, mínima, con clases 3 o 4.

Refrigeración

- Máxima protección solar estacional de huecos (FS menor a 0,25)
- Valores bajos de factor solar g de los vidrios (0,3)
- La TTL de los puentes térmicos será baja
- Las absortancias mínimas en la envolvente, principalmente de los marcos.
- U de vidrios y marcos poco aislante, con valor máximo.
- Masas de forjados y fachada alta. Permite reducirla respecto a calefacción.
- Solo necesitamos aislamiento en cubierta, en torno a 5 cm. Podemos optar por no aislar fachada y suelo.
- U de vidrios y marcos máxima. Cuanto más aislante peor para la demanda.

Anual

- La U de los vidrios baja, entre 0,7 y 1,2 W/m²K
- La TTL de los puentes térmicos será baja
- Factor solar del vidrio alto, que será combinado con una protección solar estacional de huecos alta, (FS menor a 0,40)
- Los espesores de aislamientos térmicos, como en calefacción.
- Las absortancias de los elementos altas, pero no máximas (entre 0,7 y 0,9)
- En el resto, valores parecidos a la calefacción.

² Hay menos de 6 kWh/m².año entre el 10 y el 20%

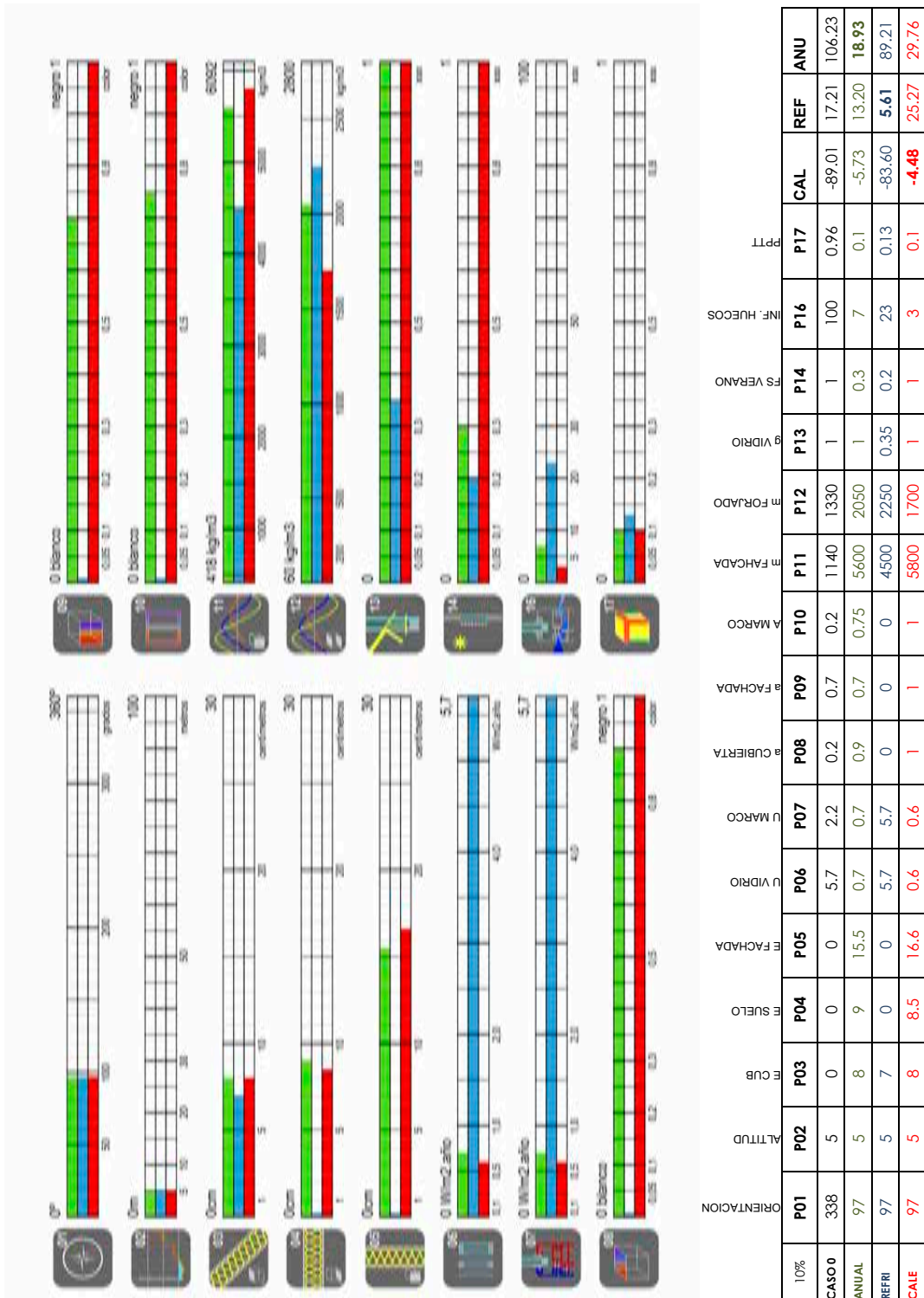


Figura 4.5.8. Valores óptimos para el modelo 3 en los tres periodos considerados, con los valores de orientación y altitud originales y aceptando un valor con un 10% de diferencia respecto al mejor

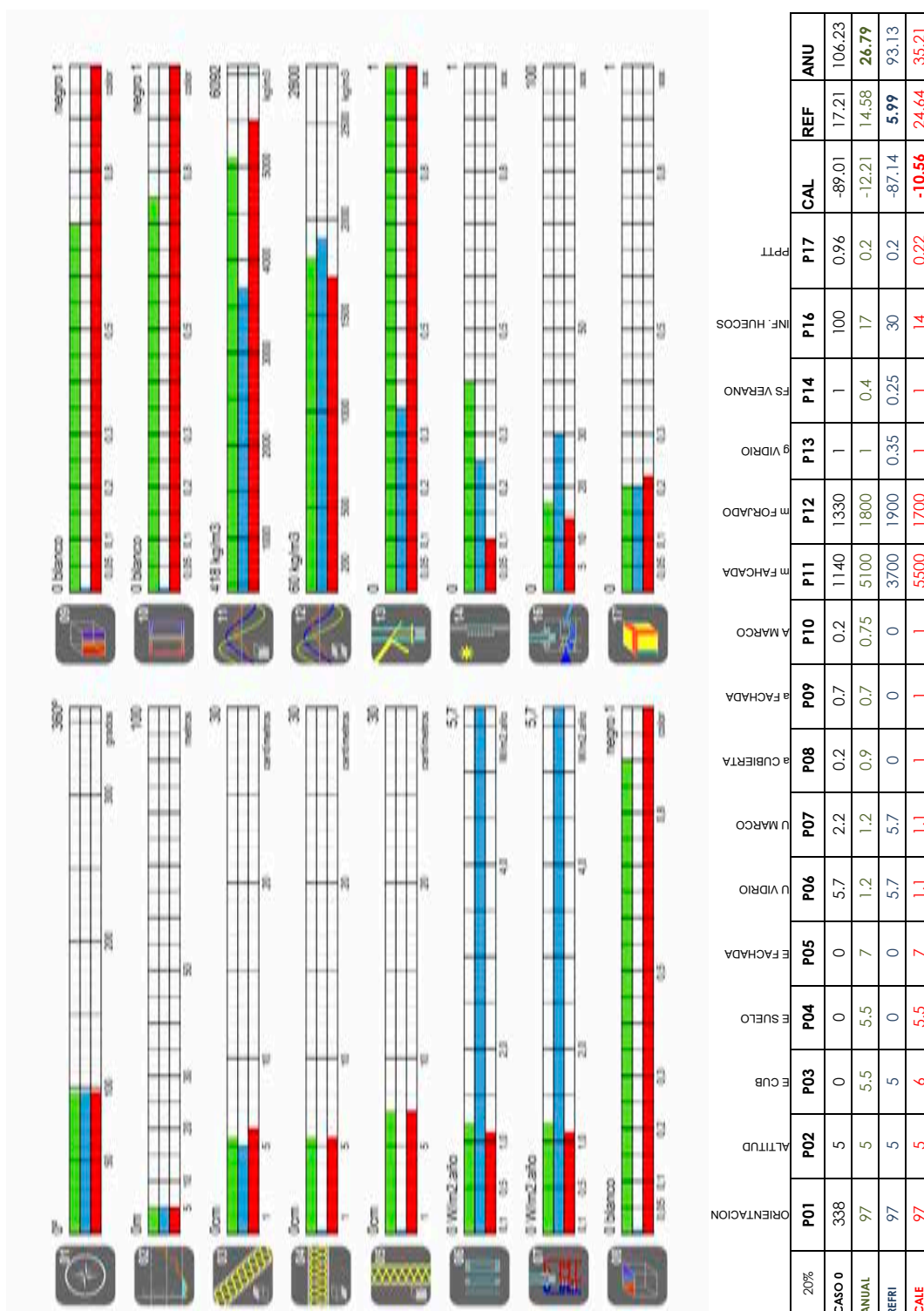


Figura 4.5.9. Valores óptimos para el modelo 3 en los tres periodos considerados, con los valores de orientación y altitud originales y aceptando un valor con un 20% de diferencia respecto al mejor

4.5.3. Optimización edificio 4, Edificio Escalonado Babilonia

En este caso la orientación se muestra algo más influyente que en los dos modelos del conjunto hexagonal. Realizamos los dos supuestos.

TABLA 4.5.4.a. VALORES DE LOS PARÁMETROS QUE OPTIMIZAN LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL EDIFICIO 4, ADMITIENDO UNA VARIACIÓN MÁXIMA DE UN 10% Y UN 20% (kWh/m².año)

	ORIENTACIÓN (°)	ALTITUD (m)	e CUBIERTA (cm)	e SUELO (cm)	e FACHADA (cm)	U VIDRIO (W/m ² K)	U MARCO (W/m ² K)	α CUBIERTA	α FACHADA	α MARCO	m FACHADA (kg/m ³)	m FORJADOS (kg/m ³)	g VIDRIO (W/W)	FS VERANO (W/W)	INF. HUECOS (m ² /h.m ²)	P.P.T.T. (W/mK)
CASO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P16	P17
0	58	5	0	0	0	5.7	2.2	0.2	0.7	0.2	1140	1330	1	1	100	0.96
ANU	58-0	5	8-5.5	9-5.5	17-7	0.7-1.2	0.7-1.4	0.9-0.9	0.7-0.8	0.6-0.7	5700-5300	2150-1750	1-1	0.30-0.40	7-17	0.1-0.2
CAL	58-0	5	8-5.5	8.5-5.5	17.5-7	0.6-1.1	0.6-1.2	0.9-1	0.9-0.9	0.65-0.8	5800-5700	2050-1750	1-1	1-1	5-12	0.1-0.23
REF	58-180	5	6-5	0-0	0-0	5.7-5.7	5.7-5.7	0-0	0-0	0-0	4400-3600	2250-1900	0.35-0.35	0.2-0.25	24-32	0.15-0.2

Nota: se indica el rango con 10%-20%

TABLA 4.5.4.b. RESULTADOS DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m².año) DE LA OPTIMIZACIÓN DEL EDIFICIO 4 CON LA ORIENTACIÓN ORIGINAL. VARIACIÓN SOBRE LA DEMANDA MÍNIMA DEL 10 Y 20%

Orientación Original (338°)	Calefacción		Refrigeración		Anual	
Caso 0	-79.26		17.47		96.73	
	10%	20%	10%	20%	10%	20%
Anual Optimizado	-3.61	-9.59	11.96	13.76	15.57	23.36
Refrigeración Optimizado	-68.72	-71.84	4.99	5.48	73.71	77.32
Calefacción Optimizado	-3.23	-8.61	23.49	23.67	26.71	32.28

TABLA 4.5.4.c. RESULTADOS DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m².año) DE LA OPTIMIZACIÓN DEL EDIFICIO 4 CON LA ORIENTACIÓN ÓPTIMA EN CADA PERIODO. VARIACIÓN SOBRE LA DEMANDA MÍNIMA DEL 10 Y 20%

Orientación Optimizada	Calefacción		Refrigeración		Anual	
Caso 0	-79.26		17.47		96.73	
	10%	20%	10%	20%	10%	20%
Anual Opt. 0°	-2.65	-7.76	10.82	12.50	13.47	20.26
Refrigeración Opt. 180°	-70.79	-73.97	4.85	5.29	75.63	79.27
Calefacción Opt. 0°	-2.34	-6.90	20.71	21.02	23.05	27.92

Una vez optimizados los valores de los parámetros matéricos, la orientación puede mejorar entre una y tres unidades la demanda en calefacción y anual. En refrigeración la influencia es mínima. Exponemos los resultados en función de su influencia (fig. 4.4.4.).

Calefacción

- La U de los vidrios debe ser baja, entre 0,7 y 1,2 W/m²K
- La TTL de los puentes térmicos será mínima
- Factor solar del vidrio máximo.
- La U de los marcos será baja, entre 0,6 y 1,2 W/m²K.
- Aislamiento de suelo y cubierta entre 5,5 y 8 cm
- Aislamiento de fachada opaca de 7 cm., descartando 17,5 cm por excesivo.
- Las absorptancias serán máximas, especialmente las de los marcos.
- Las masas de la envolvente, máximas, más influyentes las de los forjados.
- Infiltración de aire en huecos, mínima, con clases 3 o 4.

Refrigeración

- Máxima protección solar estacional de huecos (FS menor a 0,25)
- Valores bajos de factor solar g de los vidrios (0,3)
- Las absorptancias mínimas en la envolvente, principalmente de los marcos.
- La TTL de los puentes térmicos será baja, sobre 0,2 W/mK
- Masas de forjados y fachada alta. Permite reducirla respecto a calefacción.
- U de vidrios y marcos poco aislante, con valor máximo.
- Solo necesitamos aislamiento en cubierta, en torno a 5 cm. Podemos optar por no aislar fachada y suelo.
- U de vidrios y marcos máxima. Su mejora produce aumento de la demanda.

Anual

- La TTL de los puentes térmicos será baja
- La U de los vidrios y marcos baja, entre 0,7 y 1,4 W/m²K
- Factor solar del vidrio alto, y protección solar estacional de huecos alta
- Los espesores de aislamientos térmicos, como en calefacción.
- En el resto, valores parecidos a la calefacción.

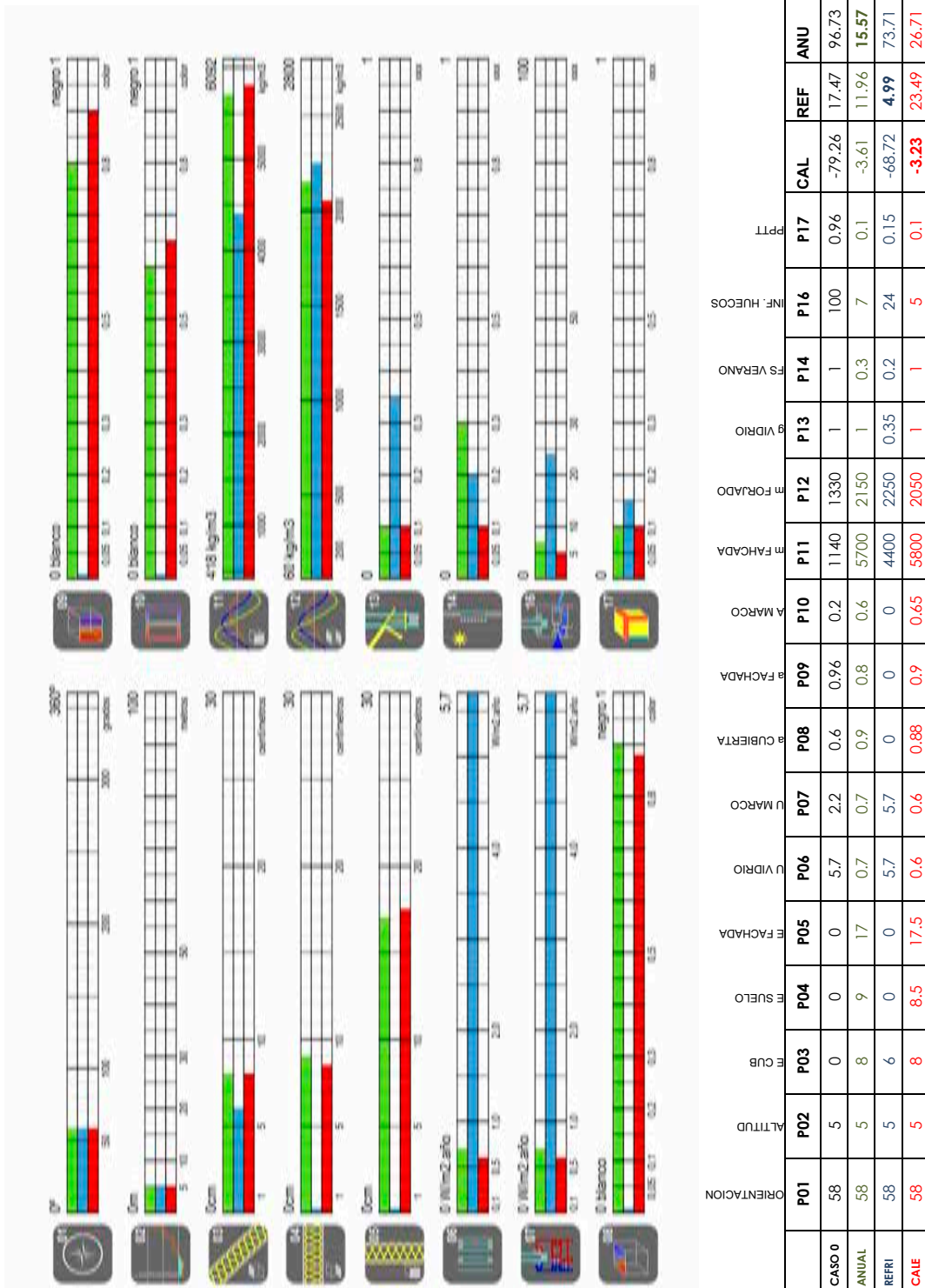


Figura 4.5.10. Valores óptimos para el modelo 4 en los tres periodos considerados, con los valores de orientación originales y aceptando un valor con un 10% de diferencia respecto al mejor

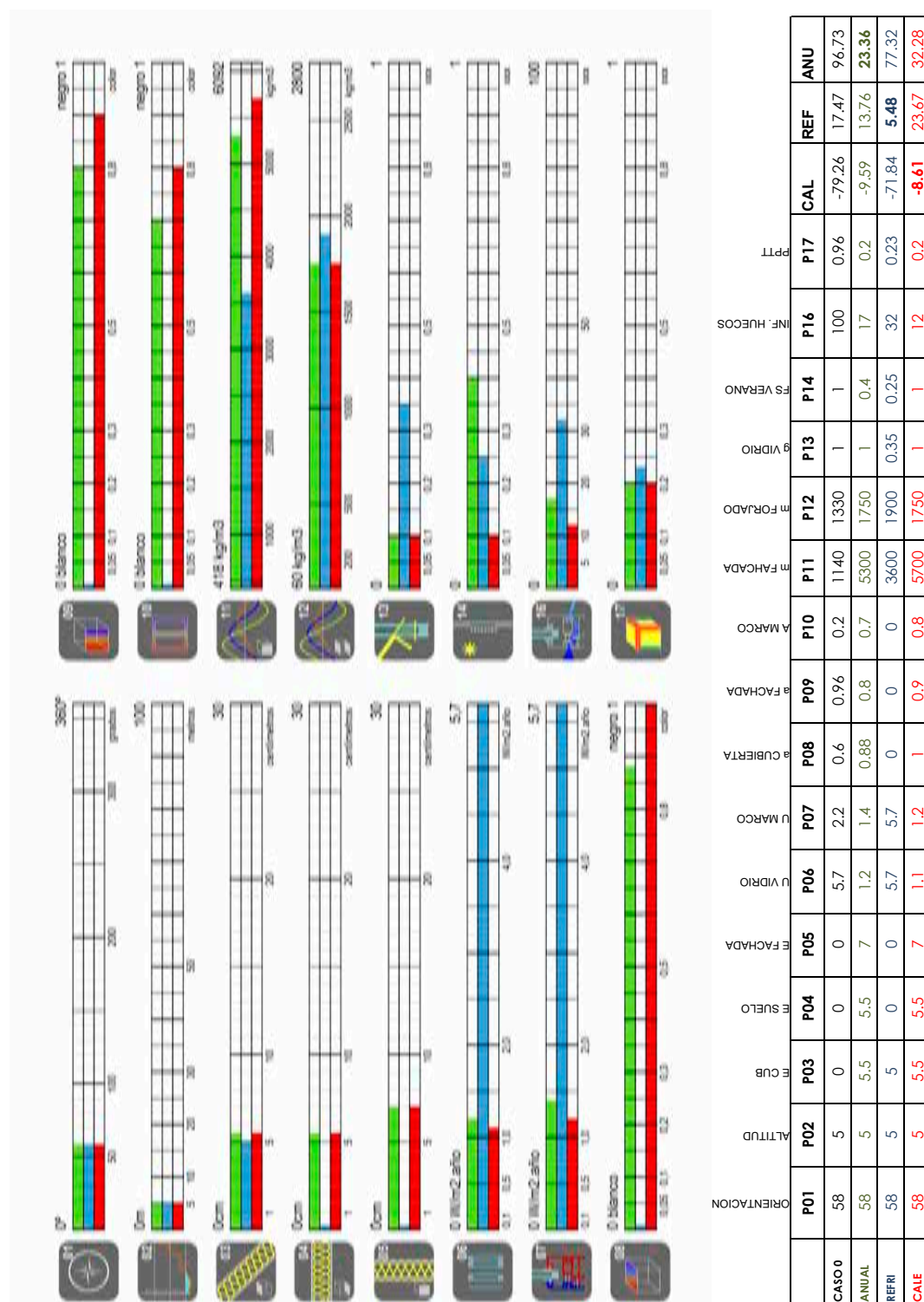


Figura 4.5.11. Valores óptimos para el modelo 4 en los tres periodos considerados, con los valores de orientación originales y aceptando un valor con un 20% de diferencia respecto al mejor

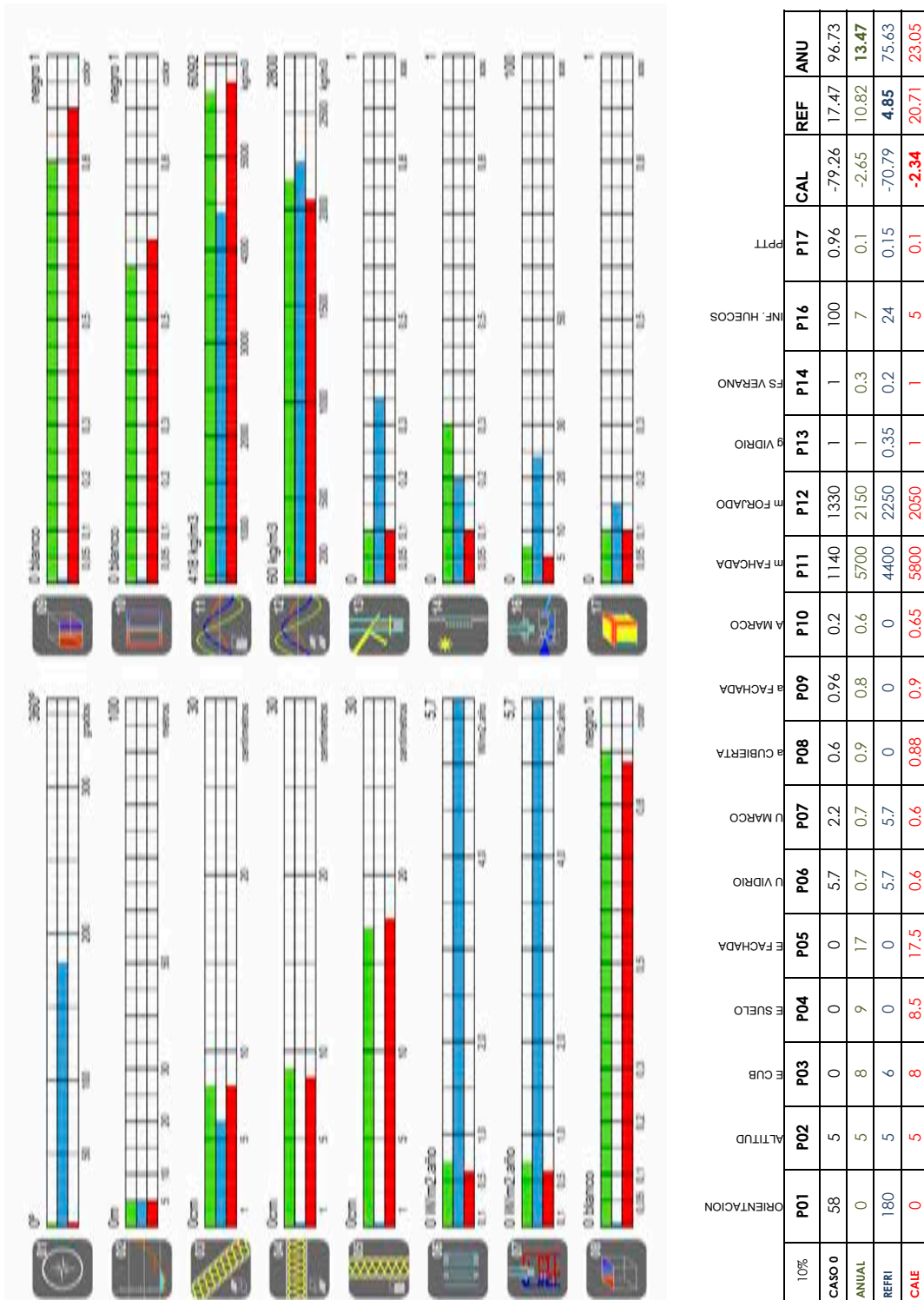


Figura 4.5.12. Valores óptimos para el modelo 4 en los tres periodos considerados, con los valores de orientación óptima y aceptando un valor con un 10% de diferencia respecto al mejor

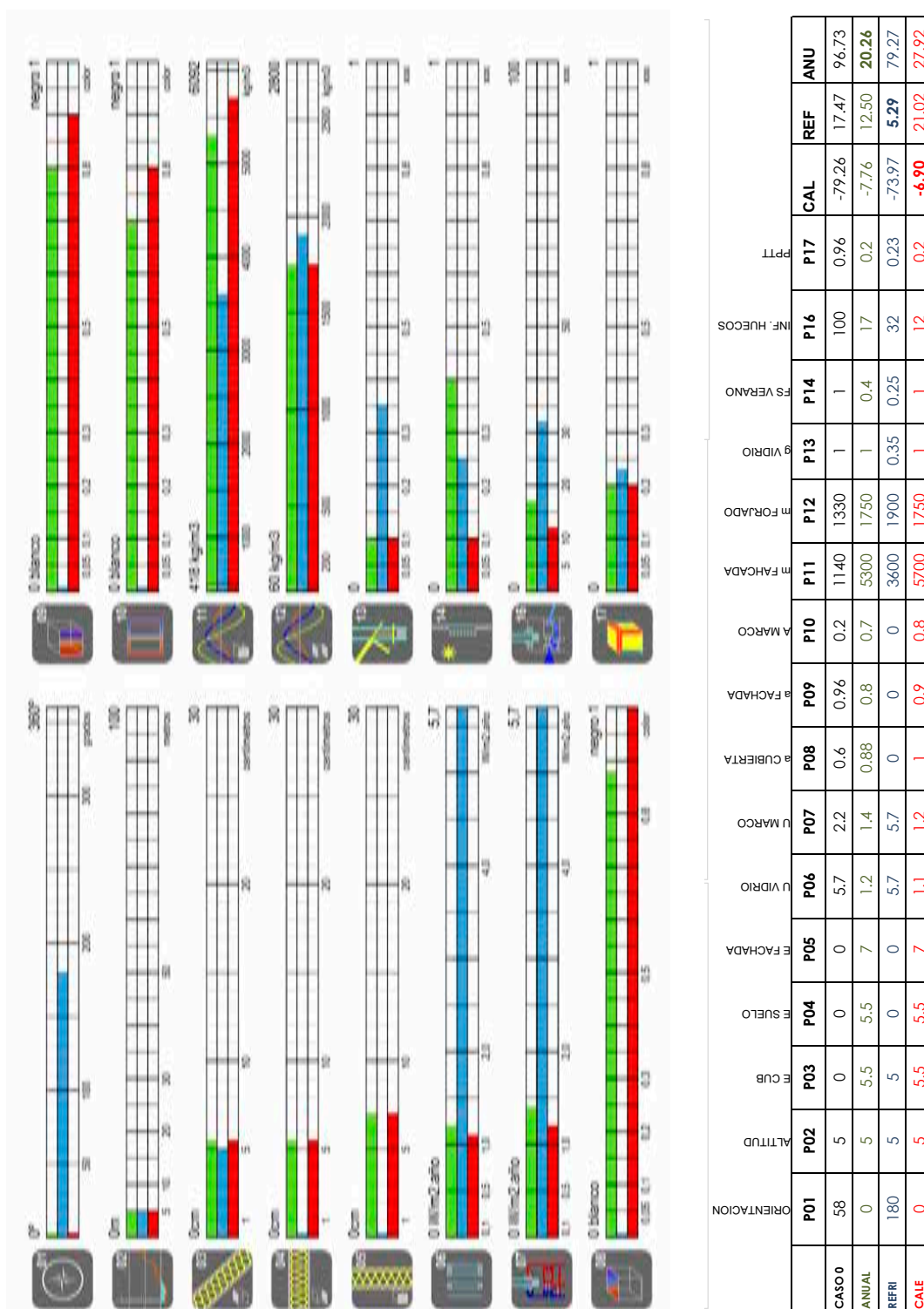


Figura 4.5.13. Valores óptimos para el modelo 4 en los tres periodos considerados, con los valores de orientación óptima y aceptando un valor con un 20% de diferencia respecto al mejor



V. DISCUSIÓN

V. DISCUSIÓN

En la búsqueda de una arquitectura de consumo energético casi nulo es necesario diseñar edificios con demandas energéticas muy bajas.

Hemos estudiado alrededor de 82 000 casos generados a partir de cuatro modelos, seleccionados en una misma zona climática y proyectados por el mismo arquitecto, con técnicas constructivas similares y en la misma época. El número total de datos analizados se acerca al millón.

Son edificios representativos de la arquitectura del Movimiento Moderno, con características compositivas que las hacen ser obras singulares y de gran interés arquitectónico. Su diseño es un invariante en la investigación: hemos evaluado su comportamiento al modificar parámetros relacionados su materialidad -que hemos denominado matéricos, en referencia al efecto plástico que aporta la definición material y constructiva a una obra arquitectónica- para conocer su influencia.

Los cuatro modelos seleccionados abarcan distintas tipologías, desde un edificio muy pequeño, representado por el Conjunto Maralet, hasta una torre de dieciséis plantas, pasando por una bloque de vivienda colectiva de tres plantas y el escalonado de cuatro. La compacidad¹ de los cuatro modelos es distinta, siendo la Torre Hexagonal el más compacto y el Maralet el menos.

- Modelo 1	Compacidad	0,63 m
	Volumen habitable	94,99 m ³
	Superficie habitable	44,00 m ²
- Modelo 2	compacidad	2,71 m
	Volumen habitable	8 828,28 m ³
	Superficie habitable	3 514,27 m ²
- Modelo 3	compacidad	1,34 m
	Volumen habitable	1 219,12 m ³
	Superficie habitable	473,47 m ²
- Modelo 4	compacidad	1,65 m
	Volumen habitable	1 347,53 m ³
	Superficie habitable	529,01 m ²

¹ La compacidad C , expresada en m., es la relación entre el volumen V encerrado por la envolvente térmica y la suma de las superficies S de dicha envolvente. $C=V/S$ [m]

Los edificios, tal como fueron proyectados y construidos por el arquitecto Antonio Bonet Castellana, muestran un comportamiento energético distinto según el periodo del año analizado.

En el periodo de refrigeración los cuatro edificios analizados muestran un buen comportamiento: de hecho, algunos de ellos incluso cumplirían la limitación de demanda energética de refrigeración actual sin ninguna modificación, con demandas de refrigeración entre los 13,01 y los 22,62 kWh/m².año, próximas al valor límite exigido actualmente por el Código Técnico de la Edificación (CTE), establecido en 15 kWh/m².año para la zona climática B3.

En el periodo de calefacción, los resultados de demanda son elevados, como era de esperar dada su construcción muy poco aislada. Los resultados de demanda de obtenidos están entre 56 y 145 kWh/m².año. Superan entre un 270 y un 865% la actual exigencia del CTE establecida en 15 kWh/m².año.

Si actualizamos las técnicas constructivas y empleamos materiales y sistemas con prestaciones térmicas superiores a las de la época, los edificios mejoran sistemáticamente en su comportamiento en calefacción sin alterar su configuración arquitectónica. Será necesario utilizar vidrios y marcos con transmitancia térmica inferior a 1,2 W/m²K, reduciendo de la transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos por debajo de los 0,2 W/mK y con espesores de aislamiento térmicos² entre 5 y 8 centímetros (el valor inferior para la Torre Hexagonal -más compacta-, y el superior para el Conjunto Maralet -menos compacto-).

Con la combinación correcta de parámetros matéricos podemos llegar a reducir la demanda de calefacción hasta niveles mínimos -casi nulos-, lo que nos puede indicar que el factor tecnológico y constructivo es poco relevante frente al resto de variables relacionadas con el diseño del edificio³.

En refrigeración -verano-, por el contrario, los edificios parten de unos datos muy buenos de demanda energética. Las consideraciones del arquitecto frente a la protección solar de los huecos unido al efecto beneficioso de una envolvente poco aislada -como deducimos del análisis de resultados- colocan a los cuatro edificios en buena posición.

2 Se ha considerado un aislamiento de conductividad térmica $\lambda=0,029$ W/mK.

3 Compacidad, proporción y situación de los huecos, alturas libres, anchos de crujía, algunos tan relacionados con las premisas del Movimiento Moderno como la elevación del edificio sobre pilotes.

Los parámetros más determinantes en este periodo están relacionados con la radiación solar: *factor solar* de los vidrios, *protecciones solares específicas* de los huecos en verano (factor de sombra) y *color* de la envolvente (*absortancia α*), son los tres parámetros a cuya variación son más sensibles los edificios, seguidos de los *puentes térmicos* y en menor medida el aislamiento térmico en la cubierta.

Se puede inferir, por todo ello, que el diseño arquitectónico de las piezas está correctamente planteado para el uso estacional al que están destinadas: el uso turístico para el verano. Este hecho puede ser un punto de partida para replantearse las exigencias normativas y otorgar mayor relevancia al uso real al que va a ser destinado un edificio, dado que observamos que tanto los parámetros más influyentes como las posibilidades de mejora de demanda energética tienen un marcado componente estacional.

Los edificios, por tanto, muestran distinta sensibilidad a la variación de los parámetros matéricos estudiados según el periodo analizado.

Por todo ello, y dado que confirmamos que la influencia de cada parámetro objeto de estudio varía en función de la estación del año analizada.

Realizamos, seguidamente, la discusión de resultados organizada por parámetros, analizando su comportamiento estacional y anual. Posteriormente expondremos su influencia en los tres periodos considerados, evaluada a través del R^2 o coeficiente de determinación.

Recordamos que este coeficiente mide cuanto de las diferencias observadas entre las demandas energéticas puede explicar el parámetro. Lo expresamos en porcentaje⁴.

También observamos como se comportan las medias de las demandas a través de la curva de regresión representada en las gráficas del Anejo 1, para indicar los valores que aportan mejoras energéticas: señalaremos las diferencias porcentuales y en valor absoluto entre los valores máximo y mínimo, expresadas en kWh/m².año.

4 Un R^2 próximo a 100% indica que casi todas las diferencias encontradas entre las demandas de los casos se podrían explicar por la variación de ese parámetro. La demanda energética de un edificio dependerá mucho del valor que tome dicho parámetro.

Un R^2 próximo a 0% indica que las diferencias encontradas entre las demandas de los casos no se podría explicar por la variación del parámetro. Por tanto el valor que tomara dicho parámetro en un edificio no influirá prácticamente en su demanda energética.

5.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS POR PARÁMETROS

P1 Orientación

En general, la orientación se muestra más influyente en invierno que en verano. En los casos basados en el Modelo 1⁵, la influencia del parámetro es la mayor de todos (en los tres periodos analizados -calefacción, refrigeración y anual-). En invierno se sitúa entre las más influyentes.

De los cuatro modelos hay dos, los basados en el Conjunto Hexagonal, en los que la orientación tiene escasa influencia: al ser edificios con un diseño sensiblemente simétrico en planta, la modificación de la orientación no altera en gran medida la incidencia solar en el conjunto. Así pues, en los modelos basados en los edificios 2 y 3 la orientación no es influyente en ninguna época del año. Este hecho ocurre tanto en los test uniparamétricos, donde solo variamos el P1, hasta en los muestreos multiparamétricos. La diferencia entre los mejores y los peores resultados de demandas medias llega, en el Modelo 1, al 30,48% en calefacción y al 27,44% en refrigeración.

Los resultados de calefacción de los test uniparamétricos arrojan unas posibilidades de mejora relevantes pero los muestreos multiparamétricos tienen una menor determinación en la variabilidad de la demanda que, recordemos, no quiere decir que mejore o empeore la demanda del edificio sino que se muestra o no determinante en la variación del resultado. Este hecho puede ser debido a que una correcta orientación de los huecos provoca una mayor captación de radiación solar, que reduce la demanda de calefacción, pero la acción combinada con el resto de parámetros matéricos puede anular este efecto: la incorrecta orientación de los huecos provoca lo contrario.

Una explicación posible a que en verano la influencia del parámetro ajustada por los demás (que mide el R^2) sea menor es que la incorrecta orientación de los huecos -los más soleados-, puede ser corregida tanto con una protección solar adecuada (P14), como con un factor solar g bajo (P13), por lo que la determinación en la variabilidad de la demanda cae.

5 En adelante nos referiremos como Modelo N a los resultados de los 10.000 casos generados a partir del modelo N.

P2 Altitud

En todos los casos se muestra como un parámetro poco relevante, tanto en su variación individual como en la combinada con el resto. Recordemos que hemos seleccionado la zona climática B3 de la Región de Murcia, donde la altitud únicamente varía de 0 a 100 metros, poca diferencia para ser determinante.

La variación media de las demandas no pasa del 4% en calefacción ni en refrigeración. Aun así, y dado que hablamos de la determinación mostrada en la variación de la demanda entre los casos de estudio, el parámetro podrá influir a un caso concreto aunque no es esperable que lo haga en gran medida.

No es un factor a considerar y lo descartamos como influyente en los resultados que analizamos.

P3 Espesor del aislamiento térmico de la cubierta

Este parámetro, relacionado con los que reducen la transmisión de calor del edificio, se muestra más influyente en invierno que en verano.

En invierno, los valores de espesor de la capa aislamiento térmico⁶ óptimo se sitúan entre los 4 cm del edificio más compacto y los 5.5 cm de los menos. El máximo de aislamiento a partir del cual no se obtiene una reducción sustancial de la demanda de calefacción es 9 cm. En los edificios más pequeños la influencia en invierno es mayor y el espesor óptimo aumenta: necesitaremos aislarlos más. Parece lógico, dado que la proporción de la cubierta en relación con la envolvente total es mayor y, además, son menos compactos. Se obtienen mejoras medias en torno al 30% -salvo en los casos basados en la Torre Hexagonal donde la cubierta ocupa muy poca proporción de la envolvente y baja hasta el 8%.

Este es el único parámetro, de los tres de espesor aislamiento térmico estudiados, que muestra influencia en la demanda energética de refrigeración. En los edificios basados en el Modelo 1, el espesor óptimo se sitúa en 5 cm., bajando hasta 4 cm en el Modelo 2. En consecuencia, es necesario un menor grado de aislamiento en cubierta para una situación de verano, pero es un parámetro influyente. Producen variaciones en la demanda entre el 12 y el 22% -salvo en el Modelo 2, por razonamiento análogo-.

6 Recordemos que se ha considerado un aislamiento térmico con $\lambda=0.029$ W/mK

Es destacable -lo discutiremos en el apartado correspondiente- que la absorción de la cubierta se muestra más influyente que su aislamiento: el color muestra mayor determinación en la demanda de refrigeración.

En un ciclo anual es un parámetro importante: está situado entre los más determinantes, salvo en el caso del Modelo 2. Los espesores óptimos quedan como en la situación de invierno y cerca de la de verano (de 4 a 5,5 cm).

P4 Espesor del aislamiento térmico del suelo

Los cuatro modelos están proyectados sobre pilotis, separados del terreno, por lo que el suelo queda en contacto con el aire exterior.

El parámetro se muestra influyente en invierno pero no en verano. Lo primero que hay que destacar, por tanto es que el aislamiento térmico de los suelos no influye prácticamente en la variación de la demanda de refrigeración en todos los casos de estudio pudiendo, incluso, producir un pequeño incremento al aumentar su espesor. La curva de regresión de las medias es sensiblemente plana, con variaciones menores al 4,5%.

En invierno, está situado entre los más influyentes en los edificios menos compactos (modelos 1 y 3), quedando entre los cuatro primeros, por delante incluso de cubierta (P3) y fachada (P4), superado por los puentes térmicos y los dos valores relacionados con los vidrios (P6 y P13). Las posibilidades de mejora de la demanda de calefacción llegan hasta el 40,20%.

Los espesores óptimos de aislamiento, para minimizar la demanda de calefacción, quedan entre los 4 y los 5,5 cm, parecidos a los de cubierta. Son los primeros centímetros de aislamiento los que reducen con mayor intensidad la demanda. En el Modelo 2, la Torre Hexagonal, queda por detrás del espesor de la fachada, lo que resulta lógico, dada la proporción que representan ambas en la envolvente térmica. Aun así puede representar hasta un 13,41% de reducción media.

En refrigeración, su influencia es mínima: podemos no incluir capa de aislamiento térmico en el suelo y conseguir una demanda óptima en verano. No es relevante, por lo tanto, este parámetro en la situación estival siendo, en ocasiones, contraproducente, es decir, que aumentando el aislamiento aumenta ligeramente la demanda, por lo que deberemos buscar una combinación que solucione las necesidades del invierno sin perjudicar el verano.

Si atendemos a un ciclo anual completo, la influencia del parámetro es considerable, dado que la calefacción supone evaluar ocho de los doce meses del año. El espesor para la optimización es similar al indicado en calefacción (de 4 a 5.5 cm).

Los valores óptimos de P4, por tanto, son moderados y no suponen un gran condicionante en la construcción de los edificios.

P5 Espesor del aislamiento térmico de la fachada opaca

Salvo en el caso de la Torre Hexagonal, donde como hemos comentado la proporción de la fachada es muy grande en la envolvente, P5 es el parámetro que menos determinación muestra en la variabilidad de la demanda energética de este grupo de tres, de espesor de aislamiento térmico de los cerramientos opacos.

En invierno, aun quedando entre los más influyentes, no está en las primeras posiciones. Las posibilidades medias de mejora están entre el 23,22% y el 31,53%, con reducciones de hasta 20,35 kWh/m².año.

En verano su influencia es casi nula: como ha ocurrido con P4, con variaciones medias de las demandas no superan los 0,30 kWh/m².año (hasta un 2,25%) y R² próximo a cero. No parece necesario mejorar el aislamiento térmico de la fachada para conseguir un edificio optimizado en energéticamente en verano -así está planteado en los casos óptimos. Es uno de los asuntos más destacables de los resultados.

Los edificios se muestran menos sensibles a la variación de este parámetro que a la de los dos anteriores. En calefacción, necesitaremos más espesor de aislamiento en fachada que en cubierta o suelo. Dicho de otra manera, para reducir la demanda energética cada centímetro de aislamiento en fachada es menos efectivo que en el resto de la envolvente. Este efecto se acentúa en edificios poco compactos.

Los espesores óptimos en invierno suben, quedando entre los 6 y los 8 cm. A partir de ahí habrá que aumentar mucho el espesor para conseguir reducciones importantes de la demanda: hemos observado que para mejorar un 10% en los casos basados en el modelo 1 hay que llegar a 17,5 cm.

La poca compacidad -como la que suelen presentar los edificios pequeños- conlleva un mayor espesor de aislamiento en fachadas para mejorar la demanda de calefacción.

Como ya hemos señalado, en verano el espesor óptimo es nulo. No es necesaria capa de aislamiento térmico específica, lo que implica que una envolvente poco aislada en fachada y suelo funciona bien en esta época del año. También observamos que, en algunos casos, mejorar el aislamiento supone aumentar ligeramente la demanda de verano, como ocurrió en los test uniparamétricos. El edificio disipa el calor interno con mayor facilidad en las horas del día en las que las condiciones exteriores son favorables y aislarlo en exceso, como se infiere de esta investigación, puede ser contraproducente.

En un ciclo anual completo, los espesores que optimizan la demanda quedan en los mismos valores que en invierno. Hay que recordar que en valor absoluto, la demanda de calefacción supone una gran proporción de la demanda anual.

P6 Transmitancia térmica U de los vidrios

En condiciones de invierno queda situado, en tres de los cuatro grupos de casos, en primera posición (el más determinante en la variabilidad de la demanda). En la Torre Hexagonal, el coeficiente de determinación supera el 40%. Solo en el modelo 1 queda en tercera posición, tras puentes térmicos y factor solar del vidrio. Puede representar diferencia media entre las demandas de calefacción entre los casos de estudio de hasta un 65,24% -en el Modelo 2 la variación llega a 23,07 kWh/m².año-, siendo en el menor de los casos de un 40,86%. Es, por tanto, un parámetro muy determinante en invierno.

En condiciones de verano también se muestra influyente, no tanto como en invierno, pero dentro del grupo de parámetros más determinantes. Las diferencias entre las demandas medias de refrigeración están entre el 10,89% y el 15,99%.

Sin embargo, el signo en el que se comporta mejor el edificio es contrario según la estación analizada, es decir, una U baja beneficia el invierno pero perjudica ligeramente el verano.

Este hecho, unido a lo comentado en los dos parámetros anteriores sobre la irrelevancia en verano de aislar fachadas y suelos, nos lleva a que una envolvente muy aislada puede ser contraproducente para la demanda de refrigeración. Además, nos indica que los vidrios de altas prestaciones y, por lo tanto, de alto coste, solo se muestran efectivos en condiciones de invierno y generan un efecto ligeramente desfavorable en verano.

Los valores óptimos en calefacción quedan en el entorno de $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$, con pocas diferencias según el tipo de edificio. En verano, por el contrario, el mejor resultado lo aporta el vidrio menos aislante considerado en la investigación, un vidrio monolítico de $U=5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

En un ciclo anual, el parámetro se muestra también muy influyente, con valores óptimos ligeramente superiores a los de calefacción, entorno a $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ para todos los casos de estudio.

P7 Transmitancia térmica U de los marcos

La influencia de este parámetro está muy relacionada con el anterior. En el conjunto que configura el hueco, la proporción de marco es menor que la del vidrio, según cada tipo.

La influencia sobre la variación de la demanda es alta, siendo mayor en invierno que en verano. La demanda de calefacción media puede variar entre un 15,55% y un 30,86%. La de refrigeración, entre un 6,95% y un 10,60%. Se comporta en el mismo sentido que el parámetro P6 es decir, los valores de marcos muy aislantes benefician el invierno y perjudican ligeramente el verano.

Los valores que optimizan la demanda, tanto anual como de calefacción son muy parecidos al parámetro anterior, en el entorno de $1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Cuando observamos el ciclo estival, la situación pasa al otro extremo, lo que permite utilizar marcos sin prestaciones singulares, como un metal sin rotura de puente térmico, por ejemplo, con U de $5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Por todo esto, la transmitancia térmica de los huecos (como un conjunto de parte semitransparente y parte opaca) es muy influyente en los tres periodos analizados y deberá ser baja, con valores en torno a la unidad, para favorecer el comportamiento de la calefacción y anual pero sabiendo que aumentará ligeramente la demanda de refrigeración: es muy destacable que si lo que pretendemos es favorecer el comportamiento en verano nos interesará la situación contraria, es decir, unos huecos muy poco aislantes, con marcos metálicos sin prestaciones especiales y vidrios que podrían ser incluso monolíticos.

Al margen de aspectos energéticos, sabemos que este tipo de vidrios y marcos, con conductividad térmica muy alta, pueden generar problemas en los edificios

relacionados, por ejemplo, con las condensaciones superficiales en invierno (son muchas las prestaciones que un solo sistema constructivo debe cumplir), por lo que no es recomendable ir a valores tan extremos pero se infiere de la investigación que no habrá que sobreaislarlos para que el edificio funcione adecuadamente en verano.

Podríamos aportar otra forma de verlo: si el hueco necesita ser muy aislante para llegar a la demanda exigida de calefacción, deberá ser fácilmente modificable para que no nos penalice en verano: un “*hueco perfectible*” que favorezca la disipación de energía interior en verano, permitiendo mejoras en su comportamiento según las condiciones exteriores, como propuso el profesor Ignacio Paricio en el Proyecto Casa Barcelona en 2001.⁷

Deberemos analizarlo con el resto de factores que dependen del elemento constructivo en cuestión, como la permeabilidad al aire o el factor solar de los vidrios.

P8 Absortancia de la cubierta

El parámetro se muestra más influyente en verano que en invierno.

En los edificios pequeños, con mayor proporción de cubierta, la determinación sobre la variabilidad de la demanda de refrigeración es alta. En el Modelo 1 alcanza la tercera posición, solo superado por el factor de sombra de los huecos y el factor solar de los vidrios. La variación de las demandas medias de refrigeración puede llegar hasta el 25,49% (hasta 4,79 kWh/m².año). El parámetro, por tanto, es muy relevante en verano. Los valores cercanos al cero -colores claros y reflectantes-, son los que optimizan la demanda de refrigeración, como es bien conocido.

En calefacción no es tan influyente, quedando en una posición intermedia, con valores que mejoran la demanda -como cabía esperar- cercanos a la unidad: colores oscuros y absorbentes, que captan mayor cantidad de radiación solar. La variación de las demandas medias llega hasta el 12,5% con un mínimo del 3,85% en el Modelo 2.

En el ciclo anual es un valor que se muestra poco relevante, pero sitúa los

⁷ La innovación de la denominada “ventana perfectible” busca un potencial de expansión y flexibilidad en la composición del hueco, que prevé y permite mejoras en su comportamiento energético (Paricio et al., 2001)

valores óptimos más cerca de los de calefacción, es decir, con unas absorciones en el entorno de 0,7, aunque no en todos los casos: las diferencias en los resultados son sutiles por lo que el valor deberá ser seleccionado para mejorar la época en la que más se vaya a utilizar el edificio.

Parece que se confirma lo que conocemos de la arquitectura popular (y de las lecciones de los autores comentados en el capítulo 2), que un color blanco (claro, de absorción baja) ayuda a disminuir la demanda energética en verano. Si el edificio es pequeño -o tiene gran superficie de cubierta- el efecto se acentúa y puede ser un parámetro fundamental que considerar.

P9 Absorción de la fachada opaca

Los tres parámetros seleccionados de absorción se comportan de un modo parecido, es decir, se muestran muy influyentes en condiciones de verano y menos en invierno.

Un aspecto a destacar, que se sale fuera de lo esperable, es que resulta menos determinante en la variabilidad de la demanda de refrigeración que el parámetro de absorción de los marcos a pesar de las grandes diferencias en la proporción ocupada en la envolvente. También queda por debajo del de cubierta, por lo que es el menos influyente de los tres.

La variación de las demandas medias de calefacción quedan entre el 6,81% y el 12,17%. En refrigeración pasa a ser entre 8,59% y el 18,20%.

Respecto a los valores óptimos, en los tres casos nos encontramos una situación similar y que confirma lo que cabía esperar: en calefacción los valores de absorción altos mejoran la demanda y en refrigeración los bajos.

Deberemos llegar a un equilibrio al tomar la decisión sobre el color y material del edificio considerando la estación en la que va a ser utilizado principalmente.

Nos lleva también a plantear lo aportado anteriormente: el uso estacional de la arquitectura debe ser planteado como uno de los factores a considerar a la hora de exigirle a un edificio unas condiciones energéticas determinadas.

P10 Absortancia de los marcos de los huecos

Situado inicialmente en tercer lugar en la numeración de los parámetros de absortancia -debido, probablemente, a un prejuicio sobre su relevancia-, este parámetro queda como el más influyente de los de color en tres de los cuatro modelos seleccionados. Solo en el modelo 1 es superado por la cubierta y siempre se muestra más influyente que la fachada opaca. Este es un hecho muy destacable, dado que descartamos la relación con la proporción de la envolvente (de los tres es, con diferencia, el que menos superficie ocupa en ella).

Es de reseñar la importancia que muestra en los casos basados en la Torre Hexagonal (Modelo 2), ya que puede modificar la demanda de refrigeración media hasta en un 30,06% (comparado con el 8,59% que lo hace la absortancia de fachada y 4,58% la de cubierta) y la demanda de calefacción media en un 16,24% (respecto al 7,52% de fachada y 3,85% de cubierta). Teniendo en cuenta que llega a ser el tercer parámetro más influyente en refrigeración, se muestra como una variable fundamental para los edificios en condiciones de verano.

En invierno, sin embargo, no es tan relevante pero nos puede ayudar a reducir en unas pocas unidades la demanda de calefacción, con variaciones entre el 12,22% y el 16,24%.

En el ciclo anual, con unos datos de demandas medias obtenidas que varían muy poco, es menos determinante pero sigue quedando como el parámetro de absortancia más influyente. Es un hecho muy destacable y que será objeto de nuevas investigaciones.

P11 Masa de la fachada opaca

Es uno de los parámetros menos influyentes en todos los periodos del año considerados. Queda en los últimos lugares, con valores que lo hacen poco o nada relevante.

Puede representar una variación de entre el 4,91% y el 5,93% de la demanda media de calefacción, y entre un 2,44% y un 6,91% la de refrigeración. Si observamos los resultados del test uniparamétrico, conseguía variaciones que llegaban a un 5% (de subida o bajada de la demanda), considerando que las demandas totales son, de partida, altas. En valor absoluto consiguieron subir o bajar entre 1 y 3 kWh/m².año. Su efecto combinado con el resto de parámetros se diluye, quedando como poco relevante.

Respecto a los valores que mejoran, aunque mínimamente, las demandas, son siempre altos, lo que indica que el aumento de la masa -que incrementa la inercia térmica del edificio- es positiva aunque no determinante.

P12 Masa de los forjados

Este parámetro muestra una influencia considerable en verano, menor en invierno.

En el periodo de refrigeración, queda entre el grupo seleccionado de los influyentes (con R^2 superior al 2%). Los valores de masa de forjado elevados mejoran el comportamiento del edificio en esta estación, obteniendo variaciones medias en la demanda que superan el 14,46%.

En invierno, según el caso, aporta un ligero efecto positivo, con valores algo menores a los indicados para verano, y variaciones medias superiores al 6,95%. Se puede inferir que la inercia térmica de los forjados mejora la demanda en los tres periodos, con mayor efecto sobre la demanda de refrigeración.

El efecto amortiguador de la inercia térmica parece que también se puede traducir en una reducción de la demanda⁸.

P13 Factor solar g del vidrio

Este es uno de los tres principales parámetros, que muestran una mayor influencia en los tres periodos estudiados.

En invierno se ha mostrado como el segundo factor más influyente en tres modelos y el tercero en uno. Las variaciones de las demandas medias en los cuatro muestreos son superiores al 27,27%, llegando hasta el 57,83% para el Modelo 2 (demandas que varían entre 14,13 y 33,65 kWh/m².año). Valores altos de factor solar g llevan a los mejores datos de demanda de calefacción. La captación pasiva de energía solar se convierte en una herramienta fundamental para mejorar el comportamiento del edificio y al cuantificarla se muestra muy determinante.

El valor óptimo para mejorar la calefacción será el máximo posible -hemos considerado en la investigación un vidrio monolítico y transparente con g de 0,85 -habría que compensar el bajo valor de U que presenta este tipo de vidrio

⁸ Hay que tener en cuenta que esta investigación únicamente valora el efecto de añadir o restar masa a los elementos constructivos de la envolvente y observar el comportamiento de la simulación.

en calefacción. Maximizar la captación solar de los huecos parece un requisito indispensable para alcanzar los objetivos de eficiencia energética.

En verano es el segundo parámetro más influyente, tras el factor de sombra estacional de los huecos (que tiene relación también con la radiación incidente). En este periodo es un valor bajo de factor solar g (menor que 0,35) el que minimiza la energía captada por radiación y ayuda a evitar el sobrecalentamiento del edificio. Ello conlleva una reducción de la demanda de refrigeración que puede representar hasta un 46,81% (con un mínimo del 36,26%).

En el ciclo anual también está entre los más influyentes y los valores que mejoran globalmente la demanda son los máximos, como en calefacción. Observamos que actúa en sentido contrario según la estación analizada, como hemos observado en otros.

El análisis de los parámetros relacionados con los huecos (P6, P7 y P13) nos lleva a cuestionarnos el prejuicio que dice que los huecos deben ser pequeños para reducir la demanda de calefacción. Parece que es al contrario: los huecos bien orientados -con posibilidad de captación solar- pueden tener un balance energético positivo.

Es, de nuevo, un factor relacionado con los huecos. Como hemos visto antes, la U del vidrio es un parámetro de gran influencia. También lo es la absorptancia de los marcos y será, como veremos a continuación, la protección solar de los mismos. Los huecos, por tanto, son los grandes protagonistas de los resultados de la investigación y en todos los casos de estudio.

P14 Factor de Sombra estacional en verano

Como hemos venido comentando, es un parámetro solo aplicable a los meses de verano, por lo que no interviene en el periodo de calefacción. Esto quiere decir que es un elemento que únicamente actúa cuando la radiación solar es negativa para el edificio y que desaparece cuando la captación es positiva, en invierno.

En todos los casos de estudio queda situado como el factor más determinante en la variabilidad de la demanda de refrigeración. En algunos casos, el R^2 llega a acercarse al 40%, con variaciones medias de la demanda de refrigeración entre el 39,59 y el 49,45%.

Este hecho provoca que sea fundamental en el ciclo anual, considerando que si en invierno el factor solar g debe ser alto, en verano podrá ser compensado con el factor de sombra estacional (protecciones solares). Los resultados llevan hacia la correcta orientación y tamaño de los huecos del edificio, para maximizar la captación solar en invierno y protección adecuada en verano: es un resultado evidente a priori, pero destacamos que se convierte en lo más importante, por encima de otras muchas consideraciones. De este modo queda cuantificada la influencia de estas estrategias de una arquitectura bioclimática.

P15 Ventilación

Este parámetro se ha mantenido fijo, aplicando los caudales que indica el documento básico DB HS3

P16 Infiltración de aire en los huecos

El parámetro es muy poco determinante en los tres periodos analizados: tanto en calefacción como en refrigeración y, por consiguiente, en un ciclo anual.

Los valores bajos de infiltración son los mejoran la demanda energética, aunque en pequeña cuantía, llegando hasta ser de un 8,56% en calefacción y de un 5,24% en refrigeración. Es menos exigente en verano, donde podemos aumentar la permeabilidad al aire de los huecos. En invierno -y en un año completo- es conveniente, aunque no determinante, que los huecos sean, al menos, clase 2, según la UNE EN 12207:2000.

P17 Transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos

Se muestra como uno de los tres factores más determinantes en la demanda de calefacción y en la anual. En varios casos es el primero, como en el Modelo 1. En todos los casos de estudio es el parámetro más importante entre los relacionados con aislamiento térmico de cerramientos opacos. La variación media de las demandas obtenidas están entre el 38,73% y el 45,69%, con fuertes descensos en valor absoluto de hasta 36,71 kWh/m².año.

Todos los edificios se muestran sensibles a la variación del aislamiento de los puentes térmicos en verano (o mejor dicho, a su eliminación, reduciendo la

transmitancia térmica lineal al mínimo), con variaciones entre las demandas medias de hasta un 25,19%. Este hecho es importante, dado que solo el aislamiento de las cubiertas mostraron cierta relevancia en esta estación, los huecos un efecto contrario y fachadas o suelos resultaron nada influyentes.

En todos los casos, el valor óptimo es el que reduce al máximo la transmisión térmica en estos puntos del edificio, con valores acotados entre 0,1 y 0,3 W/mK. En verano podemos optar por valores ligeramente mayores que en invierno, pero es siempre positivo para la demanda diseñar correctamente estas zonas, eliminando el denominado puente térmico.

5.2. DISCUSIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS

Hemos constatado que los parámetros que muestran mayor influencia en calefacción son, como norma general, distintos a los que lo hacen en refrigeración.

En invierno, las pérdidas por transmisión a través de la envolvente térmica son muy relevantes por lo que, a priori, un edificio poco compacto (con mayor proporción de superficie exterior respecto al volumen encerrado) parte en desventaja y necesitará estar más aislado. Constatamos la influencia positiva de la captación solar a través de los vidrios con la gran influencia mostrada por el parámetro que evalúa la modificación del factor solar de los mismos. Los parámetros más determinantes en este periodo son los mismos en los cuatro modelos, aunque ordenados de distinta forma. Los tres más influyentes son P6 (U del vidrio), P17 (puentes térmicos), P13 (factor solar g del vidrio)

Con la variación del tipo edificatorio se modifica la influencia de los parámetros. Al aumentar el tamaño del edificio, y volverse más compacto, apreciamos el incremento de la influencia de los relacionados con los huecos, principalmente con su transmitancia y su factor solar.

Respecto al aislamiento térmico de las partes opacas de la envolvente, como fachadas, cubiertas y suelos apreciamos que, a partir de ciertos espesores, la reducción de la demanda energética cae: podemos establecer valor óptimo del espesor del aislamiento a partir de ese punto.

Este efecto se ve aumentado en los edificios de menor tamaño y menor

compacidad: lo observamos en la curva logarítmica de las medias de demanda energética comparada de los casos basados en el Modelo 1, el menos compacto, y el 2, el más compacto. El descenso inicial, con los primeros centímetros de aislamiento, es menor en el Modelo 2 que en el 1.

El aumento de la masa de forjados y fachadas tiene un efecto positivo, con posibilidades de mejora de la demanda en torno al 7%. La reducción en las infiltraciones de los huecos puede reducirla hasta en un 8,56%.

En verano cambia la situación y los parámetros relacionados con la radiación solar son los más relevantes. Quedan en los primeros lugares los relacionados con la protección solar estacional de los huecos (P14) y el factor solar de los vidrios (P13), ocupando también un puesto importante los relacionados con la absorción (siendo el mejor posicionado el P10, absorción de los marcos).

Solo los puentes térmicos y, en menor medida, el aislamiento térmico de la cubierta se cuelean entre los más importantes de los relacionados con el aislamiento térmico de las partes opacas. El edificio se muestra poco o nada sensible a la variación de los aislamientos de fachada y suelo pudiendo producir, aunque ligeramente, un aumento en la demanda cuando aumenta su espesor.

Probablemente, los resultados más sorprendentes en esta estación sean los relacionados con aislamiento térmico de los huecos: su aumento conlleva un ligero empeoramiento de la demanda de refrigeración. El diseño de los huecos deberá considerar este hecho para contrarrestar este efecto negativo y seguir favoreciendo el comportamiento en el periodo de invierno.

Forjados y, en menor medida, fachadas de elevada masa favorecen el comportamiento del edificio en verano y pueden convertirse en elementos muy relevantes a considerar.

Las infiltraciones en los huecos se muestran poco influyentes, aunque pueden modificar ligeramente la demanda estival hasta un 5% de media.

Cuando buscamos edificios con demandas cercanas a cero, algunos parámetros que se han mostrado poco influyentes en el descenso del valor absoluto de ésta, pueden volverse fundamentales para la consecución de los valores que la normativa nos exige para el año 2020.



VI. CONCLUSIONES

VI. CONCLUSIONES

6.1. RELACIÓN DE CONCLUSIONES

Agrupamos las conclusiones obtenidas en la investigación para extraer de ellas los criterios heurísticos para la optimización matérica¹ de la demanda energética de edificios.

Durante el desarrollo de la investigación, ha sido necesario documentar constructiva y gráficamente las obras seleccionadas, aportando los planos que se han redibujado en este trabajo, a partir de las fuentes consultadas y la labor de campo efectuada. Así pues, disponemos de una nueva documentación exhaustiva que nos ha permitido realizar los modelos digitales necesarios para las simulaciones energéticas.

Para la aplicación del procedimiento propuesto, hemos desarrollado un programa informático, que denominamos *APE₃* (*Análisis Paramétrico de Eficiencia Energética de Edificios*), que sistematiza el modelizado, simulación y obtención de resultados de los más de ochenta mil casos evaluados.

Detectamos que los parámetros influyentes en la variabilidad de la demanda energética de los edificios tienen un marcado componente estacional, dependiendo de la época del año considerada. Así pues, en los periodos de calefacción y en los de refrigeración la lista de variables más influyentes cambia. El procedimiento aportado por esta investigación es válido para establecer la relevancia en la demanda energética en cada periodo de los parámetros considerados y cuantificar su influencia.

6.1.1. Comportamiento energético de los edificios analizados

Con respecto a los edificios analizados, podemos concluir que:

1.- Los edificios, tal como fueron proyectados y construidos, tienen un adecuado comportamiento energético en verano, con resultados de demanda de refrigeración entre los 13,01 y los 22,62 kWh/m².año, próximas al valor límite exigido actualmente por el *Código Técnico de la Edificación* (CTE), establecido

¹ *Matérico*, en referencia a los efectos plásticos que aporta la definición material y constructiva a una obra arquitectónica.

en 15 kWh/m².año. El análisis de sensibilidad concluye que los parámetros más determinantes en este periodo están relacionados con la radiación solar incidente en el edificio: *factor solar* de los vidrios, *protecciones solares específicas* de los huecos en verano y *color* de la envolvente (que determina el valor de *absortancia* α), son los tres parámetros a cuya variación son más sensibles los edificios, seguidos de los *puentes térmicos* y en menor medida el aislamiento térmico en la cubierta.

2.- Los edificios muestran un inadecuado comportamiento energético en invierno, con demandas de calefacción obtenidas entre 56 y 145 kWh/m².año. Se obtienen resultados que superan, al menos, en un 270% la actual exigencia del CTE establecida en 15 kWh/m².año, llegando en uno de los edificios hasta un 865%. Las diferencias entre estas demandas están relacionadas con la *compacidad*², siendo menores las de los edificios más compactos. El análisis de sensibilidad nos muestra que los parámetros más influyentes en la demanda de los cuatro edificios son el *factor solar* de los vidrios, y los relacionados con la transmisión energética de la envolvente, en huecos, elementos opacos, y puentes térmicos. Los edificios también se muestran sensibles a la variación del *color*, aunque en menor medida que en refrigeración.

3.- Podemos obtener valores de demanda energética de calefacción próximos a la exigencia límite establecida por el CTE si utilizamos vidrios y marcos con transmitancia térmica inferior a 1,2 W/m²K, reducimos la transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos por debajo de los 0,2 W/mK y aislamos la envolvente opaca con espesores³ entre 5 y 8 centímetros, siendo el valor inferior para la Torre Hexagonal -más compacta-, y el superior para el Conjunto Maralet -menos compacto-.

6.1.2. Influencia de los parámetros matéricos en calefacción

1.- Los parámetros más influyentes en la demanda energética de calefacción están relacionados con los huecos: transmitancia térmica U y factor solar g de los vidrios determinan en más de un 14,7% la variación de la demanda entre todos los casos analizados llegando, en los casos basados en el modelo 2, hasta el 41,9%. El valor óptimo de U de los vidrios queda establecido entre 0.7 y 1.2 W/m²K con reducciones medias de la demanda entre un 41 y un 65% (de 22,56 a 27,05 kWh/m².año). El valor óptimo para g en huecos soleados es el más cercano posible al máximo -0,85-, con

2 La compacidad C , expresada en m., es la relación entre el volumen V encerrado por la envolvente térmica y la suma de las superficies S de dicha envolvente. $C=V/S$ [m]

3 Se ha considerado un aislamiento de conductividad térmica $\lambda=0.029$ W/mK.

reducciones medias de demanda entre el 27 y el 58% (de 14,13 a 33,65 kWh/m².año). De este modo, el aporte energético por radiación solar supera a las pérdidas por transmisión, consiguiendo un balance energético positivo del hueco en invierno.

2.- Los puentes térmicos quedan entre los tres parámetros más influyentes, con porcentajes de determinación en la variabilidad de la demanda entre el 12,3 y el 24,9%. Es posible una reducción de la demanda de calefacción entre un 38 y un 50% (descensos de 13,19 a 30,88 kWh/m².año de media) si optamos por valores de transmitancia térmica lineal inferiores a 0,2 W/m.K, lo que supone, en la práctica, proyectar edificios sin puentes térmicos.

3.- El espesor del aislamiento térmico de la envolvente opaca -cubiertas, fachadas y suelos- se muestra menos determinante que los tres parámetros anteriores, con una influencia en la variación de la demanda inferior al 9,6%. En edificios de compacidad baja, $C=0,63$, establecemos un espesor óptimo de aislamiento de 8 centímetros. Para edificios de alta compacidad, con $C=2,71$, el espesor óptimo es de 5 centímetros. De los tres, es el aislamiento de la cubierta el que se muestra más efectivo. A partir de estos espesores, serán el resto de parámetros los que permitan mejorar la demanda de calefacción, no siendo efectivas soluciones con altos espesores de aislamiento térmico.

4.- La *absortancia* α de los elementos de la envolvente muestra una determinación en la variación de la demanda que no supera el 1,7%, siendo la de los marcos de los huecos la que más influyente a pesar de ser la que menor proporción ocupa en la envolvente. Los colores oscuros con valores de α próximos a 1, son los que mejores resultados aportan, con reducciones del 12 al 16% (de 4,29 y 7,53 kWh/m².año respecto al mayor resultado de demanda media obtenida).

5.- El aumento de la masa de la envolvente, que incrementa la inercia térmica del edificio, ha mejorado levemente la demanda energética media de calefacción. Una fachada de elevada masa ha reducido la demanda entre 1,5 y 2,66 kWh/m².año (descensos de hasta un 6%), siendo el efecto más acusado si aumentamos la masa de los forjados, con reducciones entre 1,76 y 4,69 kWh/m².año (hasta un 8,35%).

6.- Reduciendo la permeabilidad al aire de los huecos podemos bajar la demanda media entre un 5 y un 8,5% (con descensos en valor absoluto que pueden llegar a 4,7 kWh/m².año). El valor óptimo de permeabilidad al aire queda establecido entre 7 y 10 m³/h.m² lo que equivale a huecos Clase 3 según UNE EN 12207:2000.

6.1.3. Influencia de los parámetros matéricos en refrigeración

1.- Los dos parámetros más influyentes en la variación de la demanda energética de refrigeración se concentran también en los huecos y son la protección solar de los huecos o *factor de sombra FS* y el *factor solar g* de los vidrios. Los valores óptimos de ambos son los que minimizan la radiación solar incidente: para *FS* hemos considerado un valor óptimo de 0.2 y para *g*, de 0.35⁴. El más influyente es el primero, con determinación en la variabilidad de las demandas superiores al 25%, llegando hasta el 38,6% en los casos basados en el modelo 2. El *factor solar* determina entre un 15,4% y un 25,8%. Se pueden obtener reducciones medias de la demanda entre el 36 y el 50%, con descensos de 5,8 a 9,27 kWh/m².año respecto a los valores más altos (situados entre 13,46 y 19,79 kWh/m².año).

2.- Los *puentes térmicos* se sitúan entre los tres parámetros más influyentes en verano, con una determinación en la variabilidad de la demanda de refrigeración entre el 3% y el 7,5%. El valor óptimo queda situado entre 0,20 y 0,24 W/m.K, con reducciones medias de la demanda de hasta un 25%. Del resto de parámetros relacionados con el aislamiento térmico de la envolvente opaca, solo se muestra influyente el de la cubierta, con un espesor óptimo entre 4 y 5 centímetros y mejoras de la demanda entre un 5 y un 22% (hasta 4,41 kW.h/m².año). El resto (espesor de aislamiento en fachada y suelo) no ofrecen posibilidades de mejora, llegando en algunos casos a aumentar ligeramente la demanda de refrigeración cuando incrementamos el espesor. Por lo tanto el espesor de aislamiento óptimo de estos dos parámetros es cero en el periodo de verano, no siendo conveniente, por tanto, aislar en exceso estos elementos cuando atendemos a la demanda anual.

3.- El *color* del edificio -representado por la *absortancia α* - es más relevante en este periodo que en calefacción. El α de los marcos de los huecos, que ocupan menor proporción en la envolvente que cubierta y fachada opaca, es el tercer parámetro más influyente en la variación de la demanda en tres de los cuatro grupos de casos -en el modelo 1 queda en quinta posición-, siendo responsable de entre el 6,4 y el 12,2% de la variación. Un valor próximo a cero de α -color claro y reflectante-, minimiza la demanda energética media entre un 25 y un 30%, obteniendo reducciones entre 2,93 y 4,8 kWh/m².año. En cubiertas y fachadas ocurre el mismo efecto, siendo más relevante el valor de las primeras frente a las segundas.

4 Valores que permiten la iluminación natural de los espacios

4.- El aislamiento térmico de los huecos -parámetros de transmitancia térmica U de vidrios y marcos- se comporta en sentido contrario en refrigeración que en calefacción: los vidrios muy aislantes ($U < 1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) aumentan, de media, la demanda entre un 11 y un 16% (de 1,32 a 2,68 kWh/m².año) respecto a vidrios poco aislantes ($U = 5,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Con la U de los marcos ocurre algo parecido, con resultados proporcionales a su tamaño en el hueco. Por consiguiente, huecos muy aislados, mejoran el comportamiento energético en calefacción, empeorando ligeramente el de refrigeración.

5.- La masa de la envolvente térmica muestra mayor influencia en este periodo que en calefacción, principalmente la de los forjados, que pueden representar hasta el 3,4% de la variabilidad de la demanda de refrigeración, con reducciones medias de hasta el 18% (hasta 3,35 kWh/m².año de mejora) para los valores máximos de masa de forjado considerados.

6.- Si reducimos al máximo la permeabilidad al aire de los huecos podemos bajar la demanda media entre un 3 y un 5% (descensos en valor absoluto inferiores a 1 kWh/m².año). El valor óptimo de permeabilidad al aire queda establecido entre 24 y 32 m³/h.m² lo que equivale a huecos Clase 2 o 3, aunque no es determinante en este periodo.

6.1.4. Influencia de los parámetros matéricos en un ciclo anual

A partir de estas conclusiones podemos exponer los siguientes criterios heurísticos para la optimización de la demanda energética de edificios:

1.- Huecos: los parámetros que definen el hueco son los más determinantes en la demanda energética del edificio, tanto si se analiza de modo estacional (calefacción o refrigeración), como si se hace de modo anual. Para favorecer la respuesta en invierno es deseable diseñar edificios con *transmitancia térmica* baja ($U < 1,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) y *factor solar* alto en los huecos soleados ($g > 0,75$), lo que aportará al edificio un balance energético positivo. Para corregir el efecto negativo del g alto en verano, será necesario incorporar protecciones solares que actúen solo en esta época del año. Se deberán diseñar huecos *perfectibles*⁵ que reduzcan el grado de aislamiento del hueco en verano como respuesta al ligero aumento de la demanda de refrigeración que provoca un hueco con U muy reducida.

5 Un hueco perfectible es un elemento evolutivo que prevé y permite mejoras en su comportamiento energético, en referencia al concepto propuesto por Ignacio Paricio, desarrollado por Ben van Berkel en el Proyecto Casa Barcelona (Paricio et al., 2001)

2.- Envoltente opaca del edificio: los espesores de aislamiento térmico de la envoltente, que optimizan el comportamiento energético anual, deben ser moderados, entre 5 y 8 centímetros, siendo menores cuanto más compacto es el edificio. El de la cubierta es el más influyente, con efecto positivo tanto en calefacción como en refrigeración. En fachadas y suelos, el aumento de aislamiento reduce la demanda de calefacción, pudiendo aumentar ligeramente la de refrigeración. La reducción de la transmitancia térmica lineal de los puentes térmicos al máximo -por debajo de $0,2 \text{ W/m.K}$ -, disminuye la demanda energética de los dos periodos, por lo que se deben diseñar edificios sin puentes térmicos.

3.- Color: la *absortancia* es más determinante en refrigeración que en calefacción. Confirmamos lo que conocemos de la arquitectura vernácula en relación al color de los edificios. Los valores de α cercanos a cero -colores claros- son los que mayor reducción de la demanda aportan. La *absortancia* próxima a uno -colores oscuros-, mejoran, en menor medida, la demanda de calefacción. El color de marcos de carpinterías y cubiertas es más influyente que el de la fachada.

4.- Masa: el incremento de este parámetro en elementos horizontales y verticales de la envoltente, que aumenta la inercia térmica del edificio, se muestra beneficioso, pero no determinante, para las demandas energéticas de los dos periodos. La masa de los forjados es más determinante que la de las fachadas, siendo más acusado el efecto en verano que en invierno.

5.- Permeabilidad al aire en huecos: este parámetro no es determinante en los resultados de demanda energética anual, aunque llega a mejorar la demanda de calefacción hasta un 5% para valores de permeabilidad al aire bajos.

6.2. SÍNTESIS

La investigación realizada nos permite establecer que, en el camino hacia la arquitectura de mínima demanda energética en la zona climática B3, es necesario diseñar edificios sin puentes térmicos, con huecos perfectibles de transmitancia térmica mínima para el invierno capaz de aumentar en verano, maximizar las ganancias por radiación, con vidrios de factor solar alto, que dispongan de protecciones específicas en verano. Los aislamientos térmicos deberán ser moderados, con mayor importancia en edificios menos compactos, considerando que solo el situado en la cubierta favorece el comportamiento estival. El color debe seleccionarse en función de la época con más uso del edificio, resultando determinante el color claro en verano. Una envolvente de masa elevada y huecos con pocas infiltraciones de aire reducen, en menor medida, la demanda energética del edificio.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

RELACIÓN BIBLIOGRÁFICA DE INTERÉS Y CONSULTADA

Se enumera exclusivamente las fuentes y bibliografía que ha sido consultadas específicamente durante la elaboración del texto y de la que se han extraído las citas reproducidas.

AAVV. (2005). *A.C. Publicaciones del GATEPAC* (Primera ed.). Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos.

AA.VV. (2010). *Urbanismo y desarrollo sostenible en Zaragoza: la ecociudad Valdespartera* (Primera ed.). Zaragoza: Ecociudad Valdespartera Zaragoza S.A. Obtenido de <https://dl.dropboxusercontent.com/u/9552451/Libro/Libro%20Valdespartera.pdf>

AA.VV. (2016). *HIC et NUNC*. Recuperado el 2016 de 11 de 2016, de <http://hicarquitectura.com/2012/06/antonio-bonet-castellana-la-ricarda-llatzer-moix-en-la-vanguardia/>

Ábalos, I., & Herreros, J. (2000). *Técnica y arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000* (3ª Edición ed.). Hondarribia, España: Nerea.

Abalos, I. & Sentkiewicz, R., (2015). *Ensayos sobre termodinámica*. Primera ed. Nueva York: Actar Publishers.

Acha Román, C. A., Alonso Pastor, L., Bedoya Frutos, L., Gómez Aparicio, E., Carabaño Rodríguez, R., Neila González, F. J., Orondo Iglesias, J. (2013). *Acondicionamiento ambiental y habitabilidad del espacio arquitectónico* (1ª edición ed., Vol. XI). Madrid, España: Munilla-Lería.

Alvar Aalto Museum. (2017). *www.alvaraalto.fi*. Recuperado el 09 de enero de 2017, de <http://www.alvaraalto.fi/viipuri/>

Álvarez, F., & Roig, J. (1996). *Bonet Castellana. 1913-1989*. Barcelona: Colegio Oficial de Arquitectos de Cataluña, Ministerio de Fomento.

Amann, A., & Cánovas, A. (1997). *Monólogos*. Catálogos de Arquitectura (1), pp. 20-27.

Aparicio Guisando, J. M. (2000). *El muro*. Madrid: Universidad de Palermo.

Araujo, R. (2012). *La rehabilitación de la arquitectura moderna*. Tectónica (33), pp. 4-21.

- Ares Álvarez, O.** (2013). *Complejidad y contradicción. Antonio Bonet Castellana 1913-1989.* (L. Fernández-Galiano, Ed.) *Arquitectura Viva* (150), pp. 24-27.
- Artaraz, M.** (2002). *Teoría de las tres dimensiones de desarrollo sostenible. Ecosistemas.* Revista de ecología y medio ambiente (2). Obtenido de <http://www.aeet.org/ecosistemas/022/informe1.htm>
- ATECYR.** (2008). *Guía técnica de procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios.* Madrid: IDAE.
- Attia, S., Hamdy, M., Carlucci, S., Pagliano, L., Bucking, S., & Hasan, A.** (2015). *Building performance optimization of net zero energy buildings.* En A. Athienitis, W. O'Brien, A. Athienitis, & W. O'Brien (Edits.), *Modeling, design and optimization of Net-Zero Energy Buildings* (Primera ed., págs. 175-206). Berlin: John Wiley & Sons.
- Bachelard, G.** (2000). *La poética del espacio (La poétique de l'espace).* (E. d. Champourcín, Trad.) Buenos Aires: Fondo de cultura y economía.
- Barber, D.** (2014). *The thermoheliodon. Climatic architecture at the end of calculation.* (J. Kim, Ed.) *A+R+P+A Journal*(1). Recuperado el 28 de julio de 2016, de <http://www.arpajournal.net/thermoheliodon/>
- Blázquez, T., Suárez, R., & Sendra, J. J.** (2015). *Towards a calibration of building energy models: A case study from the Spanish housing stock in the Mediterranean climate.* *Informes de la Construcción*, 67(540), 1-11. Recuperado el 26 de julio de 2016, de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4607/5349>
- Boada i Xairó, S.** (2014). *Los límites del vidrio. Aproximación analítica a los límites de las prestaciones energético-lumínicas del vidrio.* Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.1/19684>
- Bonet Castellana, A.** (1965). *Memoria del Proyecto del Bloque Escalonado en La Manga del Mar Menor.* Proyecto, Madrid.
- Brundtland, G. H., (1987).** *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo "Nuestro futuro en común",* Oslo.
- Bucking, S., Zmeureanu, R., & Athienitis, A.** (2014). *A methodology for identifying the influence of design variations on building energy performance.* *Journal of Building Performance Simulation*, 7(6), 411-426. doi:10.1080/19401493.2013.863383
- Buchanan, P.** (2016). *La belleza perdurable. Dietmar Eberle, a Builder of Comfort.* *Arquitectura Viva* (188), pp. 38-43.

Calinescu, M. (2016). *Cinco caras de la modernidad. Modernismo, vanguardia, decadencia, kitsch, postmodernismo*. (F. Rodríguez Martín, Trad.) Madrid: Tecnos-Alianza Editorial.

Capitel, A., & Baldellou, M. (2001). *Arquitectura española del siglo XX*. Madrid: S.L.U. Espasa libros.

Carle, J. (2015). *Climate change seen as top global threat. Americans, europeans, middle easterners focus on ISIS as greaterst danger*. Pew Research Center. Global attitudes & trends. Obtenido de <http://www.pewglobal.org/2015/07/14/climate-change-seen-as-top-global-threat/>

CIEMAT (2016). *CIEMAT, Áreas científico-técnicas*. Recuperado el 09 de 09 de 2016, de <http://www.ciemat.es/cargarSubLineaInvestigacion.do?identificador=7&idArea=1&idLinea=6>

Consejería de Fomento, OO.PP. y OT. Servicio de Arquitectura (2017). Premios de Arquitectura de la Región de Murcia. Obtenido de <http://opweb.carm.es/premiosarquitectura/>

da Graça Osório, M. (2001). *El arte matérico hoy: materias de carga y materiales encontrados*. Tesis doctoral, Universidad Complutense, Madrid

de Retes Aparicio, F. (2009). *Centro de investigación en agroecología*. Retes Arquitectos. Catálogos de Arquitectura (22), pp. 86-89.

de Retes Aparicio, F. (2009). *Premio Regional. Centro de Agroecología y Medio Ambiente de la Rafa de Bullas*. En Catálogo de los XV Premios de Arquitectura de la Región de Murcia (Primera ed., págs. 21-38). Murcia: COAMU, Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio. Obtenido de https://issuu.com/premiosarquitecturarm/docs/xv_premios

Deleuze, G., & Guattari, F. (2002). *Mil mesetas. Capitalismo y esquizofrenia* (5ª Edición ed.). (J. Vázquez Pérez, Trad.) Valencia: Pre-textos.

Díaz Guirado, P. A. (2013). *Patología y energía en la arquitectura del movimiento moderno. La eficiencia moderna*. Trabajo fin de Máster. UCAM, Departamento de Ciencias Politécnicas. Murcia

Díaz Guirado, P. A. (2014). *¿Cuánta energía consume su edificio, Mr. Foster?* Revista Tecnológica ANEXO (14), pp. 4-9. Obtenido de http://www.cscae.com/images/stories/Noticias/Tecnica/revista/ANEXO_n14.pdf

Díaz Guirado, P. A., & Allepuz Pedreño, Á. (2014). *Las viviendas "Maralet" en La Manga del Mar Menor, de Antonio Bonet Castellana, bajo una óptica energética contemporánea*. I Congreso Pioneros de la Arquitectura Moderna Española: Vigencia de su pensamiento y obra (págs. 241-251). Madrid: Fundación Alejandro de la Sota. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5599665>

- Díaz Guirado, P. A., & Cayuela Díaz, F.** (2014). *DB HE 2013. Limitación de la demanda*. Revista Tecnológica ANEXO (13), pp.19-21. Obtenido de <http://www.cscae.com/anexocscae/?p=8>
- Dongjun, S., & Seongju, C.** (2014). *A heuristic route-based passive design decision model for reducing heating energy consumption of korean apartment buildings*. (S. Treado, Ed.) *Energies*(7), 6897-6929. Obtenido de <http://www.mdpi.com/1996-1073/7/11/6897>
- E.T.S. Arquitectura Madrid.** (s.f.). *Instituto Juan de Herrera*. Recuperado el 14 de diciembre de 2016, de <http://www.aq.upm.es/Instituciones/jherrera/publicaciones.html>
- Eisenhardt, K. M.** (1989). *Building theories from case study research*. *The Academy of Management Review*, 14(4), 532-550. Obtenido de https://www.business.illinois.edu/josephm/BADM504_Fall%202016/Eisenhardt1989.pdf
- Eisenhower, B., O'Neil, Z., Fonoberov, V. A., & Mezić, I.** (2012). *Uncertainty and sensitivity decomposition of building energy models*. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(3), 171-184. doi:10.1080/19401493.2010.549964
- Enríquez Miranda, R.** (2013). *Evaluación energética experimental de edificios en condiciones reales de uso mediante el ajuste de modelos de simulación con aplicaciones al control predictivo*. Madrid: Universidad complutense de Madrid. Obtenido de <http://eprints.sim.ucm.es/21523/1/T34480.pdf>
- España** (2011). *Plan de Energías Renovables 2011-20* (Primera ed.). Madrid: Edita IDAE. Obtenido de <http://www.idae.es/index.php/id.670/re/menu.303/mod.pags/mem.detalle>
- España** (2014). *Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2014-2020*. Madrid. Obtenido de https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/NEEAP_2014_ES-es.pdf
- España** (2016). *RD 56/2016, de 12 de febrero, por el que se transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas acreditación de proveedores de la eficiencia del suministro*. Madrid: Boletín Oficial del Estado. Obtenido de <http://www.boe.es/boe/dias/2016/02/13/pdfs/BOE-A-2016-1460.pdf>
- Fernández-Galiano, L.** (1983). *Termodinámica y construcción*. Tesis doctoral, E.T.S. de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Fernández-Galiano, L.** (1991). *El fuego y la memoria. Sobre arquitectura y energía* (Primera ed.). Madrid, España: Alianza editorial.
- Fernández-Galiano, L.** (2005). *Máscara y materia*. *AV Monografías (Materiales de construcción)* (115), pp. 2-5.

- Fernández-Galiano, L.** (2012). *Arquitectura y vida: el arte en mutación*. Madrid, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Obtenido de http://www.realacademiabellasartessanfernando.com/assets/docs/discursos_ingreso/fernandez_galiano_ruiz_luis-2012.pdf
- Fernández-Galiano, L.** (2015). *Memorias termodinámicas. Shaping the Future with the Past*. (L. Fernández-Galiano, Ed.) *Arquitectura Viva* (178), pp. 13-15.
- Fernández-Galiano, L.** (2015). *Climas arquitectónicos. An Environmental Bibliography*. (L. Fernández-Galiano, Ed.) *Arquitectura Viva* (178), pp. 52-55.
- Fleig, K.** (2010). *Sobre la relación de las artes ligadas a la materia*. Conversación con Karl Fleig 1970. En J. Pallasmaa, *Conversaciones con Alvar Aalto* pp. 29-43. Barcelona: Gustavo Gili
- Frampton, K.**, (2010). *Historia crítica de la arquitectura moderna*. 4ª edición ampliada, 2ª tirada. Barcelona: Gustavo Gili.
- Franciscus I.** (2015). *Carta encíclica Laudato Si' del Santo Padre Francisco sobre el cuidado de la casa común* (Primera ed.). Roma: Librería Editrice Vaticana. Obtenido de http://w2.vatican.va/content/francesco/es/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html
- García Casals, X.** (2006). *Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences*. *Energy and Buildings*(38), pp. 381-392. Obtenido de www.elsevier.com/locate/enbuild
- García, Á., Serra, J., Torres, A., & Llopis, J.** (2010). *El recurso plástico de la monocromía arquitectónica. Estudio de tres casas azules contemporáneas*. En AA.VV., *Actas del IX Congreso Nacional del Color*. Alicante, 29 y 30 de junio, 1 y 2 de julio. Alicante: Universidad de Alicante. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16390/1/actas_IX_CNC_47.pdf
- Georgescu-Roegen, N.** (1996). *La ley de la entropía y el proceso económico*. Madrid: Fundación Argentaria. Obtenido de <http://www.fcmanrique.org/publiDetalle.php?idPublicacion=107>
- Giménez Molina, M.** (2011). *Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos: los vidrios dinámicos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de <http://oa.upm.es/5846/>
- González de León, T.** (2006). *Le Corbusier visto de cerca*. Massilia: anuario de estudios lecorbusierianos, pp. 60-69. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099/9272>
- Google** (2015). *Google Project Sunroof*. Recuperado el 16 de 10 de 2016, de <https://www.google.com/get/sunroof#p=0>

- Grupo de Investigación del Color.** (2016). *Grupo de Investigación del Color*. Recuperado el 16 de 10 de 2016, de <http://grupocolor.webs.upv.es/WEB/>
- Hawking, S.** (2011). *Historia del tiempo. Del big bang a los agujeros negros*. Crítica.
- Heidegger, M.** (2015). *Construir, Pensar, Habitar (Bauen-Wohnen-Denken)*. Madrid: Oficina de arte y ediciones.
- IBPSA-Canada's biennial conference.** (2016). *eSim 2016*. Recuperado el 30 de julio de 2016, de <http://esim.mcmaster.ca/index.php/2016/esim2016>
- IDAE** (2008). *Soluciones de Acristalamiento y Cerramiento Acristalado*. Madrid: IDAE. Obtenido de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10828_SolucionesAcristalamiento_A2008_A_e4087943.pdf
- IDAE** (2009). *Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER*. Madrid: IDAE.
- IDAE** (2011). *Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final*. Madrid: IDAE. Obtenido de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Informe_SPAHOUSEC_ACC_f68291a3.pdf
- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.** (2010). *Catálogo de elementos constructivos del CTE (versión 6.3 marzo 2010 ed.)*. Madrid: Ministerio de Vivienda. Obtenido de http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/aplicaciones/nCatalog_infoEConstr/CAT-EC-v06.3_marzo_10.pdf
- Instituto de Estabilidad, Facultad de Ingeniería.** (2004). *El PVC en la construcción. Resistencia (Argentina)*: Universidad Nacional del Nordeste. Recuperado el 16 de 10 de 2016, de <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-017.pdf>
- International Energy Agency.** (s.f.). *ANNEX 58 Reliable Building Energy Performance Characterisation Based on Full Scale Dynamic Measurements*. Recuperado el 28 de julio de 2016, de <http://www.kuleuven.be/bwf/projects/annex58/index.htm>
- Kahn, L. I.** (2003). *La habitación, la calle y el consenso humano. Discurso de aceptación de la Medalla de Oro del American Institute of Architects, en 1971*. En Latour, A., Louis I. Kahn. *Escritos, conferencias y entrevistas* (J. Sainz, Trad., Primera ed., pág. 274). El Escorial: El Croquis Editorial.
- Maldonado, T.** (1990). *El futuro de la modernidad* (1ª Edición ed.). Madrid, España: Ediciones Jucar.

Marot, S. (2015). *Fuegos domesticados. Hearth Architecture in Four Movements*. (L. Fernández-Galiano, Ed.) *Arquitectura Viva* (178), 16-29.

Martín Gómez, C. et al. (2010). *Los Apuntes de Salubridad e Higiene de Francisco Javier Sáenz de Oiza*. Madrid: T6 ediciones S.L. ETSA Universidad de Navarra.

Martínez Carazo, P. (2006). *El método del estudio de caso. Estrategia metodológica de la investigación científica*. *Pensamiento & gestión*, 20 (ISSN 1657-6276), 165-193.

Melero, S., Acha, C., & Neila González, F. (2013). *Diccionario de sostenibilidad*. *Arquitectura Viva* (148), pp. 82-85.

Ministerio de Economía y Competitividad (2015). *ESHORIZONTE 2020. Portal español del programa marco de investigación e innovación de la Unión Europea*. Recuperado el 12 de 11 de 2015, de <http://www.eshorizonte2020.es/que-es-horizonte-2020>

Ministerio de Fomento (2013). *CTE, Código Técnico de la Edificación. Documento básico de ahorro de energía, articulado de septiembre de 2013, versión comentada de marzo de 2016*. Recuperado el 16 de enero de 2017 de <http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DccHE.pdf>

Ministerio de Fomento. (2014). *Documento de apoyo al DB-HE Ahorro de energía DA DB-HE 3. Puentes térmicos versión marzo 2016*. Obtenido de www.codigotecnico.org: <http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DccHE.pdf>

Ministerio de Fomento. (2015). *Documento descriptivo climas de referencia*. Recuperado el 2016 de 10 de 12, de <http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/20150723-DOC-DB-HE-0-Climas%20de%20referencia.pdf>

Ministerio de Fomento. (2016). *Documento de bases para la actualización del Documento Básico DB-HE*. Obtenido el 15 de diciembre de 2016 de http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/Documento_de_bases_HE2018.pdf

Montaner, J. M. (2007). *Arquitectura y crítica* (2ª edición revisada y ampliada ed.). Barcelona: Gustavo Gili.

Montaner, J.M. (2011). *La modernidad superada*. (Ed. revisada y ampliada). Barcelona: Gustavo Gili.

Montaner, J. M. (2015). *La arquitectura de la vivienda colectiva. Políticas y proyectos en la ciudad contemporánea* (1ª Edición ed.). Barcelona: Reverté.

Naciones Unidas (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. New York. Obtenido de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

- Neila González, F. J.** (1984). *El diseño de la vivienda como elemento de control energético*. Tesis doctoral, E.T.S. de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Neila González, F. J.**, (2001). *Estrategias bioclimáticas para condiciones de verano (I)*. Madrid: Instituto Juan de Herrera. ETSAM.
- Neila González, F. J.**(2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. (primera ed.) Madrid: Munilla-Lería.
- Neila González, F. J.** (2013). *Acondicionamiento ambiental y habitabilidad del espacio arquitectónico* (1ª Edición ed., Vol. 11). Madrid, España: Munilla-Lería.
- Neila González, F. J., & Bedoya Frutos, C.** (1997). *Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental* (Segunda edición ed.). Madrid: Munilla-Lería.
- Neila González, F. J., & Acha Román, C.** (2009). *Arquitectura bioclimática y construcción sostenible* (Primera ed.). Pamplona: DAPP Publicaciones Jurídicas, S.L.
- Olgay, V.** (2002). *Arquitectura y Clima* (título original *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*, editado por Princeton University, Press en 1963) (2ª Edición ed.). (J. Frontado, & L. Clavet, Trans.) Barcelona, España: Gustavo Guili.
- Organización Meteorológica Mundial.** (2015). *Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2014*. Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero, págs. 1-4. Recuperado el 9 de 11 de 2015, de http://library.wmo.int/pmb_ged/ghg-bulletin_11_es.pdf
- Organización Meteorológica Mundial.** (2016). *Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2015*. Boletín de la OMM sobre los gases de Efecto Invernadero (12), pág. 8. Obtenido de http://library.wmo.int/pmb_ged/ghg-bulletin_12_es.pdf
- Paricio, I.** (1997). *El hueco en la fachada*. Tectónica (4), pp. 4-21. Madrid: ATC Ediciones. Obtenido de <https://www.scribd.com/document/45200526/Tectonica-04-el-hueco>
- Paricio, I.** (2000). *La fachada de ladrillo*. Tercera edición. Barcelona: Bisagra.
- Paricio, I. et al.** (2001). *Proyecto Casa Barcelona*. Primera ed. Barcelona: Construmat Barcelona.
- Paricio, I.** (2014). *Sostenibilidad y sensualidad en una arquitectura de vidrio*. Arquitectura Viva (167), p. 80. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.2/3747>

- Paricio, I. et al.** (2017). *Filt3rs*. Barcelona. Obtenido de <http://filt3rs.net/>
- Parra Martínez, J.** (s.f.). *Fundación DOCOMOMO Ibérico*. Recuperado el 10 de septiembre de 2016, de http://docomomoiberico.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=620:conjunto-de-apartamentos-malaret&lang=es
- Presidencia del Gobierno de España.** (1979). *Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios*. *Boletín Oficial del Estado* (253), pp. 24524-24550. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1979-24866>
- Prieto González, E. A.** (2014). *Máquinas o atmósferas. La estética de la energía en la arquitectura, 1750-2000*. Tesis doctoral. Madrid. Obtenido de <http://oa.upm.es/32610/>
- Prieto González, E. A.** (2015). *¿Una estética de la energía? Sustainability Takes Command*. (L. Fernández-Galiano, Ed.) *Arquitectura Viva* (178), pp. 30-43.
- Rahm, P.** (2009). *Carte Blanche. Terroirs déterritorialisés*. En *Catalogue VIA 2009* (págs. 13-33). Paris: VIA design France -Valorisation de l'innovation dans l'ameublement. Recuperado el 08 de enero de 2017, de VIA design France: <http://www.via.fr/telechargement/aides-creation-09-catalogue.pdf>
- Rahm, P.** (2017). *Philippe Rahm architectes*. Recuperado el 08 de enero de 2017, de <http://www.philipperahm.com/>
- Ramón y Cajal, S.** (2005). *Los tónicos de la voluntad. Reglas y consejos sobre investigación científica*. Madrid: Gadir Editorial S.L.
- Requena Ruiz, I.** (2011). *Arquitectura adaptada al clima en el movimiento moderno: Le Corbusier (1930-1960)*. Tesis doctoral. Alicante: Universidad de Alicante.
- Ródemas García, J. F.** (2014). *A partir del proyecto Durand de Le Corbusier, Oued-Ouchaia, Argelia (1933-1934). Evolución tipológica del "bloque escalonado" en la obra de Antonio Bonet*. *de-arq*(14), pp. 92-109. Obtenido de http://dearq.uniandes.edu.co/sites/default/files/articles/attachments/a_partir_del_proyecto_durand_de_le_corbuiser_oued-ouchaia_argelia1933-1934.pdf
- Ródenas García, J. F.** (2015). *Antonio Bonet. Espacios de transición entre vivienda y ciudad*. *RITA*, pp.54-73. Obtenido de <http://ojs.redfundamentos.com/index.php/rita/article/view/56/61>
- Rueda, S., de Cáceres, R., Cuchí, A., & Brau, L.** (2012). *El urbanismo ecológico* (Primera ed.). Barcelona: BCNecologia (Agencia de Ecología Urbana). Obtenido de

<http://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/http/contenidosEstaticos/adjuntos/es/80/85/38085.pdf>

Saltelli, A., Chan, K., & Scott, E. M. (2000). *Sensitivity Analysis*. John Wiley and sons, LTD.

San Juan, G., Hoses, S., & González, D. (2000). *Sensibilidad de variables edilicias y energéticas de tipologías edilicias escolares en dos situaciones regionales de nuestro país*. Avance de Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)(45). Obtenido de <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2000/2000-t007-a006.pdf>

Sendra, J. J., Domínguez-Amarillo, S., Bustamante, P., & León, A. L. (2013). *Intervención energética en el sector residencial del sur de España: Retos actuales*. Informes de la Construcción, 65(532), 457-464. Obtenido de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewFile/2934/3240>

Spitz, C., Mora, L., Wurtz, E., & Jay, A. (2012). *Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house*. Energies(55), 459-470.

Song, J., Wei, L., Sun, Y. & Tian, W., (2014). *Implementation of Meta-modelling for Sensitivity Analysis in Building Energy Analysis*. Ottawa, Carleton University

Taberna Roldán, A. (2015). *El bagaje europeo de Antonio Bonet Castellana para Argentina*. *El manifiesto Austral*. Ra. Revista de arquitectura, 17, 27-32. doi: <http://dx.doi.org/10.15581/014.17.27-32>

Tian, W., (2013). *A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (20), pp. 411-419

Toharia, M. (2015). *El cambio climático, una grave preocupación mundial*. Recuperado el 2016 de diciembre de 20, de <http://metroscofia.org/el-cambio-climatico-una-grave-preocupacion-mundial/>

Tostoes, A. (2014). *Habitats modernos. Houses in Spain and Portugal, 1950-1970*. (L. Fernández-Galiano, Ed.) Arquitectura Viva (167), 11-17.

Unión Europea. (2003). *Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Bruselas. Obtenido de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:32002L0091&from=ES>

Unión Europea. (2010). *Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios*. Diario Oficial de la Unión Europea, págs. 13-35. Obtenido de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Directiva_2010-31_UE_EE_en_edificios_Refundicion_d3ee0458.pdf

Unión Europea. (2010). *Versión consolidada del Tratado de la Unión Europea*. Diario oficial de la Unión Europea, p. 17. Obtenido de <http://www.boe.es/doue/2010/083/Z00013-00046.pdf>

Unión Europea. (2012). *Directiva 2012/27/UE del parlamento europeo y del consejo, de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE*. pp. 1-56.

Universidad de La Rioja. Departamento de Ingeniería Mecánica. (2016). *www.unirioja.es*. Recuperado el 28 de julio de 2016, de <http://www.unirioja.es/cu/manuruiz/simulacion%20termica.shtml>

Vitruvio Polión, M. (1995). *Los diez libros de Arquitectura* (Primera ed.). (J. Oliver Domingo, Trad.) Madrid: Alianza Forma.

Wittkower, R. (2002). *Los fundamentos de la arquitectura en la edad del humanismo* (Primera reimpresión). (A. Gómez Cedillo, Trad.) Madrid: Alianza Forma.

ÍNDICE ALFABÉTICO DE LA BIBLIOGRAFÍA

AAVV. (2005), 77,81,82,86,98,112,115

AA.VV. (2010), 45

AA.VV. (2016), 138

Ábalos, I., & Herreros, J. (2000), 106

Abalos, I. & Sentkiewicz, R., (2015), 90

Acha Román et al. (2013), 139, 156

Alvar Aalto Museum. (2017), 89

Álvarez, F., & Roig, J. (1996), 119

Amann, A., & Cánovas, A. (1997), 123

Aparicio Guisando, J. M. (2000), 133

Araujo, R. (2012), 155

Ares Álvarez, O. (2013), 116

Artaraz, M. (2002), 100

- ATECYR. (2008), 43, 47, 49
- Attia, S. et al. (2015), 50, 54, 57
- Bachelard, G. (2000), 81
- Barber, D. (2014), 44
- Blázquez, T., Suárez, R., & Sendra, J. J. (2015), 52
- Boada i Xairó, S. (2014), 146, 158
- Bonet Castellana, A. (1965), 255, 261
- Brundtland, G. H., (1987), 100
- Bucking, S., Zmeureanu, R., & Athienitis, A. (2014), 52, 56, 58
- Buchanan, P. (2016), 156
- Calinescu, M. (2016), 106, 154
- Capitel, A., & Baldellou, M. (2001), 113
- Carle, J. (2015), 33
- CIEMAT (2016), 45
- Consejería de Fomento, OO.PP. y OT. Servicio de Arquitectura (2017), 93
- da Graça Osório, M. (2001), 135
- de Retes Aparicio, F. (2009), 156
- de Retes Aparicio, F. (2009), 45
- Deleuze, G., & Guattari, F. (2002), 106
- Díaz Guirado, P. A. (2013), 148
- Díaz Guirado, P. A. (2014), 99
- Díaz Guirado, P. A., & Allepuz Pedreño, Á. (2014), 113
- Díaz Guirado, P. A., & Cayuela Díaz, F. (2014), 141, 142
- Dongjun, S., & Seongju, C. (2014), 28, 60, 63, 65, 139
- E.T.S. Arquitectura Madrid. (s.f.), 41
- Eisenhardt, K. M. (1989), 27
- Eisenhower, B., O'Neil, Z., Fonoberov, V. A., & Mezic, I. (2012), 52
- Enríquez Miranda, R. (2013), 48, 59
- España (2011), 37
- España (2014), 37

- España (2016), 45
- Fernández-Galiano, L. (1983), 41
- Fernández-Galiano, L. (1991), 24, 97, 101, 103
- Fernández-Galiano, L. (2005), 133
- Fernández-Galiano, L. (2015), 42, 97
- Fernández-Galiano, L. (2015), 33
- Fleig, K. (2010), 135
- Frampton, K., (2010), 109
- Franciscus I. (2015), 33
- García Casals, X. (2006), 47
- García, Á., Serra, J., Torres, A., & Llopis, J. (2010), 155
- Georgescu-Roegen, N. (1996), 103
- Giménez Molina, M. (2011), 147
- González de León, T. (2006), 144
- Google (2015), 153
- Grupo de Investigación del Color. (2016), 155
- Hawking, S. (2011), 103
- Heidegger, M. (2015), 80
- IBPSA-Canada's biennial conference. (2016), 47
- IDAE (2008), 146, 149, 150
- IDAE (2009), 161
- IDAE (2011), 39, 53
- Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. (2010), 157
- Instituto de Estabilidad, Facultad de Ingeniería. (2004), 151
- International Energy Agency. (s.f.), 47
- Kahn, L. I. (2003), 75
- Maldonado, T. (1990), 23, 154, 191
- Marot, S. (2015), 27, 103
- Martín Gómez, C. et al. (2010), 75, 81, 82
- Martínez Carazo, P. (2006), 27

- Melero, S., Acha, C., & Neila González, F. (2013), 155
- Ministerio de Economía y Competitividad (2015), 31
- Ministerio de Fomento (2013), 128
- Ministerio de Fomento. (2014), 165
- Ministerio de Fomento. (2015), 53, 138
- Ministerio de Fomento. (2016), 39
- Montaner, J. M. (2007), 112
- Montaner, J.M. (2011), 23, 111, 189
- Montaner, J. M. (2015), 107
- Naciones Unidas (1998), 31
- Neila González, F. J. (1984), 41, 72, 159
- Neila González, F. J., (2001), 72
- Neila González, F. J.(2004), 41, 67, 72, 156
- Neila González, F. J. (2013), 84, 87, 92
- Neila González, F. J., & Bedoya Frutos, C. (1997), 136, 156, 157
- Neila González, F. J., & Acha Román, C. (2009), 70, 85, 94
- Olgay, V. (2002), 44, 66, 67, 98, 126
- Organización Meteorológica Mundial. (2015), 32
- Organización Meteorológica Mundial. (2016), 32
- Paricio, I. (1997), 145, 148
- Paricio, I. (2000), 117
- Paricio, I. et al. (2001), 422, 437
- Paricio, I. (2014), 87, 133, 147, 151, 160
- Paricio, I. et al. (2017), 160
- Parra Martínez, J. (s.f.), 199
- Presidencia del Gobierno de España. (1979), 33
- Prieto González, E. A. (2014), 101, 105
- Prieto González, E. A. (2015), 104
- Rahm, P. (2009), 85
- Rahm, P. (2017), 85

-
- Ramón y Cajal, S. (2005), 27
- Requena Ruiz, I. (2011), 51
- Ródemas García, J. F. (2014), 255, 256, 257
- Ródenas García, J. F. (2015), 256
- Rueda, S., de Cáceres, R., Cuchí, A., & Brau, L. (2012), 97
- Saltelli, A., Chan, K., & Scott, E. M. (2000), 55
- San Juan, G., Hoses, S., & González, D. (2000), 58
- Sendra, J. J. et al. (2013), 40, 53
- Spitz, C., Mora, L., Wurtz, E., & Jay, A. (2012), 55, 58
- Song, J., Wei, L., Sun, Y. & Tian, W., (2014), 58
- Taberna Roldán, A. (2015), 120
- Tian, W., (2013), 57
- Toharia, M. (2015), 33
- Tostoes, A. (2014), 138
- Unión Europea. (2003), 34
- Unión Europea. (2010), 33
- Unión Europea. (2012), 36
- Universidad de La Rioja. Departamento de Ingeniería Mecánica. (2016), 47
- Vitruvio Polión, M. (1995), 76
- Wittkower, R. (2002), 105