

UNIVERSIDAD DE GRANADA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

Departamento de Ingeniería de la
Construcción y Proyectos de Ingeniería



**EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE MODELO
PARA EL CÁLCULO DE LA DEMANDA
ENERGÉTICA EN EDIFICIOS RESIDENCIALES
A PARTIR DEL ESTUDIO DE LA ALTURA Y
LA INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Rosalía Pacheco Torres

Noviembre 2014

Editor: Universidad de Granada.Tesis Doctorales
Autor: Rosalía Pacheco Torres
ISBN: 978-81-9125-052-4
URI: <http://hdl.handle.net/10481/39923>

UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE

CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Departamento de Ingeniería de la
Construcción y Proyectos de Ingeniería



PROGRAMA OFICIAL DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA
DEMANDA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS RESIDENCIALES A PARTIR
DEL ESTUDIO DE LA ALTURA Y LA INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Rosalía Pacheco Torres

Granada, noviembre 2014

**EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE MODELO
PARA EL CÁLCULO DE LA DEMANDA
ENERGÉTICA EN EDIFICIOS RESIDENCIALES
A PARTIR DEL ESTUDIO DE LA ALTURA Y
LA INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Memoria de Tesis Doctoral presentada por
Rosalía Pacheco Torres
para aspirar al título de Doctor por la
Universidad de Granada

Fdo.: Rosalía Pacheco Torres

LOS DIRECTORES DE LA TESIS DOCTORAL

D. Javier Ordóñez García

Doctor Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería de la
Construcción y Proyectos de
Ingeniería

Universidad de Granada

D. Germán Martínez Montes

Doctor Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería de la
Construcción y Proyectos de
Ingeniería

Universidad de Granada

La doctoranda Rosalía Pacheco Torres y los directores de la Tesis Javier Ordóñez García y Germán Martínez Montes garantizamos, al firmar esta Tesis Doctoral, que el trabajo ha sido realizado por la doctoranda bajo la dirección de los directores de la Tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Granada, noviembre de 2014

La Doctoranda

Fdo.: Rosalía Pacheco Torres

Los Directores de la Tesis

Fdo.: D. Javier Ordóñez García

Doctor Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería de la
Construcción y Proyectos de
Ingeniería

Universidad de Granada

Fdo.: D. Germán Martínez Montes

Doctor Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería de la
Construcción y Proyectos de
Ingeniería

Universidad de Granada

*A mis padres y mis hermanos,
quienes siempre me alentaron en este camino*

Agradecimientos

Esta tesis doctoral se ha llevado a cabo dentro del Subprograma de Formación del Profesorado Universitario del Plan Propio de Investigación de la Universidad de Granada.

Mi más sincera gratitud a mis dos directores de Tesis: Javier Ordóñez y Germán Martínez. Gracias, Javier, por haberme alentado a iniciar este Doctorado y tu buena disposición desde el primer momento. Gracias, Germán, por haberme orientado y aconsejado sabiamente. Es una suerte haber podido trabajar con ambos, por lo mucho que me habéis enseñado y porque siempre habéis buscado lo mejor para mí.

Quiero expresar mi especial agradecimiento a la Dr. Ruchi Choudhary, de la Universidad de Cambridge, quien me dirigió la estancia en el extranjero y con quien tengo la suerte de seguir trabajando. Gracias por acogerme como una alumna más, por tanto tiempo dedicado y enseñarme a exigirme más.

Gracias también a mi compañera la profesora Eulalia Jadraque, quien siempre me ha ayudado y aconsejado. A las profesoras Mónica López y M^a Dolores Martínez Aires, por su colaboración y su amistad. A la profesora Laura Garach, quien se ofreció para ayudarme con el método de validación. Gracias a mis compañeras Rocío, Griselda y Fátima, por tantos cafés compartidos. A mi querida Gloria, compañera de despacho, con la que he compartido tantos buenos momentos.

Gracias a mis padres, quienes con impagable dedicación nos han educado en los valores del esfuerzo, la constancia y la superación. Siempre pensaron que sus hijos podían llegar un poco más lejos, y siempre acertaron. A mis hermanos Jesús y Pablo, los mejores modelos que he podido tener, y quienes han confiado en mí desde el primer momento y me han alentado a seguir hacia delante. Y al resto de mi familia y amigos, por el apoyo y el cariño recibido. Y a ti, Fer, por darle sentido a tantas cosas.



RESUMEN

ABSTRACT

Residential buildings are responsible of more than one third of the global energy consumption. In Spain, the household sector consumes 25% of all final electricity. Most of this consumption in buildings is due to heating, cooling, interior lighting and use of the equipment.

Traditionally, the energy used to supply this demand comes from non-renewable energy sources, mainly from burning fossil fuels. During the production process of energy from non-renewable sources, greenhouse gases are emitted, mainly carbon dioxide. The increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, mainly due to human activity, cause climate change to accelerate.

The rise in the world's temperature due to climate change has effects on the environmental and the earth's thermal equilibrium, affecting the frequency and intensity of natural phenomenon, the crop cycle, the sea level and the balance among animal and vegetal species.

There is no doubt that if carbon emissions and the natural resource consumption remains the current rate of growth, the ecological, humans and economic consequences will be devastating.

It is estimated that residential buildings are responsible of 33% of global carbon emissions. The policies developed by the European countries to reduce the environmental impact of the residential sector promote the reduction of the energy demand by improving the building energy performance and the increase of the consumption of energy from renewable sources.

There is a variety of energy efficiency actions to be adopted to reduce the environmental impact of residential buildings operation. To assess the effectiveness of these measures, the agents involved should know accurately the energy needs of the buildings and have the properly tools. The energy demand estimation models are tools that allow forecasting the energy consumption of buildings, both in the design phase and using phase. They also allow assess the effectiveness of strategies for reducing consumption, prior to, during and after implantation.

The adoption of design criteria based on improving the energy efficiency in buildings has proved to be an effective measure to reduce the initial demand of the building and therefore the environmental effects of its operation and use by humans. The adoption of energy efficient criteria during the design stage reduces costs and ensures its effectiveness.

On the other hand, the use of renewable energy sources is posed as a clean alternative to the traditional energy generation from fossils fuels, reducing the consumption of natural resources and the level of derived carbon emissions. The integration of renewable energy sources in the building reduces not only its environmental impact, but also it achieves the involvement of users in the sustainability of their environment.

Prior to the design and the implementation of special measures to reduce the energy demand of buildings and the integration of new energy supply systems, it is necessary to know data about the amount of energy consumed, the user's needs that originate this consumption, to what uses it is intended and in what proportion. Knowing the characteristics of buildings energy consumption will provide the information necessary to adopt measures to reduce it and achieve a more efficient use of resources.

Dynamic simulations tools allow to calculate with precision the energy demand of buildings, based on their design and operation conditions. That is why it is important that these simulation tools progress consistently with the sustainability criteria, in order to be able to accurately evaluate the environmental and energy benefits achieved with new sustainable design strategies and the integration of clean energy sources.

This Thesis proposes a calculation model of energy demand of residential buildings by analyzing the building height and the integration of photovoltaic systems to supply a fraction of the energy demand.

Firstly, a review of the state of the art of the aspects which encompasses this research was presented. It was developed a review of the building efficient design criteria. A section was also dedicated to analyse the calculation methods recognized by the Standard ISO 13790 as the reference standard that on this field.

The last section of the start of the art was devoted to the photovoltaic power generation systems.

Afterwards, the methodology developed was detailed. The research focuses on the most common residential building types in Spain. From the data given from the Spanish Ministry of Development, each housing type was characterized and a set of archetypes was designed. The total sample was made up of 85 building profiles where the height is the variable factor.

Once the sample was defined, the model was developed into three phases. Firstly, the initial energy demand of the buildings was calculated. To do this, we conducted a building energy simulation based on a dynamic method. Then, we analyzed the impact of the height factor on the heating and cooling energy demand calculated for each building. Other parameters that define the energy performance of the building and affect the comfort of users are also studied.

Later, the photovoltaic system installed on the building roof and the south-oriented façade of each building, was designed. The energy production of this system was estimated.

Afterwards, the balance between the energy demand and the photovoltaic energy generated in each housing type was calculated. For different useful surfaces values, the functions that calculate the fraction of energy demand supplied by the energy generated in the building were obtained. The results are shown and the variation of the demand for each case study is analyzed. By performing an analysis of variance test, it is proven that the building height impacts on the final energy demand.

Finally, the model robustness was validated. To do so, a case study was evaluated under different climatic and radiative conditions. An analysis of variance test was also conducted to the results obtained.

The model developed in this research, proposes a combination of efficient design of buildings in tandem with the energy self-sufficiency by integrating renewable energy power systems on the building. This approach allows mitigating the carbon emissions due to residential building use, along with a reduction of the external energy dependency.

The methodology followed allows assessing the effect of the building height on the result from the balance between the energy demand and the energy generated from renewable source. The results obtained are applicable to estimate the most suitable geometry features of the building that make it possible to reduce its energy requirements.

The validation of the model confirmed that the building height has effect on final building energy demand, especially on heating and cooling

The results obtained in this research can serve as a support tool in the efficient design of buildings. It can be also applied to estimate the efficacy of energy reduction plans and energy retrofit of buildings. The methodology proposed is presented as a useful tool also in the planning process of new residential spaces.

RESUMEN

Los edificios representan más de un tercio del consumo energético mundial. En España, el sector residencial es responsable del 25% de la demanda de energía eléctrica. La mayor parte de esta energía se emplea en la climatización, la iluminación interior y el uso de los equipamientos del edificio.

Tradicionalmente, la energía empleada para cubrir esta demanda proviene de fuentes energéticas no renovables, principalmente de la quema de combustibles fósiles. En el proceso de producción de energía de fuentes no renovables, se liberan gases de efecto invernadero, mayoritariamente dióxido de carbono. El aumento de la concentración de gases de efecto invernadero debido a la actividad humana es la principal causa de la aceleración del proceso del cambio climático.

El aumento de la temperatura terrestre debido al cambio climático tiene consecuencias sobre el equilibrio ambiental y térmico del planeta, afectando a la frecuencia de fenómenos meteorológicos, el ciclo de los cultivos, el nivel del mar y el equilibrio entre especies.

No existe duda de que si se mantiene el crecimiento de emisiones de carbono y el consumo de recursos naturales al ritmo actual, las consecuencias ecológicas, humanas y económicas del cambio climático serán devastadoras.

Se estima que los edificios residenciales son los responsables del 33% de las emisiones mundiales de carbono. Las políticas desarrolladas por los países europeos para reducir el impacto ambiental del sector residencial, están orientadas, entre otros, a la reducción de la demanda energética a través de la mejora de la eficiencia de los edificios y el aumento de la energía consumida procedente de fuentes de energía renovables.

Son diversas las estrategias de eficiencia energética que se pueden llevar a cabo para disminuir el impacto ambiental del uso de los edificios residenciales. Para evaluar la eficacia de estas medidas, los agentes implicados (arquitectos, ingenieros, investigadores, políticos y usuarios) deben conocer con exactitud el consumo energético de los edificios y contar con las técnicas adecuadas. Los modelos de estimación de la demanda energética son herramientas que permiten

calcular el consumo de edificios, tanto en fase de proyecto como en fase de uso. Permiten además, evaluar la eficacia de las estrategias para la reducción del consumo, antes, durante y después de su implantación.

La adopción de criterios de diseño basados en la mejora de la eficiencia energética de los edificios ha demostrado ser una medida eficaz para reducir la demanda inicial y por tanto las consecuencias ambientales derivadas de su uso. La aplicación de criterios de eficiencia energética durante la fase de diseño reduce los costes de implantación y asegura su eficacia. De entre los aspectos de diseño eficiente del edificio, en esta investigación se va a desarrollar un estudio de la relación entre la altura y la demanda energética del mismo.

Por otra parte, el uso de fuentes energéticas renovables se plantea como alternativa limpia a la generación tradicional de energía mediante la quema de combustibles fósiles. La energía solar fotovoltaica ha sido la fuente renovable que ha experimentado un mayor crecimiento recientemente. Al ser un sistema modular y fácilmente integrable en el edificio, es una de las energías renovables que permite un mayor desarrollo a nivel doméstico.

Previamente a diseñar e implantar medidas orientadas a una reducción de la demanda energética del edificio y a la integración de nuevos sistemas de abastecimiento, es preciso conocer datos acerca del nivel de energía consumida, las necesidades que generan este consumo, a qué usos se destina y en qué proporción. Poder determinar con exactitud las características del consumo de energía en los edificios residenciales permite adoptar medidas para reducirlo y conseguir un uso más eficiente de los recursos.

Las herramientas de simulación dinámica de edificios permiten calcular con precisión la demanda energética en base a sus condiciones de diseño y uso. Es por ello de gran importancia que estas herramientas evolucionen a la par que lo hacen los criterios de diseño sostenible, para evaluar con eficacia sus beneficios ambientales e incluir nuevas formas de abastecimiento de fuentes de energía limpia.

En esta Tesis se propone un modelo de cálculo de la demanda energética de edificios residenciales mediante el análisis de la altura del edificio y la integración de sistemas de generación fotovoltaica para abastecer parte de la demanda.

En primer lugar, se realiza una revisión del estado del arte de los aspectos en los que se engloba esta investigación. Se incluye una retrospectiva de los criterios de diseño eficiente de edificio. Se revisan también los procedimientos de cálculo de la demanda reconocidos por la norma ISO 13790, como principal documento estandarizado que profundiza en este campo. La última sección del capítulo de estado del arte está dedicada a los sistemas de producción de energía solar fotovoltaica.

Posteriormente, se detalla la metodología desarrollada. La investigación abarca las tipologías edificatorias más comunes del sector residencial en España. A partir de los datos ofrecidos por el Ministerio de Fomento, se ha caracterizado cada tipología y diseñado un conjunto de arquetipos. La muestra de estudio está formada por un total de 85 elementos en los que la altura del edificio es la variable de análisis.

Caracterizada la muestra, se ha desarrollado el modelo en tres etapas. En primer lugar, se calcula la demanda energética inicial de los edificios. Para ello, se procede a una simulación dinámica y se analiza la influencia del factor altura en los resultados de la demanda de climatización del edificio. Se analizan los resultados de la variación de la demanda de cada caso estudiado. Se estudian también otros parámetros característicos que definen el comportamiento energético del edificio y afecta al confort de los usuarios.

A continuación, se diseña el sistema de generación fotovoltaica instalado en la superficie de cubierta y en la superficie de la fachada sur de cada uno de los edificios y se procede a estimar la contribución energética de este sistema.

Posteriormente, se calcula el balance entre la demanda de energía y la generación fotovoltaica para cada tipología. Para distintos valores de superficie útil, se obtienen las ecuaciones que permiten calcular el porcentaje de demanda que es abastecido por la energía fotovoltaica generado en el propio edificio. Mediante un análisis del test de la varianza, se prueba que la altura del edificio tiene efecto sobre el nivel de demanda energética del mismo.

Por último, se procede a establecer la validación del modelo. Para ello, se evaluó un caso de estudio bajo condiciones climáticas y radiativas diferentes y se realizó un análisis del test de la varianza a los resultados obtenidos.

En el modelo desarrollado en esta investigación, se propone la combinación del diseño eficiente del edificio, con el autoabastecimiento mediante la integración de sistemas de generación de energías renovables. Todo ello permita mitigar el nivel de emisiones de carbono derivados del uso de los edificios residenciales. Ello conlleva un beneficio ambiental a la par que una reducción de la dependencia energética de fuentes externas al sistema.

La metodología desarrollada permite evaluar la influencia de la altura del edificio en el resultado del balance entre la energía demandada y la energía generada. Los resultados obtenidos son aplicables para estimar las características geométricas óptimas de un edificio que permiten minimizar sus requerimientos energéticos

La validación del modelo ha confirmado que la altura del edificio tiene efecto sobre la demanda energética final, especialmente la de climatización. También se ha corroborado la influencia de las condiciones climáticas y radiativas en la eficacia de medidas de reducción de la demanda energética.

Los resultados obtenidos en esta investigación pueden servir de apoyo para el diseño de edificios eficientes y para la valoración de acciones de reducción de la demanda y rehabilitaciones energéticas de edificios existentes. La metodología desarrollada se plantea como una herramienta técnica útil también en el proceso de planificación de nuevas zonas residenciales.



ÍNDICE

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1.....	23
1.1. OBJETIVOS Y OPORTUNIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.....	25
1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS	27
CAPÍTULO 2.....	31
2.1. CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECTOR RESIDENCIAL.....	33
2.1.1. El cambio climático y las emisiones de gases efecto invernadero	33
2.1.2. Políticas de lucha contra el cambio climático	40
2.1.3. El consumo energético en el sector residencial	43
2.1.4. Evolución del sector residencial en los próximos años.....	50
2.1.5. Estrategias para reducir el consumo energético en edificios	51
2.2. ESTRATEGIAS PARA EL DISEÑO EFICIENTE DE EDIFICIOS	53
2.2.1. Diseño climático de edificios	53
2.2.2. Influencia de la forma en la optimización energética del edificio	54
2.2.3. Orientación	60
2.2.4. Influencia de la envolvente del edificio en la demanda energética	66
2.2.5. Factor sombra y control de la radiación solar	73
2.2.6. Sistemas pasivos.....	81
2.2.7. Estudio del tipo de vidrio	93
2.3. CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS.....	99
2.3.1. Confort térmico y demanda de climatización	100
2.3.2. Procesos de transferencia de calor en edificios	103
2.3.3. Conceptos de masa térmica e inercia del edificio	115
2.3.4. Métodos de cálculo reconocidos por la Directiva Europea de Eficiencia Energética en Edificios.....	118
2.4. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	131

2.4.1. Situación del sector fotovoltaico	131
2.4.2. Descripción de los sistemas fotovoltaicos	135
2.4.3. El módulo solar fotovoltaico	138
2.4.4. Integración arquitectónica de los sistemas de energía solar fotovoltaica	146
CAPÍTULO 3.....	149
3.1. MODELOS TOP-DOWN, BOTTOM-UP Y METODOLOGÍA DEL ARQUETIPO	152
3.2. CONSTRUCCIÓN DE LOS ARQUETIPOS Y OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE ESTUDIO	155
3.2.1. Tipologías de viviendas	155
3.2.2. Modelo de zonas térmicas	162
3.2.3. Sistemas constructivos, acabados, materiales y valores de transmisión térmica	167
3.2.4. Obtención de la muestra de estudio.....	171
3.3. DISEÑO DEL MODELO.....	180
3.3.1. Simulación energética de los casos de estudio	180
3.3.2. Diseño del sistema fotovoltaico	187
3.4. RESULTADOS.....	190
3.4.1. Resultados de la simulación con EnergyPlus™.....	190
3.4.2. Resultados del modelo	218
3.5. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	231
3.5.1. Validación del modelo para climas cálidos	232
3.5.2. Validación del modelo para otras condiciones climáticas.....	233
CAPÍTULO 4.....	243
CONCLUSSIONS	245
FUTURE RESEARCH PROSPECTS	248
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	253

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Mapa de emisiones globales de gases de efecto invernadero per cápita por país, durante el periodo 1990 – 2010, medido en toneladas por persona.....	35
Figura 2.2. Distribución de emisiones de gases efecto invernadero.....	37
Figura 2.3. Evolución de emisiones de carbono durante el período 1848-2008, en millones de toneladas de carbono.....	37
Figura 2.4. Emisiones de CO2 entre 1990 y 2010, expresadas en billones de toneladas de CO2.....	38
Figura 2.5. Mapa del consumo energético del sector residencial en Europa.....	44
Figura 2.6. Consumo energético del sector residencial en los 28 países de la UE, expresado en ktep.....	45
Figura 2.7. Intensidad consumo energético sector residencial por persona, en tep, de electricidad y total, países de la UE 28.	46
Figura 2.8. Distribución del consumo de energía en hogares para el caso de España, Reino Unido y Estados Unidos.....	47
Figura 2.9. Distribución del consumo energético de la Unión Europea, año 2013.	48
Figura 2.10. Consumo de energía primaria por tipo de energía en España y distribución de energías renovables consumidas, año 2012.....	49
Figura 2.11. Consumo de energía final del sector residencial, año 2010.....	50
Figura 2.12. Edificios con diferentes índices de compacidad: índice de compacidad 3,45 (izda.) e índice de compacidad 5 (dcha.).....	56
Figura 2.13. Ciclo de vida de un edificio.....	58
Figura 2.14. Ahorro energético posible según factor de forma y orientación.....	63
Figura 2.15. Efecto del alero sobre la radiación incidente en una ventana.....	76
Figura 2.16. Ejemplos de edificios “auto-sombreadantes”.....	78
Figura 2.17. Sección de un edificio mostrando un ángulo de obstrucción de 25....	79

Figura 2.18. Diagrama solar para latitud de 55°, con líneas de obstrucción de 10° y 40°	80
Figura 2.19. Volumen solar como conjunción de envolvente de derecho solar (plano superior)	81
y envolvente de recepción solar (plano inferior).....	81
Figura 2.20. Clasificación de sistemas pasivos de enfriamiento.....	82
Figura 2.21. Esquema funcionamiento sistema ventilación natural.....	84
Figura 2.22. Sistema enfriamiento evaporativo.....	86
Figura 2.23. Modalidades de muro Trombe.....	88
Figura 2.24. Modalidades de chimenea solar.....	89
Figura 2.25. Esquema funcionamiento pared solar metálica.	90
Figura 2.26. Clasificación de los materiales de cambio de fase.....	91
Figura 2.27. Transmisión de luz a través de un vidrio selectivo del ángulo.	96
Figura 2.28. Soluciones constructivas para giro del vidrio	97
Figura 2.29. Diagrama de Givoni para países desarrollados.....	102
Figura 2.30. Distribución de temperatura a través de una pared plana en régimen permanente y la analogía con un circuito térmico y eléctrico.	106
Figura 2.31. Esquema de transmisión de calor en un muro exterior	109
Figura 2.32. Esquema de transferencia de calor a través de una pared plana de dos materiales y el equivalente en resistencias térmicas.	113
Figura 2.33. Procesos de transferencia de calor implicados en la simulación energética de edificios.	122
Figura 2.34. Flujo de datos de un motor de simulación.....	128
Figura 2.35. Crecimiento anual de la capacidad instalada por fuente de energía renovable.	132
Figura 2.36. Ranking de los países con mayor capacidad de energía solar fotovoltaica instalada.	133

Figura 2.37. Capacidad fotovoltaica acumulada en algunos países europeos para el periodo 2005-2013.....	134
Figura 2.38. Esquema de sistema solar fotovoltaico aislado.	137
Figura 2.39. Esquema de sistema solar fotovoltaico conectado a red.....	137
Figura 2.40. Efecto fotoeléctrico.	138
Figura 2.41. Curva intensidad-tensión.	146
Figura 3.1. Técnicas ascendentes y descendentes para estimar el consumo del sector residencial a nivel regional o nacional.....	152
Figura 3.2. Clasificación de licencias de obra nueva otorgadas.	158
Figura 3.3. Licencias de obra otorgadas en el año 2007.....	159
Figura 3.4. Planos de distribución de los arquetipos de viviendas (izda.) y equivalentes en zonas térmicas (dcha.)	165
Figura 3.5. Definición de los grupos de viviendas adosadas estudiadas, desde 2 hasta 10 viviendas.....	172
Figura 3.6. Casos de estudio de un edificio que alberga un total de cinco viviendas.	175
Figura 3.7. Esquema de los módulos de cálculo que componen EnergyPlus™.....	181
Figura 3.8. Cargas internas en kJ debido a la ocupación, iluminación artificial y uso del equipamiento en cada zona térmica.	185
Figura 3.9. Demanda de climatización y diferencia con respecto al edificio de vivienda aislada.....	191
Figura 3.10. Demanda diaria de calefacción del edificio de vivienda aislada y los edificios de viviendas adosadas según la variación de la temperatura exterior....	192
Figura 3.11. Demanda diaria de refrigeración del edificio de vivienda aislada y los edificios de viviendas adosadas según la variación de la temperatura exterior....	193
Figura 3.12. Demanda de calefacción y refrigeración según el número de plantas en altura para cada caso de estudio de bloque de viviendas plurifamiliar.	195
Figura 3.13. Demanda de calefacción según el ratio fachada/suelo.	196

Figura 3.14. Promedio horario de demanda de calefacción para todos los casos de estudio según el número de viviendas y altura.....	199
Figura 3.15. Demanda diaria de calefacción y promedio de temperatura exterior para todos los casos de estudio según el número de viviendas y altura.	203
Figura 3.16. Valor de desviación típica según el ratio fachada/suelo.	204
Figura 3.17. Valor de la desviación típica de datos según caso de estudio y altura del edificio.	206
Figura 3.18. Valor de la desviación típica mensual para el caso de estudio de bloque de 15 viviendas.	207
Figura 3.19. Demanda de refrigeración según ratio fachada/suelo.....	208
Figura 3.20. Promedio horario de demanda de refrigeración para todos los casos de estudio.....	210
según el número de viviendas y altura.	210
Figura 3.21. Demanda diaria de refrigeración y promedio de temperatura exterior para todos los casos de estudio según el número de viviendas y altura.	214
Figura 3.22. Valor de desviación típica según el ratio fachada/suelo.	215
Figura 3.23. Valor de la desviación típica mensual para el caso de estudio de	216
bloque de 15 viviendas.	216
Figura 3.24. Número de horas de demanda de calefacción y kWh/m ² de demanda para cada caso de estudio.....	218
Figura 3.25. Porcentaje de demanda energética abastecido por energía fotovoltaica para los casos de estudio de edificio de vivienda aislada y edificio de viviendas adosadas.....	219
Figura 3.26. Demanda energética y energía fotovoltaica generada para cada caso de edificio de vivienda plurifamiliar estudiado.	221
Figura 3.27. Ecuaciones logarítmicas que se ajustan a las curvas de demanda energética final por metro cuadrado de superficie útil.	223

Figura 3.28. Demanda energética total de un edificio que puede ser abastecida por energía solar fotovoltaica, según la altura del edificio para todos los casos de estudio.....	226
Figura 3.29. Intervalos de diferencia mínima significativa (95% de confianza) según la altura del edificio.....	233
Figura 3.30. Mapa de radiación solar y localización de las ciudades consideradas.	234
Figura 3.31. Temperatura promedio, máxima y mínima exterior de las ciudades de París (color verde) y Oslo (color azul).....	235
Figura 3.32. Demanda de calefacción del caso de estudio en las tres ciudades comparadas.....	237
Figura 3.33. Demanda de refrigeración del caso de estudio en las tres ciudades comparadas.....	238
Figura 3.34. Resultados de demanda energética y porcentaje de demanda abastecido por energía fotovoltaica obtenidos con el modelo de evaluación propuesto, para el caso de estudio en las tres localizaciones consideradas.....	239
Figura 3.35. Intervalos de diferencia mínima significativa (95% de confianza) según localización.....	241
Figura 3.36. Intervalos de diferencia mínima significativa (95% de confianza) según la altura del edificio para las ciudades de París y Oslo.....	242

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Parámetros que determinan las necesidades energéticas del edificio.....	54
Tabla 2.2. Ahorro energético obtenido según la orientación de un edificio de planta rectangular.	65
Tabla 2.3. Consumo energético de una oficina según la orientación.....	66
Tabla 2.4. Ángulos de obstrucción de la luz debido a elementos próximos, según la latitud del emplazamiento.....	80
Tabla 2.5. Categorías del ambiente térmico según los valores de PMV y PDD del método Fanger.....	101
Tabla 3.1. Edificios según tipo de obra y destino por provincias.....	159
Tabla 3.2. Superficie a construir de nueva planta según destino por provincias (miles m ²).	160
Tabla 3.3. Número de viviendas de nueva planta según tipo y provincia.....	161
Tabla 3.4. Número de viviendas y superficie media útil por tipología de vivienda y provincia (m ²).	162
Tabla 3.5. Características geométricas de zonas térmicas por tipología de vivienda.	166
Tabla 3.6. Valores dimensionales de las tipologías de viviendas consideradas.	167
Tabla 3.7. Porcentaje de edificios residenciales por tipo de cerramientos y carpintería.	168
Tabla 3.8. Propiedades térmicas de los sistemas constructivos y materiales empleados.....	170
Tabla 3.9. Parámetros dimensionales de la tipología de edificio de vivienda unifamiliar aislada.....	172
Tabla 3.10. Parámetros dimensionales de la tipología de edificio de viviendas unifamiliares adosadas.....	173

Tablas 3.11a y 3.11b. Parámetros dimensionales de los casos de estudio de la tipología de edificios de viviendas plurifamiliares.....	177
Tabla 3.12. Valores climáticos medios mensuales/anuales en Granada, España..	184
Tabla 3.13. Ratios de ocupación, fuentes de iluminación artificial y potencias de las instalaciones de iluminación y del equipamiento.....	186
Tabla 3.14. Propiedades del panel fotovoltaico.....	188
Tabla 3.15. Funciones polinómicas ajustadas de demanda de calefacción.....	197
Tabla 3.16. Funciones lineales ajustadas de demanda de refrigeración.....	209
Tabla 3.17. Resultados del modelo.....	228
Tabla 3.18. Datos climáticos y de radiación solar de las localizaciones consideradas.....	236

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- ANOVA: *ANalysis Of Variance*, análisis de la varianza
- ASHRAE: *American Society for Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineering*
- Btu: *British thermal unit*, unidad energética británica
- CCV: Coste del Ciclo de Vida
- CE: Coste Energético
- CEN: Comité Europeo de Normalización
- CES: Coeficiente de ahorro de Energía de la radiación solar Sintética
- CFC: Clorofluorocarbonos
- CI: Coste Inicial
- CIGS: Cobre, Indio, Galio y Selenio
- CIS: Cobre, Indio y Selenio
- CO: Coste de Operación o funcionamiento
- CS: Coeficiente de Sombra
- CTE: Código Técnico de la Edificación
- DB-HE: Documento Básico de Ahorro de Energía
- DD: *Degree Days*, días-grado
- DR: *Draught Risk*, porcentaje de población molesta por corrientes de aire
- DSSC: *Dye Sensitized Solar Cell*
- EDGAR: *Emission Database for Global Atmospheric Research*
- EPBD: *European Performance Building Directive*, Directiva Europea de eficiencia energética en edificación
- GEI: Gases de Efecto Invernadero
- IAC: Impacto Ambiental debido a la Construcción
- IACV: Impacto Ambiental del Ciclo de Vida
- IAO: Impacto Ambiental debido a la Operación o funcionamiento
- IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
- INE: Instituto Nacional de Estadística
- IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

ktep: kilotonelada equivalente de petróleo

LSD: *Least Significant Difference*, diferencia mínima significativa

MDL: Mecanismo de Desarrollo Limpio

OECD: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

PCM: Potencia de Calentamiento Mundial

PCMs: *Phase Change Materials*, materiales de cambio de fase

PD: *Percentage of Dissatisfied*, porcentaje de insatisfechos

PDD: *Predicted Percentage of Dissatisfied*, porcentaje de insatisfechos estimado

PMV: *Predicted Mean Vote*, voto estimado medio

PWF: *Present Wrot Factor*

STC: *Standard Test Conditions*

TONC: Temperatura de Operación Nominal de la Célula

UE: Unión Europea

VAN: Valor Actualizado Neto

VCN: Valor Calorífico Neto

VD: Variable Dependiente

VI: Variable Independiente

WWR: *Window to Wall Ratio*



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS Y OPORTUNIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

La sostenibilidad de los modelos de desarrollo es uno de los principales objetivos de nuestra sociedad y el reto de las nuevas tecnologías, y busca garantizar el porvenir de las generaciones futuras.

El cambio climático es un problema ambiental que afecta al equilibrio de nuestro ecosistema. La principal causa de la aceleración de este fenómeno son las emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia de la actividad del hombre. De entre todos los gases de efecto invernadero, el dióxido de carbono es el emitido en mayor cantidad. La mayor parte de las emisiones de dióxido de carbono se producen por la combustión de combustibles fósiles como consecuencia de la generación de electricidad para satisfacer las necesidades humanas (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2007)

Los edificios representan más de un tercio del consumo energético mundial y se prevé una tasa de crecimiento mayor que el resto de sectores (U.S. Energy Information Administration, 2013). Para el año 2040 la población mundial será de 9 billones de personas (Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, 2013) y la demanda energética de los edificios pasará de 81 cuatrillones de Btu en 2010 a 131 cuatrillones de Btu, con una tasa de crecimiento anual del 1.6% (U.S. Energy Information Administration, 2013)

Reducir las emisiones de carbono asociadas al sector residencial y su consumo energético constituye un mecanismo para mitigar el impacto ambiental del ser humano y garantizar el abastecimiento energético de la población.

Las acciones iniciadas para conseguir estos objetivos se fundamentan en tres pilares: reducción de la demanda, mejora de la eficiencia de los sistemas y consumo de energías renovables en detrimento de los combustibles fósiles. Para la autora de esta investigación, el conocimiento del comportamiento energético de

los edificios residenciales constituye una base para definir propuestas relacionadas con estas medidas.

El diseño eficiente ha demostrado, tal y como se justificará en el capítulo 2 de este documento, ser una herramienta eficaz para reducir la demanda energética del edificio sin repercutir en el confort de los usuarios. La aplicación de criterios de eficiencia energética durante la fase de diseño reduce los costes de implantación y asegura su eficacia. Un estudio adecuado de factores como: la orientación, forma, altura y control de la radiación solar permite mejorar el comportamiento energético del edificio. Conocer la distribución de la demanda del edificio en la fase de diseño es fundamental para la integración de acciones de reducción de la demanda energética.

Por otra parte, el uso de fuentes energéticas renovables se plantea como alternativa limpia, a la generación tradicional mediante la quema de combustibles fósiles, reduciendo el consumo de recursos naturales y el nivel de emisiones de carbono derivadas. La integración de sistemas de generación de energías renovables en el propio edificio no sólo reduce el impacto ambiental, sino que consigue la implicación de los propios usuarios en la sostenibilidad de su entorno.

Los modelos de simulación energética de edificios y cálculo de la demanda son herramientas útiles para conocer con exactitud la distribución de la demanda energética y el consumo.

Los modelos de cálculo deben evolucionar a la par que los criterios de sostenibilidad energética, para que sean capaces de evaluar con eficacia los beneficios ambientales y energéticos de las técnicas de diseño sostenible y la integración de nuevas fuentes energéticas.

En esta tesis doctoral se presenta un modelo de cálculo de la demanda que combina la aplicación de criterios de diseño de eficiencia energética mediante un estudio de la forma del edificio y la integración de sistemas de generación de energía solar fotovoltaica.

Objetivos

Tal y como se ha expuesto anteriormente, reducir la demanda energética final en edificios residenciales y la integración de energías renovables constituye una de las líneas de actuación para la reducción de emisiones de carbono asociadas al edificio y por tanto, el impacto ambiental derivado de la actividad humana.

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar un modelo de cálculo de la demanda energética de edificios mediante la conjunción del estudio de la altura y la integración de sistemas de generación de energía solar fotovoltaica para abastecer parte de la demanda. Se pretende con este modelo valorar la eficacia de la combinación de un diseño eficiente del edificio con el uso de energía renovable.

De forma más concreta, los objetivos que se pretenden alcanzar son:

- Construir los arquetipos de las tipologías constructivas que caracterizan al sector residencial
- Analizar la influencia de la altura del edificio en la demanda energética para climatización
- Obtener la energía eléctrica producida por una instalación solar fotovoltaica ubicada en la cubierta y la fachada del edificio
- Obtener las curvas de demanda final y las funciones que las definen
- Validar el modelo y evaluar su robustez

1.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este documento de Tesis Doctoral recoge la investigación llevada a cabo en el ámbito del desarrollo de un modelo de cálculo de la demanda energética de edificios residenciales.

Expresadas las motivaciones de esta investigación y los objetivos de la misma, se presenta la estructura del documento.

En el capítulo 2 se presenta una revisión del estado del arte de los aspectos en los que se engloba esta investigación. En primer lugar, se realiza un análisis del consumo energético del sector residencial, con el problema del cambio climático como telón de fondo. Posteriormente, se desarrolla una revisión de los criterios de diseño eficiente de edificio y de los estudios de otros autores que han profundizado en esta materia.

El edificio supone un sistema complejo en el que la demanda de energía para satisfacer las necesidades de los usuarios se verá afectada por las condiciones de contorno. Se dedica una sección a describir los procesos de transferencia de calor presente en el edificio y a explicar el concepto de inercia térmica. Se finaliza esta sección con una revisión de los procedimientos de cálculo de la demanda reconocidos por la norma ISO 13790 *Eficiencia energética de los edificios – cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración (Energy performance of buildings – calculation of energy use for space heating and cooling)*, como principal documento estandarizado que profundiza en este campo.

La última sección del capítulo de estado del arte está dedicada a los sistemas de producción de energía solar fotovoltaica. Se aborda el estado del sector fotovoltaico como la fuente de energía renovable que ha experimentado una mayor expansión recientemente. Con la intención de conocer mejor las cuestiones teóricas en las que se basa la producción de energía solar fotovoltaica, se explican brevemente los fundamentos del efecto fotoeléctrico y los tipos de células solares existentes en el mercado.

El capítulo 3 recoge el procedimiento de diseño del modelo, los resultados obtenidos y su validación. La sección 3.1 resume los modelos de estudio de la demanda energética de edificios y presenta la metodología del arquetipo, empleada en las etapas siguientes.

Para conocer mejor el objeto de nuestro estudio, el sector residencial, en la sección 3.2 se realiza un análisis de las tipologías edificatorias residenciales más comunes en nuestro país, en base a los datos de licencias de obra nueva recogidos por el Ministerio de Industria. Una vez conocidas estas tipologías, se procede a su caracterización, identificando los sistemas constructivos, materiales y valores de transmisión térmica que las definen. Por último, se crea un modelo de zonas

térmicas para cada tipología. Una vez conocidas las tipologías edificatorias a estudiar, se procede al diseño de la muestra, en la que se adopta el factor altura del edificio como la variable de estudio. Esta muestra está formada por conjuntos de edificios en los que la superficie total útil es fija y la altura el factor variable.

En la sección 3.3 se procede al diseño del modelo de cálculo de la demanda energética bajo las condiciones climáticas y de radiación solar de la ciudad de Granada.

La metodología de diseño del modelo consta de tres fases. Primero, se procede a la estimación de la demanda energética inicial de cada tipología. Para ello, los edificios de la muestra han sido evaluados con la herramienta de cálculo dinámico EnergyPlus™. Se realiza una breve descripción de las características de este software, incluyendo una retrospectiva de las investigaciones previas que lo han empleado como herramienta de cálculo. El proceso de simulación se detalla paso a paso y se recogen todos los datos de entrada requeridos. Como resultado de esta fase, se obtiene los datos de demanda horaria para calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria y el uso del equipamiento de cada uno de los edificios que componen la muestra de estudio.

En la segunda fase de la metodología, se procede al cálculo de la energía generada en cada edificio mediante la instalación de sistemas de generación fotovoltaicos en la superficie de la cubierta y en la superficie útil de la fachada sur. Se describen las características de los dispositivos que forman el sistema y las bases de cálculo empleadas.

Los resultados obtenidos y la discusión de los mismos se presentan en la sección 3.4. Primero se analizan los resultados de demanda obtenidos para cada edificio y se analizan los patrones diarios y mensuales de la demanda de climatización y refrigeración según la altura. Se evalúa también el valor de la dispersión de datos obtenido para cada tipología.

Por último, se realiza el balance energético entre la demanda y el aporte de los sistemas de generación fotovoltaicos. Se obtienen los porcentajes de demanda inicial que pueden ser abastecidos por la energía solar fotovoltaica y se analiza la evolución de estos valores según la altura del edificio. Finalmente, para cada

superficie total útil, se obtienen las curvas de demanda final y un conjunto de ecuaciones que las definen.

Para dotar de mayor consistencia al modelo propuesto, en la sección 3.5 se valida la consistencia del modelo mediante una serie de test de análisis de la varianza. Este test se emplea para confirmar la hipótesis de partida de que existe una relación entre la demanda por superficie útil del edificio y la altura del mismo. Con el objetivo de valorar la robustez de la metodología propuesta, el modelo se evalúa para el caso de dos ciudades europeas con distintas características climáticas. La diferencia de resultados entre ciudades y su influencia en la consistencia del modelo se evalúan mediante el desarrollo un test de análisis de la varianza.

El capítulo 4 recoge las conclusiones de esta investigación y las aportaciones más relevantes. En el capítulo 5 se exponen las líneas de investigación que quedan abiertas tras la conclusión de este trabajo.



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECTOR RESIDENCIAL

Los edificios representan más de un tercio del consumo energético mundial. En concreto, los edificios residenciales representan más del 38% del consumo energético final (International Energy Agency, 2008). La energía demandada por estos edificios es destinada a satisfacer las necesidades de la climatización, la iluminación y el uso del equipamiento de los usuarios.

Tradicionalmente, la energía empleada para cubrir esta demanda proviene de fuentes energéticas no renovables, principalmente la quema de combustibles fósiles.

En esta sección, se realiza una revisión de los efectos medioambientales de este gasto energético y de las políticas activas para mitigar su impacto. Se desarrolla también un análisis de la distribución de la demanda energética en los edificios residenciales.

2.1.1. El cambio climático y las emisiones de gases efecto invernadero

Atendiendo a la definición de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1992, se entiende por cambio climático *“un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”*.

En 2007, el Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de la Organización de las Naciones Unidas, puso de manifiesto que *“El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar”*.

Se prevé, para el año 2050, un incremento de la temperatura terrestre de 1.92 °C comparado con niveles pre-industriales (Aaheim, Amundsen, Dokken, Ericson, & Wie, 2009). El aumento de la temperatura terrestre debido al cambio climático tiene consecuencias en el equilibrio ambiental y térmico del planeta, afectando a la frecuencia de fenómenos meteorológicos, el ciclo de los cultivos, el nivel del mar, el equilibrio entre especies y con impactos sobre la salud humana. Los países más vulnerables a las consecuencias del calentamiento global coinciden con áreas menos desarrolladas, como el sur y el sureste de Asia, el norte de África y el África sub-Sahariana (Eboli, Bosello, & Pierfederici, 2013).

El efecto invernadero es la causa principal del cambio climático. Este efecto se produce de forma natural en la tierra y es necesario para asegurar una temperatura terrestre que permita la vida. La energía que llega del sol, formada por ondas de frecuencias altas, al proceder de un cuerpo de elevada temperatura, traspasa con facilidad la atmósfera. Posteriormente, la Tierra emite energía hacia el exterior, pero al proceder de un cuerpo más frío, las ondas son de frecuencias más bajas y son absorbidas por los gases de efecto invernadero, reteniéndose así el calor en el sistema superficie-troposfera (Gribbin, 1990).

Se conocen como gases de efecto invernadero (GEI) a aquellos componentes de la atmósfera que absorben y re-emiten radiación infrarroja, ya sean componentes naturales o antropógenos (causados por la acción directa o indirecta del hombre). Un aumento de la concentración de estos gases provoca una mayor opacidad infrarroja de la atmósfera, originando un forzamiento radiactivo que intensifica el efecto invernadero, suscitando así el conocido como efecto invernadero intensificado (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2007).

Los cambios positivos o negativos del balance de energía por efecto de los gases de efecto invernadero se expresan en términos de forzamiento radiativo (magnitud utilizada para comparar las influencias de naturaleza térmica sobre el clima mundial). La alteración del equilibrio de las concentraciones de GEI en la atmósfera, y las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran la estabilidad energética del sistema climático.

Desde 1970, las emisiones mundiales de GEI como consecuencia de la actividad humana han aumentado un 70%, principalmente debido a los sectores de suministro de energía, transporte e industria (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2007). El siguiente mapa muestra el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero per cápita en el año 2010, extraído de la Base de Datos de Emisiones para la Investigación Atmosférica Global EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research, 2010).

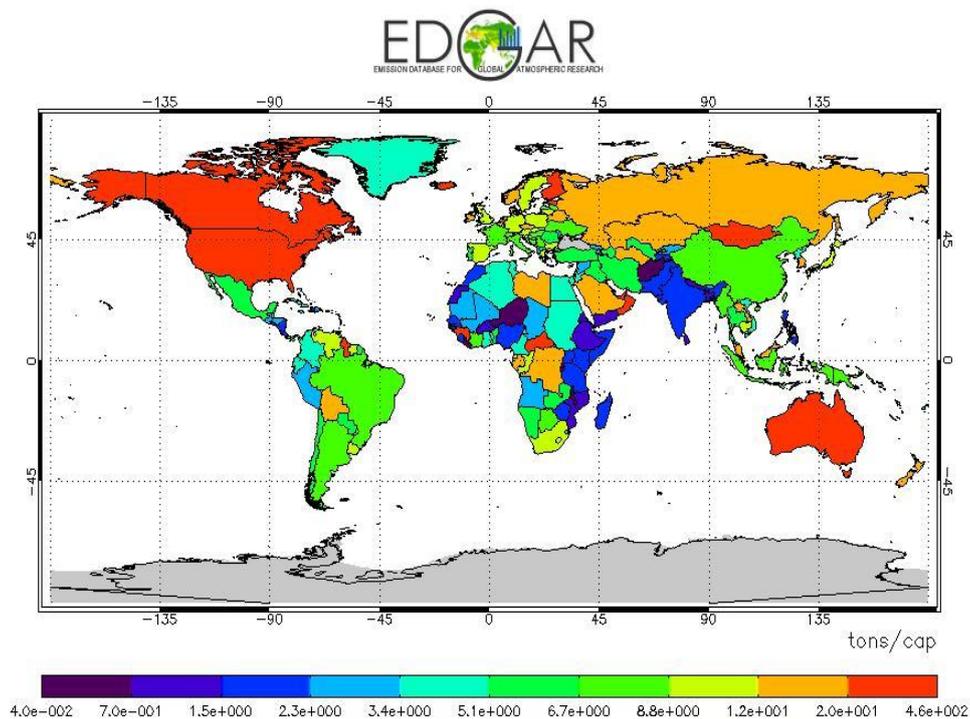


Figura 2.1. Mapa de emisiones globales de gases de efecto invernadero per cápita por país, durante el periodo 1990 - 2010, medido en toneladas por persona. Fuente: EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research, 2010)

Los gases de efecto invernadero más comunes, como el dióxido de carbono, el metano y el ozono, están presentes de forma natural en la atmósfera y son vitales para la vida. Un aumento de su concentración, como consecuencia de procesos no naturales, rompe el equilibrio existente.

Los GEI más importantes y sus fuentes de emisión naturales y no naturales son:

- Dióxido de Carbono (CO₂): se libera en procesos naturales como la respiración o las erupciones volcánicas. Es el gas más emitido por el ser humano en sus actividades como la quema de combustibles fósiles o la deforestación.
- Metano (CH₄) es más activo que el dióxido de carbono, aunque menos abundante. La principal fuente natural de producción de metano son los lugares en los que se produce una descomposición anaeróbica, tales como vertederos, pantanos o como resultado de la digestión de seres vivos.
- Óxidos de Nitrógeno (N₂O y NO₂ principalmente): el óxido nitroso se produce principalmente debido al uso de fertilizantes comerciales y orgánicos, la quema de combustibles fósiles, la producción de ácido nítrico y la quema de biomasa. Un 60% de la emisión de origen antropogénico se concentra en el Hemisferio Norte.
- Ozono troposférico y estratosférico (O₃): el ozono estratosférico es de origen natural y absorber gran parte de la componente ultravioleta de la radiación solar. El ozono troposférico es el resultado de reacciones químicas de otros contaminantes como los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y el metano.
- Clorofluorocarbonos (CFC): son productos sintéticos de origen industrial compuestos de carbono y ciertos halógenos tales como cloro, bromo, flúor e hidrógeno, más peligrosos que el dióxido de carbono. Se emplean propulsores en aerosoles y como componentes de espumas plásticas y productos de limpieza.

El dióxido de carbono (CO₂) es el GEI más importante, no por ser el más nocivo de todos, sino por ser el que está en mayores concentraciones en la atmósfera y el más emitido, representando más del 70% del total de emisiones (ver figura 2.2) Sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80% en los últimos 35 años, más que ningún otro gas.

Emisiones de GEI por gas

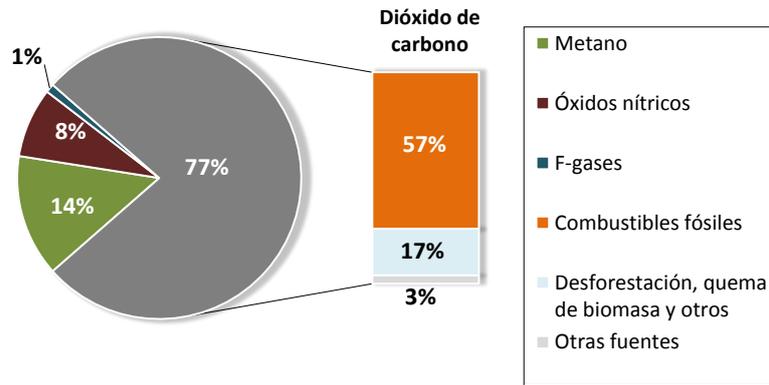


Figura 2.2. Distribución de emisiones de gases efecto invernadero. Fuente: (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2007)

Las principales fuentes antropogénicas de emisiones de carbono son la quema de combustibles, el transporte y las actividades de edificios residenciales. La quema de combustibles es la fuente de emisiones que más ha crecido en los últimos cincuenta años (figura 2.3)

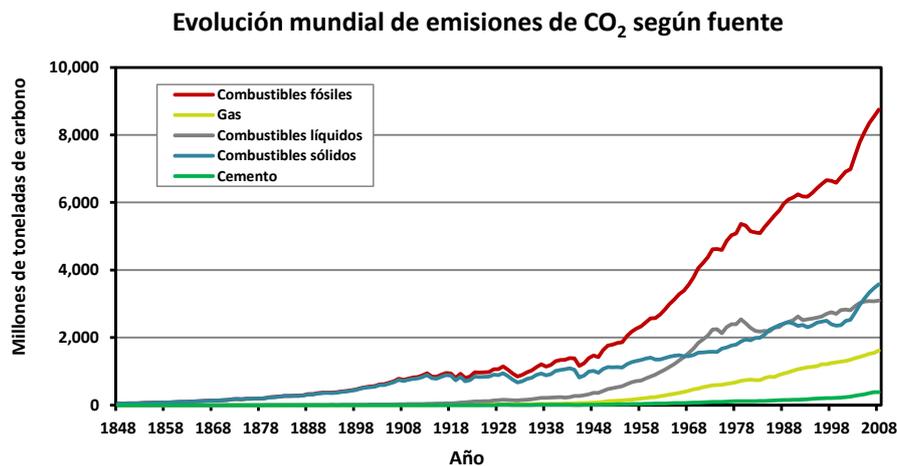


Figura 2.3. Evolución de emisiones de carbono durante el período 1848-2008, en millones de toneladas de carbono. Fuente: (Carbon Dioxide Information Analysis Center, 2014)

Los países responsables de las mayores emisiones de carbono a la atmósfera son EEUU y China, seguidos de la Unión Europea. El nivel de emisiones de carbono de un país es reflejo del nivel de industrialización, como consecuencia de la inexistencia, hasta hace poco, de políticas de freno de emisiones debido a las actividades industriales. En el siguiente gráfico se aprecia el despegue de emisiones en China coincidiendo con su etapa de mayor expansión económica y desarrollo industrial (figura 2.4)

Igualmente, un descenso de la actividad económica e industrial se refleja en una disminución de las emisiones de carbono. Este es el ejemplo de Rusia, cuyo descenso de emisiones durante la primera parte de la década de los noventa coincide con la caída de la antigua Unión Soviética y el comienzo de una etapa de decrecimiento en el país. En EEUU y Europa, por ejemplo, puede apreciarse el punto de inflexión que se produce en 2009 coincidiendo con la crisis económica.

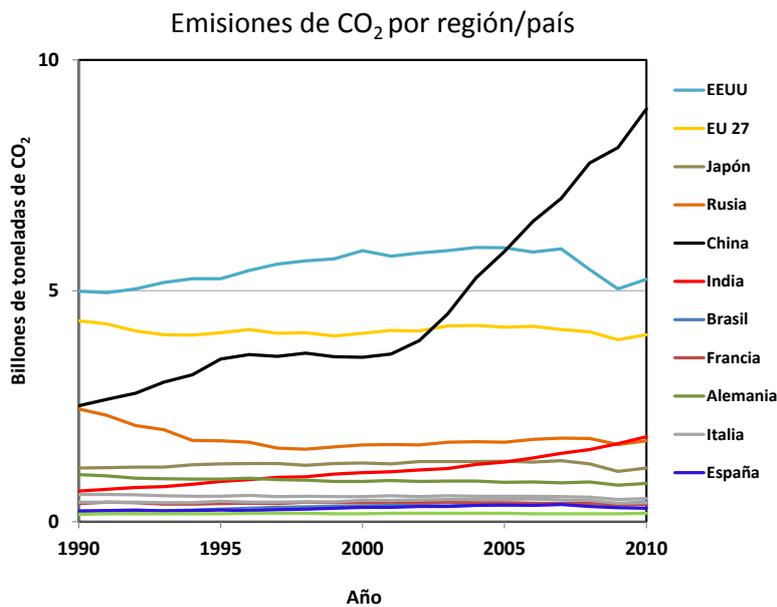


Figura 2.4. Emisiones de CO₂ entre 1990 y 2010, expresadas en billones de toneladas de CO₂.

Fuente: (Olivier, Janssens-Maenhout, Peters, & Wilson, 2011)

Emisiones de CO₂ equivalente

Los efectos de los GEI sobre el sistema climático mundial presentan diferentes propiedades radiativas y tiempo de permanencia en la atmósfera terrestre. Las influencias que estos gases ejercen pueden expresarse mediante una métrica común basada en el forzamiento radiativo por CO₂ (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2007).

La concentración de CO₂ equivalente es la concentración de CO₂ que generaría el mismo forzamiento radiativo que una mezcla dada de CO₂ y de otros componentes de forzamiento (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2007). Se obtienen multiplicando la cantidad de GEI emitida por su potencial de calentamiento mundial (PCM). Este índice constituye un valor de referencia y una métrica útil para comparar emisiones de GEI diferentes, pero no implican respuestas idénticas al cambio climático.

En el caso de las emisiones asociadas al consumo energético de los edificios, la energía final proviene de diversas fuentes y cada tipo de combustible empleado para obtener esta energía lleva asociado un nivel diferente de emisiones por volumen específico (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2008).

Para poder cuantificar el nivel de emisiones de CO₂ asociadas al consumo de energía primaria y energía final, existen unos coeficientes de paso, que se aplican según la ecuación 2.1:

$$\text{Emisiones CO}_2 \text{ totales} = \frac{(E_{\text{final fuente } i} *}{K_{\text{emisión CO}_2 \text{ fuente } i}} + \frac{(E_{\text{final fuente } j} *}{K_{\text{emisión CO}_2 \text{ fuente } j}} \quad (2.1)$$

donde $E_{\text{final fuente } i}$ es la cantidad de energía final consumida para la fuente energética i y $K_{\text{emisión CO}_2 \text{ fuente } i}$ es el factor de conversión o coeficiente de paso para la fuente energética i y depende, en gran medida, de la fuente de energía primaria empleada para producir la energía final correspondiente. La energía primaria es la consumida por el productor o empresa eléctrica mientras que la energía final es la entregada a los consumidores.

En el caso de España, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía publica temporalmente un listado, tanto de los factores de conversión de energía final a energía primaria como de los factores de emisión de CO₂, para cada fuente energética. El conjunto de estos coeficientes de conversión son el resultado del mix de producción energética y da una indicación del nivel de contaminación que produce el sistema energético global de un país o región. En el caso de la electricidad en un sistema de no co-generación, las emisiones dependen de la estructura energética del país (o en su caso de la empresa productora) (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2008).

2.1.2. Políticas de lucha contra el cambio climático

El instrumento jurídico más importante en la acción contra el cambio climático durante la última década ha sido el Protocolo de Kioto, aprobado el 11 de diciembre de 1997 en la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático y suscrito por la Comunidad Europea en 1998 (Organización Naciones Unidas, 1998). Hasta el momento, ha sido la iniciativa de mayor apoyo internacional y ha constituido el marco jurídico para el desarrollo de legislaciones a nivel comunitario y estatal. Los resultados de esta convención sirvieron también para establecer un campo común de cooperación e intercambio de conocimiento entre los países comprometidos.

En este acuerdo, los 36 países firmantes se comprometían a reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero en un 5.2%^a durante el periodo 2008-2012 respecto a los niveles de 1990, aunque este porcentaje se redujo más tarde a tan sólo el 1.8%. Para ello, se fijaron una serie de medidas tales como: reforzar o establecer políticas nacionales de reducción de emisiones, el impulso de la eficiencia energética, el fomento de agricultura sostenible y el desarrollo de las energías renovables.

A pesar de fijar unos objetivos claros y factibles, el acuerdo ya nació con diversos fallos que afectarían a su cumplimiento. Por un lado, la negativa de EEUU a ratificar

^a Nótese el uso del punto como separador de la parte entera y la parte decimal, siguiendo las recomendaciones de la Ortografía de la lengua española, de las Academias de la Lengua. Esta notación está también aceptada por la norma ISO 80000-1

el acuerdo supuso que el principal emisor mundial de gases de efecto invernadero no se comprometiese a adoptar políticas restrictivas. Así mismo, la consideración de los niveles de emisiones de 1990 como referencia favorece claramente a los países industrializados y perjudica a los países en vías de desarrollo.

En la cumbre del clima celebrada en Doha en 2012 se firmó una prórroga del Protocolo de Kioto hasta el año 2020. La prórroga tiene escasas implicaciones y naciones como Japón, Rusia y Canadá no la suscribieron.

El Protocolo de Kioto recogía tres mecanismos para una reducción económicamente factible de las emisiones: Implementación Conjunta, Régimen de Comercialización de Emisiones y Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). La comercialización de emisiones permite a países industrializados adquirir excedentes de emisiones a países menos desarrollados. Como consecuencia, se reduce la tasa de emisión reconocida de los países compradores pero no se reduce el nivel real de emisión de gases. Mediante el Mecanismo para un Desarrollo Limpio, los países desarrollados financian proyectos de captura de GEI en países en vías de desarrollo y adquieren reducciones certificadas de emisiones que se atribuyen como realizadas en su propio terreno. Estas medidas para favorecer un sistema de comercialización de emisiones han sido fuertemente criticadas ya que evita la actuación sobre los verdaderos focos de emisión.

Los gobiernos comunitarios y estatales disponen de una gran diversidad de políticas para incentivar medidas de mitigación. Sin embargo, la profundidad de estas políticas y su aplicabilidad están fuertemente condicionadas por la circunstancia económica y el contexto sectorial (Gulledge, Richardson, Adkins, & Seidel, 2010).

Para la Unión Europea, la creación de políticas activas que promuevan un desarrollo inteligente, sostenible e integrador es un objetivo prioritario (Comisión Europea, 2010). En este contexto, se plantean los siguientes objetivos específicos para el año 2020:

- ✓ Reducir un 20% las emisiones de gases efecto invernadero en UE respecto a los niveles de 1990

- ✓ Aumentar al 20% el porcentaje del consumo energético que se genere con fuentes renovables de energía
- ✓ Reducir el consumo energético en un 20%, mejorando la eficiencia energética de los países miembros

La directiva europea sobre energías renovables establece que: *“Las medidas en materia de eficiencia energética y ahorro energético se hallan, para cada Estado miembro, entre los métodos más eficaces para incrementar la cuota de energía procedente de fuentes renovables”* (Comisión Europea, 2009)

En España, la Estrategia Española del Cambio Climático y Energía Limpia (Ministerio de Medio Ambiente, 2007), elaborada por el Ministerio de Medio Ambiente, planificaba las políticas y las medidas para mitigar el cambio climático proponiendo acciones para alcanzar los compromisos internacionales de reducciones de emisiones adquiridos. Esta estrategia sirve como referencia para el desarrollo y coordinación del resto de políticas contra el cambio climático desarrolladas a nivel autonómico y municipal.

El Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2010) marca la trayectoria de las energías renovables en España hasta el año 2020 fijando los objetivos nacionales para la cuota de energía obtenida de fuentes renovables y las medidas política y económicas para lograrlo.

El actual Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2014-2020 constituye la herramienta central de la política energética española (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2014). Este plan contiene una serie de medidas de ahorro y eficiencia energética para todos los sectores y establece un sistema de obligaciones a las empresas comercializadoras de energía. Como cumplimiento a lo recogido en este Plan Nacional, se ha aprobado recientemente la creación del fondo nacional para la eficiencia energética de España que pretende movilizar inversiones en la renovación del parque de viviendas existente e impulsar el sector de la rehabilitación. Por su parte, el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020 (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2011b) marca los

objetivos de eficiencia del uso de la energía y los servicios energéticos del país para este periodo y ofrece los resultados de ahorro de energía derivados de planes anteriores.

La necesidad de reducir las emisiones de GEI y los beneficios potenciales que se derivarían se está desplazando actualmente desde el mundo científico (que a través de artículos académicos y publicaciones de organizaciones reconocidas se encargó de dar el aviso de la urgencia de comenzar acciones para la lucha contra el calentamiento global y difundir las bases teóricas del efecto invernadero) hacia los organismos con poder de decisión, que gestionan las bases reguladoras y promueven acciones, (acuerdos de acción global apoyados por los gobiernos, leyes a nivel estatal, etc.)

2.1.3. El consumo energético en el sector residencial

En la actualidad, el sector residencial es responsable del 38% del consumo energético mundial y el 33% de las emisiones de carbono son causadas por los edificios residenciales (Tuominen, Holopainen, Eskola, Jokisalo, & Airaksinen, 2014).

En España el sector residencial representa el 17% del consumo final total y el 25% de la demanda de energía eléctrica (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2011a), lo que supone un consumo final de 16,924 ktep (kilo tonelada equivalente de petróleo).

Debido al alto consumo energético del sector residencial, cualquier acción sobre este sector tendrá un impacto importante en el cumplimiento de los objetivos de reducción del consumo y las emisiones de carbono (López, Santiago, FJ, Moreno-Muñoz, & Trillo-Montero, 2012).

Conocer las características del consumo de energía en los edificios permite implantar medidas para reducirlo y conseguir un uso más eficiente de los recursos. Los edificios emplean la energía para satisfacer las necesidades de calefacción, refrigeración, iluminación, agua caliente sanitaria y el uso del resto de equipamientos y dispositivos. En la cantidad de energía consumida influyen factores tales como: el clima, la localización, la calidad constructiva del edificio, la

eficiencia del equipamiento, el uso del mismo e incluso factores culturales de los usuarios.

Según datos de Eurostat, el sector residencial es el tercero en consumo energético en Europa, por detrás de la industria y el transporte. En el mapa de la figura 2.5 se representa la distribución del consumo energético final por persona del sector residencial en la UE. Los países con mayor consumo energético por persona son: Francia, Reino Unido, Italia, Alemania, Polonia y Turquía. Son varios los factores que hacen que países con una situación económica tan dispar estén en este grupo de mayores consumidores. Entre estos factores podemos destacar el clima, el nivel económico y el precio de la energía en cada país.

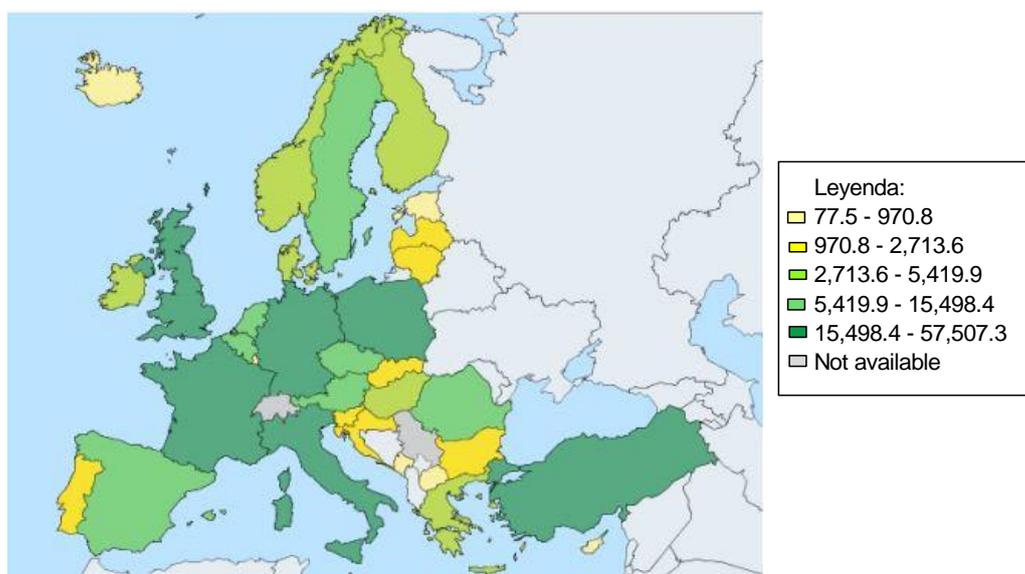


Figura 2.5. Mapa del consumo energético del sector residencial en Europa en ktep.

Fuente: (Eurostat, 2014).

Cinco países acumulan más del 60% del consumo total de las viviendas en Europa. La suma de lo consumido por este grupo formado por: Alemania, Francia, Reino Unido, Italia y España, asciende a más de 1,070,000 ktep.

Consumo energético en viviendas (ktep)

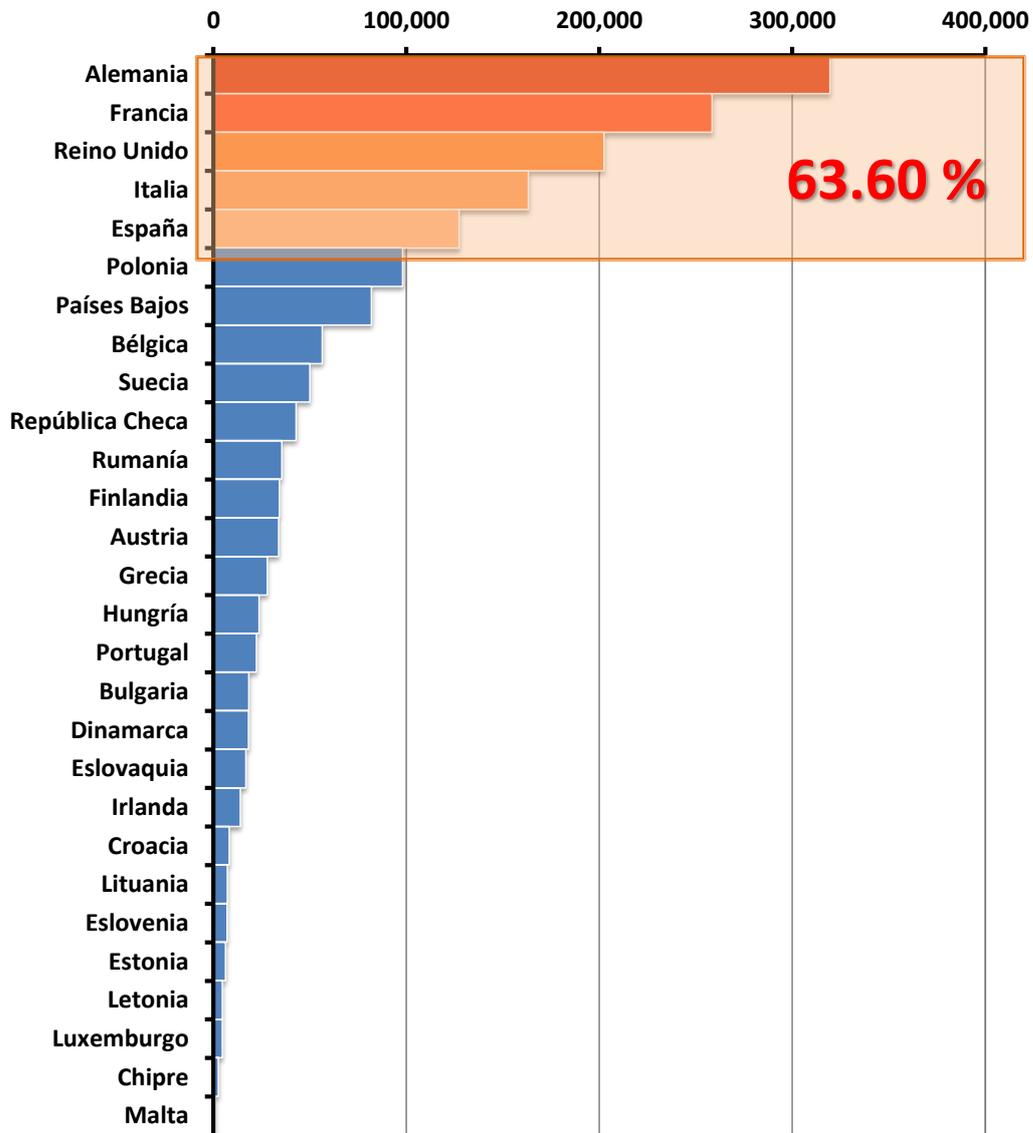


Figura 2.6. Consumo energético del sector residencial en los 28 países de la UE, expresado en ktep.

Fuente: Elaboración propia a partir de Eurostat (Eurostat, 2014)

La composición de los hogares y los núcleos familiares está en constante cambio y es muy variada entre los distintos países de la Unión. Para poder realizar una comparativa más exacta es útil analizar los datos de consumo en viviendas por persona, tal y como indica la figura 2.7. Gran parte de la energía demandada por los hogares es cubierta por la energía eléctrica. Según datos de Eurostat, Suecia es el

país donde se consume más electricidad por persona en el hogar, seguido de Finlandia.

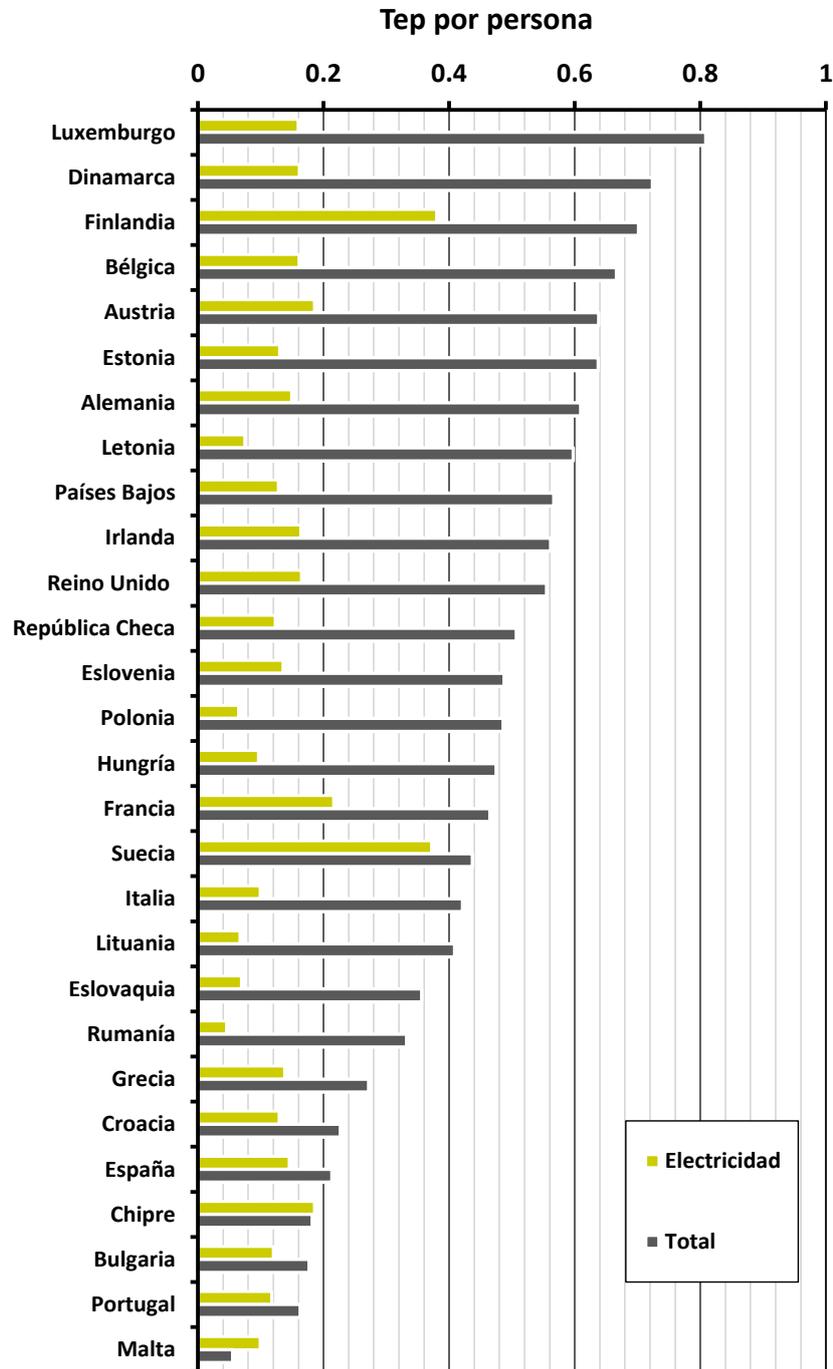


Figura 2.7. Intensidad consumo energético sector residencial por persona, en tep, de electricidad y total, países de la UE 28. Fuente: elaboración propia a partir de Eurostat (Eurostat, 2014)

El mayor consumo energético de los edificios residenciales se debe al uso de los sistemas de calefacción seguido del uso de los electrodomésticos y la necesidad de agua caliente sanitaria.

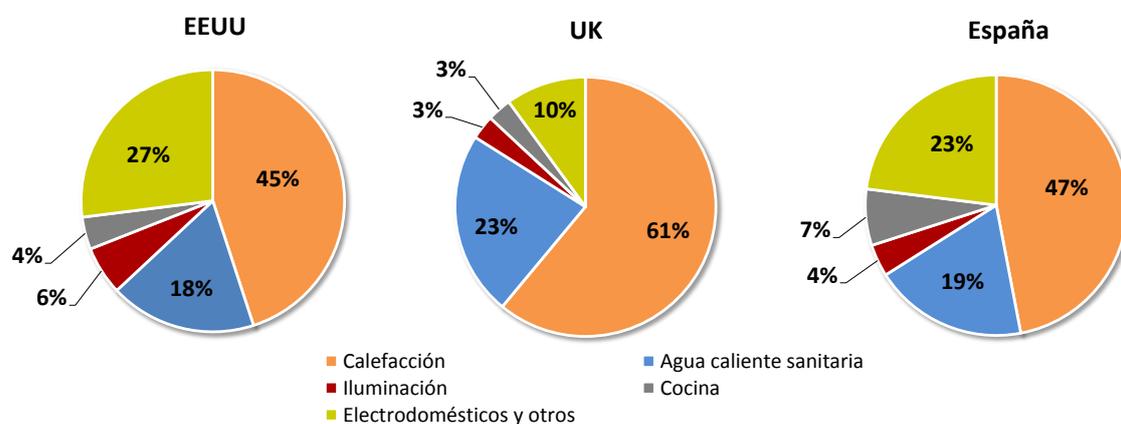


Figura 2.8. Distribución del consumo de energía en hogares para el caso de España, Reino Unido y Estados Unidos. Fuentes: elaboración propia a partir de (U.S. Residential Energy Consumption Survey, 2009), (Gov.UK, 2013) (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2013)

Para implantar medidas de reducción del consumo energético en edificios de viviendas, debe conocerse con exactitud en qué se consume esta energía, qué usos están creciendo, en qué sectores y porqué. Se genera así una información precisa del comportamiento de los usuarios y del potencial de ahorro energético (Bruhns & Wyatt, 2011).

Estructura del consumo energético del sector residencial en España

A pesar de los esfuerzos realizados, la estructura de consumo energético de la Unión Europea difiere de lo que debería de ser para cumplir con los objetivos de la Estrategia Europea 2020 (Comisión Europea, 2010).

Más de la mitad de la energía total consumida por el sector residencial en Europa proviene de productos derivados del petróleo y del gas y tan sólo el 10.96% procede de fuentes de energías renovables (ver figura 2.9)

EU 28 - Consumo interior bruto por fuente Sector residencial

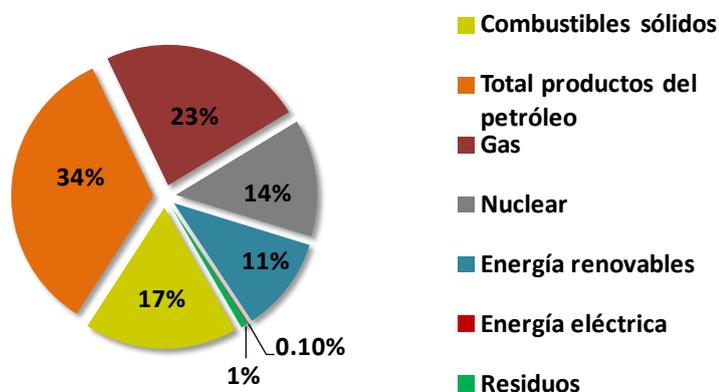


Figura 2.9. Distribución del consumo energético de la Unión Europea, año 2013.

Fuente: elaboración propia a partir de Eurostat (Eurostat, 2014)

Un tercio de los productos del petróleo y el gas que se consumen en España debe ser importado de otros países (Eurostat, 2014), generando una situación de dependencia energética del exterior que influye en los precios del mercado, afectando incluso a las relaciones entre países (como por ejemplo, la implicación energética en la reciente crisis entre Ucrania y Rusia en la primavera de 2014).

En España, más del 41% de la energía primaria consumida procede del petróleo y más del 21% del gas natural (figura 2.10). Tan sólo el 12.20 % de la demanda energética del sector residencial es suplida por energías renovables

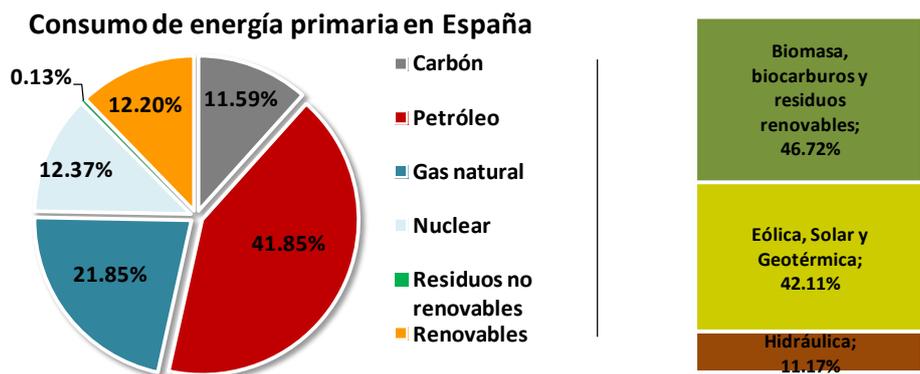


Figura 2.10. Consumo de energía primaria por tipo de energía en España y distribución de energías renovables consumidas, año 2012. Fuente: elaboración propia a partir del INE (Instituto Nacional de Estadística, 2012)

Esta estructura de consumo, dominada por productos petrolíferos, hace que la dependencia energética en España (80%) sea considerablemente mayor que la media de la UE (54%) (Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2010).

Más de un tercio de la demanda energética del sector residencial es cubierta por la energía eléctrica (35%), seguida del gas, principalmente el gas natural (25%), los productos petrolíferos (22%), las energías renovables (18%) y el carbón en un porcentaje casi despreciable.

Separada por consumos, la energía eléctrica es la única fuente de iluminación y equipamiento. El aire acondicionado es también cubierto en gran parte por la energía eléctrica, excepto en un 2% abastecido por fuentes renovables, en concreto la energía geotérmica.

Hasta el 35% del consumo de calefacción, el más importante en los edificios, es cubierto por fuentes renovables, principalmente biomasa. Este dato pone de manifiesto la efectividad de las medidas de expansión de la biomasa a nivel doméstico.

Consumo de energía final por fuentes del sector residencial en España

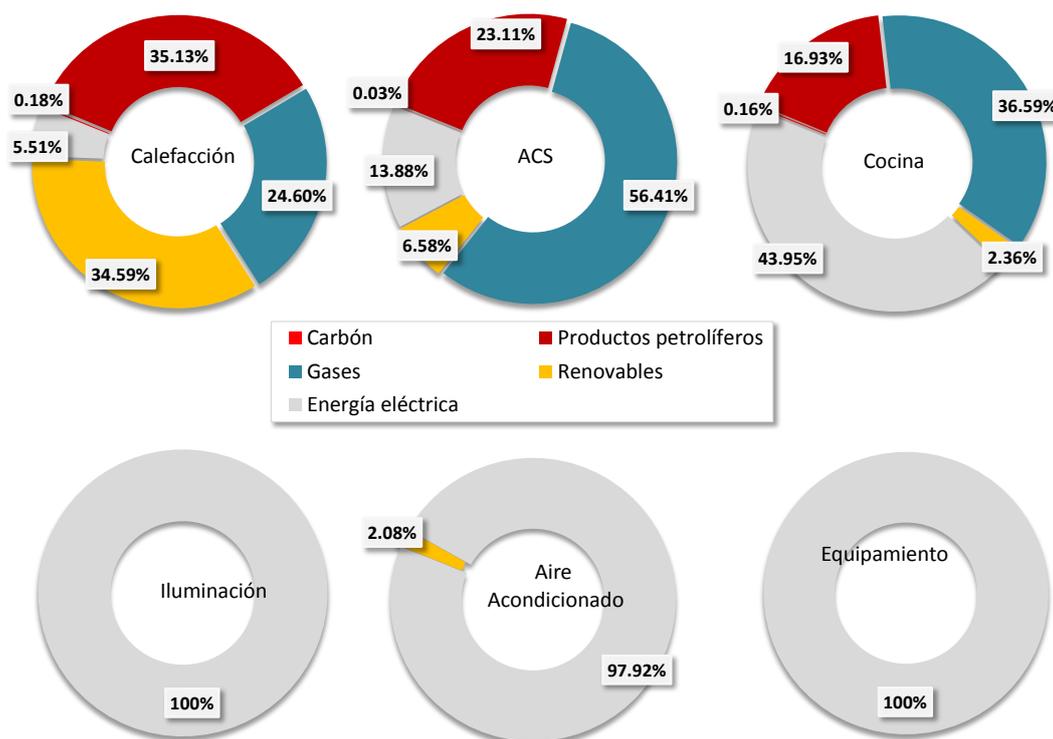


Figura 2.11. Consumo de energía final del sector residencial en España, año 2010. Fuente: elaboración propia a partir del INE (Instituto Nacional de Estadística, 2012)

2.1.4. Evolución del sector residencial en los próximos años

En los próximos años y para el periodo comprendido entre el año 2014 y el año 2040, se prevé que el consumo energético mundial crezca un 56%. El crecimiento del sector residencial en los próximos años será mayor que el resto de sectores, llegando a suponer un tercio del consumo energético mundial (U.S. Energy Information Administration, 2013)

Los países que no forman parte de la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) representarán en el plazo de unos años más del 80% del crecimiento total del consumo energético en los edificios (ExxonMobil, 2014). Se espera que gran parte de este crecimiento provenga del sector residencial. En estos países se está produciendo una evolución desde fuentes de energía tradicionales, no comercializadas para el consumo doméstico, como puede ser la

madera, hacia fuentes de energía comercializadas, como el propano o la electricidad (U.S. Energy Information Administration, 2013). En estos países, el crecimiento del consumo de energía va a una velocidad mucho mayor que las iniciativas de los gobiernos para frenar el impacto ambiental de su expansión.

Para el año 2040 la población mundial será de 9 billones de personas, de los cuales dos terceras partes estarán asentadas en áreas urbanas. Como consecuencia, más de 1.8 billones de personas vivirán confinados en suburbios y barrios miseria. El resto, vivirá haciendo uso de edificios que a fecha de hoy ni siquiera han sido proyectados y bajo unos hábitos de consumo que aún no se conocen y son difíciles de predecir (ExxonMobil, 2014).

La evolución del sector residencial tal y como lo conocemos hoy en día, está llevando al planeta hacia una crisis humanitaria que plantea a los gobiernos y demás agentes implicados numerosos retos, entre ellos el de la gestión de los recursos energéticos en las nuevas áreas urbanas y la remodelación de las ya existentes.

2.1.5. Estrategias para reducir el consumo energético en edificios

No existe duda de que si se mantiene el crecimiento de emisiones de carbono y el consumo de recursos naturales al ritmo actual, las consecuencias ecológicas, humanas y económicas del cambio climático serán devastadoras (America's Climate Choices. The National Academy of Sciences, 2010). El coste económico de estas medidas debe entrar en la balanza. Por ello, deben desarrollarse políticas climáticas que sean económicamente viables.

Para mitigar el impacto medioambiental, medido en forma de emisiones de CO₂ equiv, del uso y explotación de los edificios, debe reducirse el consumo de energía. Mejorar la eficiencia energética de los edificios es esencial para reducir el consumo de energía.

Son diversas las estrategias de eficiencia energética que se pueden llevar a cabo para disminuir el impacto ambiental del uso de los edificios residenciales, entre las que se citan las siguientes:

- Medidas pasivas, como el diseño eficiente de edificios mediante soluciones arquitectónicas y constructivas
- Aumentar la eficiencia de las instalaciones
- Medidas activas como sistemas de control y gestión inteligente en el edificio
- Implantar planes de gestión del consumo entre los usuarios

Por otra parte, el uso de fuentes de energía renovables contribuye a mitigar el impacto ambiental derivado del consumo energético de los edificios.

Para evaluar la eficacia de estas medidas, los agentes implicados (arquitectos, ingenieros, investigadores, políticos y usuarios) deben conocer con exactitud el consumo energético de los edificios y contar con las técnicas adecuadas. Los modelos de estimación de la demanda energética son herramientas que permiten calcular el consumo de edificios, tanto en fase de proyecto como en fase de uso. Permiten además, evaluar la eficacia de las estrategias para la reducción del consumo, antes, durante y después de su implantación.

2.2. ESTRATEGIAS PARA EL DISEÑO EFICIENTE DE EDIFICIOS

En la sección anterior se ha expuesto que la demanda de climatización es la principal responsable del consumo energético del sector residencial, y por tanto de las emisiones de carbono y demás gases de efecto invernadero asociadas.

La aplicación de técnicas para el diseño eficiente de los edificios ha demostrado ser un método eficaz para reducir la demanda energética final. Los procedimientos para el diseño eficiente de los edificios incluyen medidas que van desde el diseño pasivo de los mismos hasta acciones a llevar a cabo en la fase de construcción

En este capítulo se revisan los criterios de diseño eficiente que permiten reducir la demanda para calefacción y refrigeración de los edificios residenciales. Estos criterios se fundamentan en la adopción de parámetros adecuados de orientación, forma, sistema envolvente, mecanismos pasivos de climatización, sombras y vidrios. Se realiza también una revisión de las investigaciones que estudian la influencia de estos parámetros sobre la demanda total de energía y aportan sugerencias sobre las opciones de diseño más convenientes.

Esta fase de revisión del estado del arte proporcionará el conocimiento necesario para incluir en el modelo propuesto criterios de diseño eficiente, en concreto la optimización del coeficiente de forma del edificio.

2.2.1. Diseño climático de edificios

El diseño climático es uno de los mejores métodos para reducir el coste energético en la edificación (Omer, 2008). Para diseñar edificios energéticamente eficientes es necesaria la optimización de variables de diseño y parámetros constructivos (Feng, 2004). Por lo tanto, es necesario identificar las variables de diseño que tienen relación con los procesos de transferencia de calor. Ekici y Aksoy resumieron los parámetros que afectan a los requerimientos energéticos del edificio, recogidos en la tabla 2.1 (Bektas Ekici & Aksoy, 2011).

Tabla 2.1. *Parámetros que determinan las necesidades energéticas del edificio. Fuente: (Bektas Ekici & Aksoy, 2011)*

PARÁMETROS FÍSICOS-AMBIENTALES	PARÁMETROS DE DISEÑO
Temperatura exterior diaria (°C)	Factor de forma
Radiación solar (W/m ²)	Índice de transparencia
Dirección y velocidad del viento (m/s)	Orientación
	Propiedades termo-físicas de los materiales
	Distancia entre edificios

Las mayores oportunidades para integrar estrategias “sostenibles” se suceden durante la fase de diseño conceptual. Al permitirse integrar estos mecanismos desde la fase de construcción del edificio, se reduce el coste de implantación en comparación con su instalación en etapas posteriores (W. Wang, Rivard, & Zmeureanu, 2006).

Los métodos de diseño basados en criterios de eficiencia energética suponen un valor añadido que revierte en el usuario final. Un edificio diseñado con criterios eficientes proporciona un ahorro económico a lo largo de la vida útil del mismo debido a una menor demanda de consumo energético, a pesar de requerir una inversión inicial mayor. Al reducirse la cantidad final de CO₂ emitida a la atmósfera a lo largo del ciclo de vida del edificio, también resulta beneficiada el conjunto de la sociedad.

2.2.2. Influencia de la forma en la optimización energética del edificio

La forma del edificio tiene influencia en la radiación solar recibida y en el consumo energético total del inmueble (Mingfang, 2002). La cantidad de radiación recibida puede incrementar los requerimientos energéticos para refrigeración hasta en un 25% (Elasfour, Maraqa, & Tabbalat, 1991).

La forma del edificio determina no sólo el área total de fachada y cubierta que reciben radiación solar, sino también la superficie expuesta al exterior y por tanto a pérdidas energéticas. Al proyectar un edificio debería intentarse que la relación

entre la superficie exterior y el volumen total construido fuese la menor posible, tendiendo hacia el caso ideal de una semiesfera (Neufert, 1995). Por cuestiones de diseño y constructivas, esta forma es irrealizable para la mayoría de proyectos. Ante esta situación, numerosos investigadores han optado por estudiar el comportamiento de un edificio con forma de paralelepípedo y variar el factor de forma hasta llegar al modelo óptimo (Elasfour et al., 1991) (Aksoy & Inalli, 2006). En otras ocasiones, el punto de partida ha sido definir una planta con forma hexagonal u octogonal (Marks, 1997), curva, oval (Adamski, 2007) o indeterminada (W. Wang et al., 2006) hasta llegar a obtener las dimensiones óptimas para la geometría estudiada.

Las variables que tienen relación con la forma del edificio y que influyen en las necesidades climáticas son: el índice de compacidad, el factor de forma, la climatología y la influencia de la forma en el ciclo de vida del edificio. Las características de los cerramientos son unas variables fundamentales a tener en cuenta por su importancia en los requerimientos de energía para mantener el edificio a unas temperaturas de confort.

Compacidad

El *índice de compacidad* representa la proporción entre volumen y la superficie exterior de fachada, y está relacionado con la capacidad del edificio para almacenar calor y evitar fugas a través de la fachada. Un edificio muy compacto es el que tiene una alta proporción volumen/superficie, siendo la superficie expuesta a pérdidas de calor o ganancias térmicas la mínima posible. La compacidad relativa (*Relative Compactness*) de un edificio se define como la relación entre el índice de compacidad del edificio y el índice de compacidad de un edificio de referencia, siguiendo la ecuación 2.2:

$$RC = \frac{(V/A_{ext})_{building}}{(V/A_{ext})_{ref}} \quad (2.2)$$

La figura 2.12 muestra dos ejemplos de edificios con el mismo volumen pero distintos índices de compacidad:



Figura 2.12. Edificios con diferentes índices de compacidad: índice de compacidad 3,45 (izda.) e índice de compacidad 5 (dcha.). Fuente: elaboración propia.

El índice de compacidad puede usarse como un ratio que nos da una idea de cómo se calienta y se enfría el edificio (Florides, Tassou, Kalogirou, & Wrobel, 2002), e influye en el consumo energético del edificio (Ourghi, Al-Anzi, & Krarti, 2007). Un efecto de sobrecalentamiento indeseado en el edificio debido a un índice de compacidad alto puede compensarse mediante la instalación de sistemas pasivos de enfriamiento.

Factor de forma

El factor de forma es el ratio que relaciona la longitud con la profundidad de un edificio. Junto con la orientación, define el porcentaje de fachada expuesta a cada punto cardinal. Es común que ambos factores se estudien de forma conjunta (W. Wang et al., 2006), (Marks, 1997), (US Air Force, 2001), (Gupta & Ralegaonkar, 2004). Combinando la optimización de la forma y de la orientación, se pueden obtener beneficios que pueden llegar a un ahorro energético en calefacción del 36% (Aksoy & Inalli, 2006).

Florides et al. (Florides et al., 2002) cuantificaron el efecto del factor de forma sobre las necesidades energéticas para calefacción y refrigeración del edificio. Su conclusión es que la mejor posición para una casa rectangular es orientar la

fachada de mayor longitud hacia el sur. Un modelo con factor de forma 1/2 (menor superficie de pared orientada al sur) requiere hasta un 8.2 % más de energía para calefacción. Este porcentaje aumenta considerablemente (26.7%) cuando el aislamiento en la cubierta es mayor, pues se impide la ganancia de calor por el cerramiento superior.

Mingfang estudió la influencia de los parámetros de longitud, profundidad y anchura sobre la radiación solar recibida por un modelo de edificio en forma de paralelepípedo (Mingfang, 2002). Manteniendo el volumen constante, aplicó la siguiente ecuación:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{(q_S + q_N) \sqrt[3]{\lambda \beta} + (q_E + q_W) \times \sqrt[3]{\lambda^{-2} \beta} + q_H \times \sqrt[3]{\lambda \beta^{-2}}}{q_S + q_N + q_E + q_W + q_H} \quad (2.3)$$

donde Q/Q_0 es la radiación solar relativa recibida por la superficie externa; q_S , q_N , q_E , q_W , q_H , son los valores de radiación solar recibida en las fachadas: sur, norte, este, oeste y tejado respectivamente; λ es la relación longitud/profundidad y β representa la proporción altura/profundidad del edificio. Como resultado, obtuvieron las proporciones óptimas del edificio para minimizar la radiación solar directa recibida. Con este método se puede reducir la radiación solar incidente hasta en un 4% en comparación con un edificio cúbico.

Clima y optimización de la forma

En climas muy fríos, es mayor la cantidad de calor que se escapa a través de la superficie de la envolvente que la cantidad de calor que se puede ganar aumentando la superficie que recibe radiación solar. Por lo tanto, se puede establecer una proporcionalidad entre el aumento del factor de forma – más superficie externa para un mismo volumen, menor índice de compacidad– con el aumento de la energía para calefacción (Depecker, Menezo, Virgone, & Lepers, 2001). En climas cálidos esta relación no es tan directa y no puede determinarse un comportamiento prefijado.

Coste del ciclo de vida y forma del edificio

Marks (Marks, 1997) formuló los costes de construcción y calefacción en función de la forma del edificio. Consideró dos formas posibles: curva o poligonal. Para ambas posibilidades, la forma óptima del edificio está condicionada por los años de vida útil del inmueble considerados en los cálculos. Por ejemplo, en el caso de una forma poligonal, para periodos breves de calefacción, la forma se aproxima a un octógono. Es preciso establecer un criterio estándar sobre los años de vida del inmueble a considerar cuando se evalúa el coste económico de la demanda energética.

El *ciclo de vida de un edificio (life cycle)* es el periodo que abarca desde la concepción del mismo hasta el fin de su vida útil o demolición, pasando por las etapas de diseño, construcción, ocupación, uso y mantenimiento. Valorar el ciclo de vida permite examinar el impacto ambiental de un edificio en su conjunto. Este proceso cuantifica y evalúa el flujo de materia y energía del sistema (Scheuer, Keoleian, & Reppe, 2003).

Puede conocerse la distribución del impacto ambiental a lo largo de los procesos y etapas que comprenden la vida del edificio. La figura 2.13 describe las fases del ciclo de vida de un edificio (Djuric & Novakovic, 2009).



Figura 2.13. Ciclo de vida de un edificio. Fuente: elaboración propia.

Entre el 80 y el 85% del consumo energético total durante el ciclo de vida, se emplea en la fase de uso u ocupación (Sharma, Saxena, Sethi, & Shree, 2011). Esta fase incluye los gastos energéticos debidos a la calefacción, refrigeración y ventilación del edificio, iluminación y operación del equipamiento, abastecimiento de agua, calentamiento de agua y tratamiento de aguas residuales (Scheuer et al., 2003).

Wang et al. estudiaron la incidencia de la forma sobre la demanda energética (W. Wang et al., 2006). Formularon el Coste del Ciclo de Vida (CCV) y su impacto ambiental según las ecuaciones:

$$CCV(X) = CI(X) + CO(X) \quad (2.4)$$

$$IACV(X) = IAC(X) + IAO(X) \quad (2.5)$$

donde IACV representa el impacto ambiental del ciclo de vida, CI es el coste inicial de la construcción; CO son los costes de funcionamiento y operación del sistema durante el ciclo de vida que comprenden el coste del consumo energético y los picos de demanda; IAC es el impacto medioambiental de la construcción del edificio y IAO es el impacto medioambiental debido al funcionamiento (calefacción, refrigeración e iluminación)

La solución con menor coste de ciclo de vida tiene forma próxima a un polígono regular (concuera con que el ejemplo más eficiente sería el cubo). En cambio, minimizando el impacto ambiental del edificio y por tanto la demanda energética – impacto de su construcción, climatización e iluminación– el modelo con menor coste de impacto ambiental es el que tiene mayor longitud de fachada orientada hacia el sur.

Adamski solucionó la controversia entre la forma económicamente más eficiente y la forma con menor demanda energética (Adamski, 2007). Para ello, formuló el coste estacional de calefacción y el de construcción incluyendo variables de la forma del edificio, como altura, volumen, longitud de las curvas que definen cada fachada y ángulo de orientación. La solución óptima obtenida se compone de unos

límites semicirculares para la parte norte del edificio y una curva para la parte sur. La planta ovalada presenta mejor comportamiento térmico que la circular o la cuadrada. La forma más o menos ovalada de la planta está muy relacionada con el conjunto de años de vida útil del edificio que se considere, pues conforme el número de años aumenta, el valor del eje de excentricidad del óvalo se reduce y el resultado se aleja más de la forma circular.

2.2.3. Orientación

De entre todos los parámetros que intervienen en el diseño solar pasivo de los edificios, la orientación es el más importante y el más tratado (Morrissey, Moore, & Horne, 2011). El nivel de radiación solar directa recibida en la fachada del edificio depende del azimut de la pared y, por tanto, del ángulo de orientación del edificio (Mingfang, 2002). La orientación de la fachada influye en otros parámetros de diseño pasivo como son el desarrollo de las sombras (I. G. Capeluto, 2003) o el comportamiento de la envolvente solar (Morrissey et al., 2011).

Entre los beneficios del estudio de la orientación óptima del edificio, cabe destacar:

- Es una medida de bajo coste y aplicable en etapas de diseño iniciales.
- Reduce la demanda energética
- Disminuye el uso de sistemas pasivos más sofisticados.
- Aumenta el rendimiento de otras técnicas pasivas complejas.
- Aumenta la cantidad de luz natural. La reducción de la demanda energética para luz artificial provoca una menor contribución a la carga de calor interna del edificio.
- Mejora el rendimiento de captadores solares instalados.

Por lo general, es aceptado que el sur es la orientación óptima para ganar calor en invierno así como para el control del calor en verano. Como regla general, deben orientarse las paredes con mayor longitud hacia el sur (Mingfang, 2002). Sin

embargo, el estudio de la orientación adecuada puede realizarse con el objetivo de optimizar otros parámetros, como la radiación total recibida, forma del inmueble, superficie en planta o demanda energética anual.

Orientación y radiación recibida

Gupta et al. optimizaron la orientación del edificio para diversos factores de forma, tomando como criterio minimizar la radiación recibida en verano y maximizar la radiación recibida en invierno (Gupta & Ralegaonkar, 2004). Calcularon la energía total ganada por radiación aplicando la siguiente ecuación:

$$E = A \times \int_{\omega_1}^{\omega_2} (0.834 \times H) \times \left(\frac{\cos i}{\cos \theta_z} \right) d\omega \quad (2.6)$$

donde A es el área de la superficie; H es la radiación media mensual diaria sobre la superficie horizontal; i es el ángulo de incidencia; ω es el ángulo horario del amanecer o atardecer y θ_z es el ángulo cenital o ángulo de altitud.

Posteriormente, optimizaron el valor de radiación recibida durante los meses con condiciones climáticas más extremas (junio y diciembre), en función de diversos valores de forma y variando el ángulo de orientación de 0° a 180° .

Este método permite hallar el ángulo de orientación óptimo para recibir el mínimo de radiación en verano y el máximo en invierno. Los autores concluyeron que, en general, la orientación óptima es aquella en la que las paredes de mayor dimensión están orientadas hacia el norte y el sur.

Chwieduk et al. (Chwieduk & Bogdanska, 2004) estudiaron la cantidad de radiación recibida por distintos elementos, con diferente pendiente y ángulo azimut, utilizando dos modelos de radiación: modelo de cielo isotrópico difuso (Liu & Jordan, 1963) y modelo de cielo anisotrópico (Reindl, Beckman, & Duffie, 1990). Calcularon los parámetros idóneos para que la misma superficie (pared o tejado) reciba la máxima cantidad posible de calor solar en invierno junto con el mínimo posible en verano. La influencia de la inclinación y orientación de la superficie incidente sobre el nivel de radiación es más perceptible durante la estación de

verano. Se obtuvo como conclusión que para maximizar la ganancia de energía solar, durante un año completo, el ángulo azimut de la superficie debe ser de unos 15° , aunque los ángulos comprendidos entre -15° y 45° también proporcionan buenos resultados. Este procedimiento resulta especialmente útil para la instalación de placas solares. Permite conocer la energía que reciben y por lo tanto su efectividad.

Orientación y forma

Aksoy estudió la relación entre orientación y demanda de calefacción (Aksoy & Inalli, 2006). Partió de 3 modelos con factores de forma diferentes ($1/1$, $1/2$ y $2/1$), con y sin aislamiento en la fachada, y les aplicó un giro de 80° , obteniendo datos cada 10° . La figura 2.14 recoge los valores de ahorro posible según el factor de forma del edificio y el ángulo azimut del eje norte-sur en comparación con un edificio sin aislar:

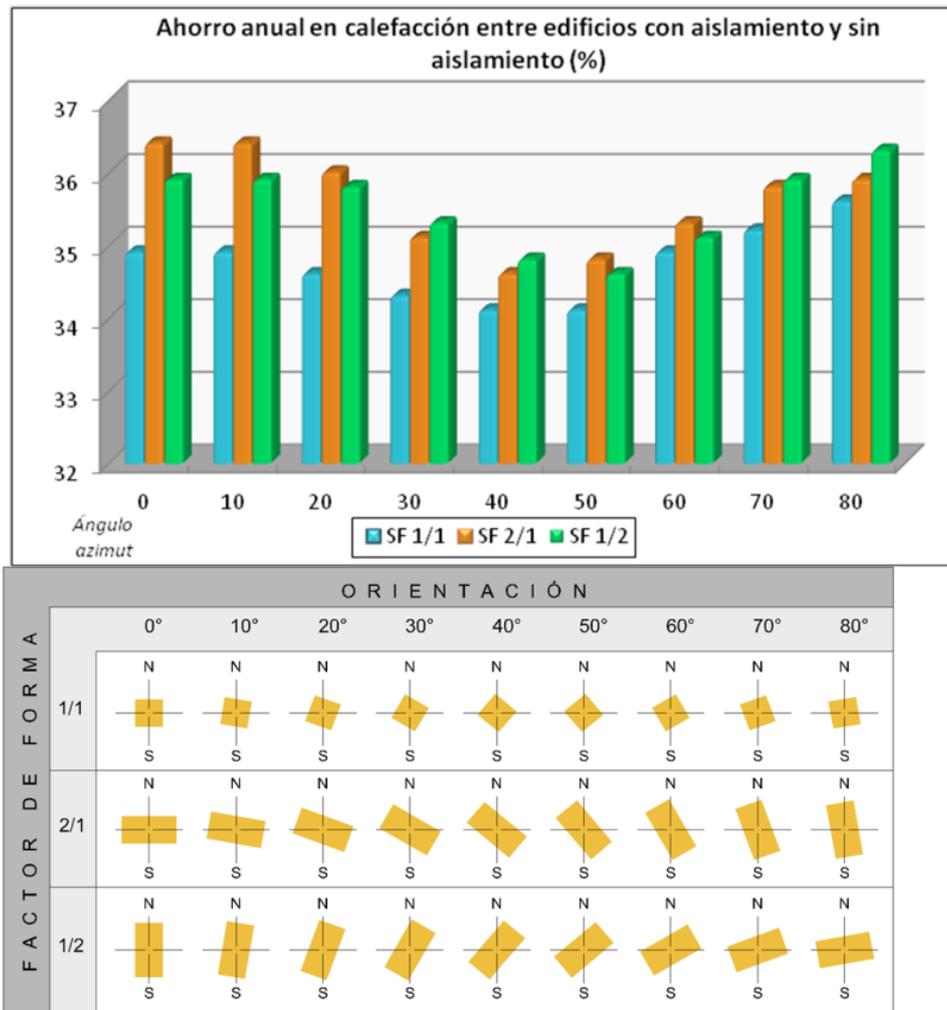


Figura 2.14. Ahorro energético posible según factor de forma y orientación.

Fuente: (Aksoy & Inalli, 2006)

Mediante la combinación de factor de forma, orientación y aislamiento en fachada, consiguieron un índice de ahorro energético de calefacción de hasta el 36%. Determinaron que la orientación adecuada de edificios rectangulares es aquella en la que la pared de mayor longitud está orientada hacia el sur. En edificios cuadrados, los valores más altos de demanda de calefacción se obtienen cuando el edificio está girado un ángulo intermedio de 45° y se reducen conforme se aproxima a los valores 0° y 90° o sus múltiplos (es decir, cuando vuelve a tener una fachada encarada al sur). En edificios sin aislamiento y con diferentes factores de

forma, puede obtenerse un ahorro energético en calefacción de entre el 1 y 8%, dependiendo de la orientación del edificio.

El estudio de Florides et al. se centra en la relación entre orientación y forma (Florides et al., 2002). Para un edificio cuadrado obtuvieron que la demanda de calefacción alcanza el mínimo valor cuando las fachadas están orientadas directamente a los 4 puntos cardinales. En un inmueble rectangular, la demanda de calefacción se reduce conforme la superficie de fachada orientada al este es menor. Según los autores, la superficie de fachada orientada al este es la que contribuye en mayor medida al aumento de la demanda energética para calefacción.

Orientación y superficie en planta

Morrissey et al. determinaron que los edificios de planta pequeña son menos susceptibles a los cambios de orientación (Morrissey et al., 2011). Estos edificios mantienen un mejor comportamiento térmico a pesar de modificarse su orientación, en comparación con casas de grandes dimensiones ($>200 \text{ m}^2$). Para estos autores, la superficie en planta es el factor con mayor importancia en términos de adaptabilidad al cambio de orientación. Analizaron los datos de demanda energética para calefacción y refrigeración tras la modelización de 81 edificios de viviendas representativos. Obtuvieron la correlación estadística entre estos valores de demanda energética y las 4 variables que, consideraron, tienen una mayor repercusión sobre el comportamiento térmico del edificio: superficie en planta, ratio pared/suelo, superficie externa total y superficie de ventana total. Los resultados indican que es más difícil conseguir que edificios residenciales más grandes se comporten en concordancia con los niveles exigidos en términos de eficiencia energética. Las casas energéticamente más eficientes son menos susceptibles a los cambios de orientación.

Orientación y demanda energética

El estudio de la orientación óptima del inmueble permite aumentar el ahorro energético producido (US Air Force, 2001). La tabla 2.2 muestra datos del ahorro energético conseguido en calefacción y refrigeración al girar un edificio de grandes

dimensiones 30°, 45° y 60° al este, respecto del eje sur. Los mayores ahorros energéticos se producen cuando las paredes de mayor longitud están giradas tan sólo 30° del sur.

Tabla 2.2. Ahorro energético obtenido según la orientación de un edificio de planta rectangular.
Fuente: (US Air Force, 2001)

AHORRO ENERGÉTICO [\$/año]			
Instalación	Cambio en la orientación (respecto del sur)		
	30°	45°	60°
Calefacción	29	26	36
Refrigeración	58	15	0
Calefacción, ventilación, aire acondicionado (HVAC)	53	38	23
<i>Total</i>	<i>140</i>	<i>79</i>	<i>59</i>

Según Littlefair, la mayoría de los libros, guías o manuales sobre técnicas solares pasivas recomiendan una orientación hacia el sur, aunque el consenso se inclina por el hecho de que la mejor opción es una orientación de 20-30° al sur (Littlefair, 2001).

Shaviv estudió el efecto de la orientación de la superficie de vidrio de un edificio cuyos resultados se muestran en la tabla 2.3 (Shaviv, 1981). Concluyó que la orientación óptima para la mayor superficie de vidrios debe ser lo más próxima al sur, especialmente en países con clima cálido y húmedo. Si esto no fuese posible, se debe orientar al suroeste.

Tabla 2.3. Consumo energético de una oficina según la orientación. Fuente: (Shaviv, 1981)

	Consumo energético según orientación					
	Sur		Este		Oeste	
		%		%		%
Calefacción	186	0	231	24	219	18
Refrigeración	281	0	286	2	369	31
Total	467	0	517	11	588	26
T. máx (°C)	26.4		26.6		27.0	

Recientemente, Alzoubi et al. han investigado el impacto de la orientación del edificio y el ratio de superficie de ventana con respecto a la superficie de fachada en la demanda energética final para un edificio residencial en Amman (Jordania) en base a la normativa local (Alzoubi & Malkawi, 2014). Los resultados mostraron que para este tipo de clima frío semiárido, es posible obtener un ahorro de calefacción del 54.13% en los espacios orientado al sur en comparación con los orientados al norte. Según este estudio, la proporción óptima entre superficie de ventana y la superficie de pared está entre el 40 y el 60%. Para espacios orientados al sur, la relación entre demanda de calefacción y la proporción ventana/fachada es inversamente proporcional. Sin embargo, en el caso de estancias orientadas al norte, esta relación es directamente proporcional.

2.2.4. Influencia de la envolvente del edificio en la demanda energética

La envolvente del edificio (cerramientos, cubiertas y soleras) y el periodo de funcionamiento del sistema de calefacción, son dos de los factores que afectan en mayor medida al consumo energético total del edificio (Manioğlu & Yılmaz, 2006). La envolvente determina las condiciones de clima interior y, por lo tanto, la demanda o no de energía adicional para la climatización. La actuación sobre los elementos que conforman la envolvente del edificio, puede mejorar algunos

requerimientos y afectar negativamente a otros. Se puede concluir que es necesario evaluar el comportamiento del edificio en su conjunto (Radhi, 2008).

Optimización del valor U límite

Algunos parámetros de diseño que afectan al confort térmico interior y a la conservación de energía son, como se ha visto: la orientación, la forma y las propiedades ópticas y termofísicas de la fachada o envolvente del edificio. El coeficiente de transferencia de calor (U) determina la pérdida de calor a través de la unidad de área de los componentes de la fachada. Es frecuente que las normativas a nivel estatal impongan un valor máximo de U para controlar la pérdida de calor de los edificios y asegurar el confort de los usuarios. Para Oral y Yilmaz este coeficiente de transmisión de la fachada debe calcularse teniendo en cuenta la forma del edificio (Oral & Yilmaz, 2002). Propusieron una metodología para la determinación del coeficiente de transmisión térmica de los componentes opacos de la fachada, dependiendo del valor del índice de compacidad (Área exterior/Volumen). Se calcula la cantidad de calor máxima perdida por un edificio de referencia empelando la siguiente fórmula (ecuación 2.7):

$$q = U_0(t_i - \overline{t_{eo}})(1 - X) + U_g(t_i - \overline{t_{eg}})X \quad (2.7)$$

donde q es la pérdida de calor diaria; U_0 y U_g U_0 son los coeficientes de transferencia de calor de los componentes opacos y transparentes, respectivamente; t_i es la temperatura interior; t_{eo} y t_{eg} son las temperaturas medias sol-aire de los componentes opacos y transparentes y X es el índice de transparencia. Mediante métodos gráficos, determinaron el valor U máximo posible para edificios con otros valores de compacidad.

El método desarrollado por Manioğlu y Yilmaz obtiene la combinación de la envolvente y el régimen de funcionamiento del sistema de calefacción que proporciona las condiciones de confort térmico, con el mínimo coste, durante el ciclo de vida del edificio (Manioğlu & Yilmaz, 2006). Este procedimiento permite

obtener las características de los materiales que componen la envolvente y que en su conjunto satisfacen el coeficiente de transferencia de calor máximo del edificio. Para ello, se tiene en cuenta la mejor combinación de materiales que proporcionan este valor U , la cantidad total de calor perdido, el coste económico del régimen de funcionamiento y el coste económico del ciclo de vida de los componentes. Para cada alternativa de la envolvente que satisface esta condición, estudian varios periodos de funcionamiento hasta encontrar la solución más económica y energéticamente eficiente. Es destacable que esta solución óptima puede no coincidir con la opción en la que se produce menor pérdida de calor a través de la fachada del edificio.

La efectividad de las actuaciones cuyo objetivo es la mejora que del comportamiento térmico de la envolvente, está relacionada con el tipo y uso del edificio. Se ha demostrado que, en edificios residenciales con un ratio ventana/pared reducido, la introducción del nivel de aislamiento óptimo en la fachada del edificio permite reducir de forma considerable la demanda energética, especialmente la demanda de calor (Lollini, Barozzi, Fasano, Meroni, & Zinzi, 2006). En cambio, este procedimiento no es efectivo en edificios con fachadas predominantemente de cristal, como por ejemplo los comerciales (Radhi, 2008). La mejora del valor U de estos edificios no conlleva una reducción de la ganancia de calor externo, mientras que una actuación sobre el tipo de vidrio sí puede producir una mejora de su comportamiento térmico.

Aislamiento y análisis económico

Jinghua estudió mediante simulación con eQUEST, el efecto del espesor y la posición del aislamiento de fachada, entre otros factores, sobre la demanda energética total (Yu, Yang, & Tian, 2008).

Mediante una estrategia combinada de optimización de aislamiento en fachada, ratio ventana/pared, tipo de vidrio y sistema de sombra, se consiguió una reducción de hasta el 25.92% de la demanda de consumo eléctrico para calefacción y refrigeración. A partir de un espesor crítico de la capa de aislamiento, la reducción del consumo energético continúa, pero en menor proporción.

La posición de la capa de aislamiento (exterior, interior o en medio) tiene poca repercusión sobre la reducción de consumo eléctrico anual, si bien se obtiene el mínimo consumo ubicando el aislamiento en el interior. En cambio, si se valora el consumo para refrigeración, por separado, el aislamiento situado en el medio proporciona mucho mayor consumo eléctrico que las otras opciones.

El valor mínimo de consumo eléctrico para refrigeración se obtiene con una capa de 25 mm de aislamiento, mientras que el mínimo para calentamiento se obtiene con 100 mm de espesor.

Estas diferencias obligan a plantear el problema mediante un análisis económico que permita obtener el espesor del aislamiento económicamente más ventajoso y energéticamente más eficiente. Cuando se incluye el análisis económico de los beneficios del aislamiento en edificios, puede obtenerse que el nivel de aislamiento más económico no se corresponda con el nivel óptimo obtenido individualmente para cada elemento, ni con el nivel de aislamiento que proporciona menor valor de transmitancia térmica U en el edificio (Lollini et al., 2006).

A continuación se resumen dos métodos de estudio económico del aislamiento en fachada:

Çomakli y Yüksel emplearon el concepto de VAN (Valor Actualizado Neto) para formular el espesor óptimo de la capa de aislamiento de la fachada (Çomakli & Yüksel, 2003). Obtuvieron la fórmula que determina el aislamiento económicamente óptimo (x_o) para diferentes parámetros económicos, materiales de aislamiento y condiciones climáticas (ecuación 2.8):

$$x_o = 293.94 \sqrt{\frac{\text{PWF DD } C_f k}{C_i H_u \mu}} - k R_t \quad (2.8)$$

siendo DD *degree days* (grados diarios); C_f y C_i coste del fuel y aislamiento, respectivamente; H_u el poder calorífico del combustible; R_f la resistencia térmica de la fachada; μ la eficiencia del sistema de calefacción y k la constante numérica. PWF representa el Present Worth Factor y se formuló según la ecuación 2.9:

$$PWF = \frac{1-(1+r)^{-N}}{r} \quad (2.9)$$

donde N es el número de años del ciclo de vida y r es el índice ajustado para la inflación según la siguiente fórmula, donde I es el índice de interés y g el índice de inflación (ecuación 2.10):

$$r = \frac{I-g}{1+g} \quad (I > g) \quad (2.10)$$

El espesor óptimo del aislamiento obtenido es inversamente proporcional al coste del material aislante y a su conductividad térmica. Un espesor excesivo de la capa de aislamiento conlleva un alto coste inicial innecesario que no es compensado por la reducción del volumen carburante empleado. Por otra parte, un aislamiento deficiente es más económico al inicio pero produce mayor gasto en carburante. Estos autores obtuvieron que el espesor óptimo mantiene una relación lineal con el Valor Actualizado Neto.

En el estudio realizado por Lollini et al. se optimizó el aislamiento del edificio realizando un análisis en 3 niveles: energético, económico y ambiental (Lollini et al., 2006). Los cálculos se realizaron con el software de simulación EC501, creado por Orlandini R, Soma F, Soma P. en 2001, para evaluar el comportamiento energético y económico de varias combinaciones de aislamiento térmico para dos edificios de referencia.

Emplearon también el concepto de Valor Actualizado Neto del material aislante instalado, que representa la diferencia económica entre la inversión inicial de un aislamiento adicional con respecto al ahorro económico anual estimado durante su ciclo de vida. Aplicaron las fórmulas desarrolladas por Augelli (Augelli, 1981) formulando el VAN según la ecuación 2.11, mediante parámetros relacionados con la transmitancia térmica del aislante y su espesor medio.

$$VAN = R - Inv = ((U_o - U) \cdot 24 \cdot DD^* \cdot EPC) - (m \cdot s + q) \quad (2.11)$$

donde DD^* es un parámetro que depende del nivel de aislamiento y de las ganancias internas; U_0 y U son los coeficientes de transmisión térmica de referencia y del aislante; R es el ahorro energético anual; Inv es la inversión inicial; s es el espesor de la capa de aislamiento; m y q son los costos fijos y variables del material.

A partir de esta ecuación puede optimizarse el valor de transmitancia térmica U del material. El coste energético CE se expresa mediante la ecuación 2.12:

$$CE = \frac{P_0 \cdot r \cdot [(r/v)^{N-1}]}{\mu \cdot VCN \cdot (r-v)} \quad (2.12)$$

donde P_0 es el coste anual del gas ciudad; μ es la eficiencia global del sistema de calefacción; VCN es el valor calorífico neto del gas elegido; N representa el ciclo de vida (en este caso 30 años); r y v son indicadores financieros de inflación e intereses, respectivamente.

Los resultados de Çomakli y Yüksel concuerdan con los de Yu ya que, una vez alcanzado el valor crítico de aislamiento, un aumento masivo del espesor de la capa de aislamiento no lleva aparejada una mejora significativa del comportamiento térmico del edificio (Çomakli & Yüksel, 2003) (Yu et al., 2008). La demanda de calor se reduce conforme aumenta el nivel de aislamiento, pero no sigue una dependencia bien definida. Así, la eficacia de aumentar el aislamiento (o reducir la transmitancia térmica de la envolvente) como método para reducir la demanda de calor es efectiva hasta llegar a un punto crítico a partir del cual, un aumento masivo del aislamiento, sigue produciendo una reducción de la demanda de calor, pero en un porcentaje pequeño.

Los propios autores indican que esto puede ser también debido a que, tal y como está planteado el estudio, el aislamiento se va añadiendo progresivamente a diferentes elementos del edificio (techo, paredes, suelo) que a su vez tienen diferente peso en la superficie externa total y en el comportamiento térmico de la fachada.

La definición del nivel de aislamiento global más económico no es tan precisa como en el caso de componentes aislados (Lollini et al., 2006). Conforme aumenta el nivel de aislamiento del edificio, la función de *VAN* también crece, hasta llegar a un nivel óptimo en el que para un edificio demasiado aislado se produce poco aumento del *VAN*. La solución propuesta por los autores es escoger como nivel de aislamiento óptimo el que produzca mayor valor de *VAN* que sea compatible con el menor valor posible del PayBack.

Resultados similares han sido obtenidos por Huang et al. en un estudio reciente concluyendo que el diseño óptimo de la envolvente, en un proyecto de rehabilitación energética, es aquel que permite obtener el máximo *VAN* durante el ciclo de vida del edificio (Huang et al., 2014). Estos autores diseñaron un modelo económico para evaluar el espesor de aislamiento más rentable según la variación del ratio ventana/fachada, para distintas orientaciones de un edificio, con el objetivo de ser aplicable en la definición de programas de rehabilitación de edificios existentes en China. Demostraron que una mejora del rendimiento térmico de las ventanas de un edificio supone una disminución del nivel de aislamiento de las paredes. Sin embargo, el balance económico mostró que el coste de mejora de las ventanas es mayor que el de la mejora del aislamiento de la fachada.

Estudio ambiental de la envolvente

Otros trabajos han optado por realizar un análisis ambiental en lugar de un análisis económico. Pulselli realizó un análisis térmico, energético y una evaluación emergética para valorar el coste ambiental y los beneficios de las fachadas de los edificios (Pulselli, Simoncini, & Marchettini, 2009). La evaluación de la emergía se realizó según el procedimiento introducido por Odum en el que la *emergía* se define como *la cantidad de energía solar empleada, directa o indirectamente, para obtener un producto o servicio final* (Odum, 1995). Compararon 3 modelos: fachada tradicional con cámara de aire y aislamiento; fachada con capa de aislamiento de corcho adicional; fachada ventilada.

El estudio se realizó para climas fríos, templados y cálidos. Concluyeron que tanto la fachada con aislamiento adicional como la fachada ventilada tienen un mejor

comportamiento térmico, energético y emergético. El análisis emergético asigna un papel más relevante, en términos del uso de recursos naturales, a las regiones con clima cálido y templado. Esto es debido a que la reducción de la demanda de refrigeración proporciona mayores beneficios ambientales que la reducción de la demanda de calefacción. Generalmente, los sistemas de producción de aire acondicionado funcionan con energía eléctrica (de mayor impacto ambiental) mientras que los mecanismos de calefacción se basan en otros combustibles.

2.2.5. Factor sombra y control de la radiación solar

El dominio de las sombras que inciden en los elementos de fachada permite controlar el nivel de radiación solar recibido por el edificio. Esta estrategia proporciona resultados favorables cuando se actúa sobre los huecos de fachada puesto que son los elementos que transmiten mayor nivel de radiación al interior.

Factor de sombra

Un coeficiente de sombra adecuado aporta beneficios energéticos positivos durante todas las estaciones del año (Yang, Li, & Hu, 2006). *La American Society for Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineering* (ASHRAE) incluye el parámetro del Coeficiente de Sombra (CS) entre los factores a tener en cuenta para el cálculo de la demanda de calefacción y refrigeración. El factor de sombra se define como el ratio o relación de calor solar ganado a través del sistema de ventanas, bajo un conjunto específico de condiciones, en relación al calor solar ganado bajo un cristal estándar de 3 mm de espesor, siguiendo la ecuación 2.13:

$$CS = \frac{\text{factor de ganancia solar de ventanaje}}{\text{factor de ganancia solar del vidrio de referencia}} \quad (2.13)$$

Uno de los problemas que surge para establecer un coeficiente de sombra fijo, es que el ángulo de incidencia de los rayos solares no permanece constante (Pereira & Sharples, 1991). Han sido varios los estudios realizados para desarrollar un

método o sistema fiable para el cálculo de este factor de sombra (Pereira & Sharples, 1991); (Bouchlaghem, 2000)

El procedimiento del cálculo de factor de sombra óptimo propuesto por Yang et al. convierte el ahorro energético de la sombra en verano y de la penetración solar en invierno en ahorro energético en el equipamiento (Yang et al., 2006). Estos autores formularon el ahorro anual total energético en función del valor del coeficiente de sombra (ecuación 2.14):

$$CES = \frac{Q_S \times (1-CS) + Q_W \times CS}{Q_S + Q_W} \quad (2.14)$$

Donde CES (coeficiente de ahorro de energía de la radiación solar sintética) es el coeficiente de ahorro energético por radiación solar; CS es el coeficiente de sombra; Q_S es la ganancia de ahorro energético en verano debido a la sombra; Q_W es la energía solar entrante en invierno debido a la sombra.

En climas cálidos se obtiene más beneficio energético con un coeficiente de sombra elevado, al reducirse las ganancias solares. Sin embargo el coeficiente de sombra no debe ser excesivamente alto (Yang et al., 2006). Si se traducen estos ahorros energéticos a costes económicos, según el precio de los carburantes empleados para los sistemas de calefacción y refrigeración, el equilibrio económico no está tan próximo a un coeficiente de sombra alto como lo estaba el balance energético.

Eficacia de los dispositivos de sombra

Al igual que ocurre con otros mecanismos de ahorro energético en el edificio, el uso de la sombra es beneficioso en ciertas épocas del año, pero puede ser contraproducente durante otras (Yang et al., 2006).

El control de la sombra es necesario para asegurar el confort térmico y visual en el interior. Los sistemas de sombra pasivos favorecen una reducción del calor ganado por el edificio, lo que se traduce en un menor uso de los sistemas de refrigeración. Tienen el inconveniente de que reducen la disponibilidad de iluminación natural diurna (Tzempelikos & Athienitis, 2007). Proteger al edificio de sombras

inadecuadas aumenta las horas de luz natural y reduce el uso de luz artificial, con el consiguiente ahorro energético y económico, además de conseguir una mayor comodidad para los usuarios, puesto que la luz natural es más confortable que la artificial. La reducción del uso de luz artificial conlleva una disminución de la carga de calor generada en el edificio (Littlefair, 2001).

La sombra puede provenir de elementos próximos o de sistemas incorporados al propio inmueble. A medida que el uso de energía solar (por ejemplo mediante paneles solares) se va extendiendo, es más necesaria la estandarización de métodos para la valoración de las sombras en el edificio como consecuencia de la existencia de construcciones próximas.

Los beneficios de la sombra sobre la eficiencia energética del edificio están condicionados por el clima del lugar de emplazamiento.

Beneficios energéticos del factor de sombra en climas cálidos

El control sobre los elementos de sombra, iluminación y climatización, permite reducir los picos de demanda de refrigeración, manteniendo unas adecuadas condiciones térmicas y de iluminación (Tzempelikos & Athienitis, 2007).

Persianas y aleros

Un problema de estos sistemas es que a menudo se diseñan para que permanezcan fijos, favoreciendo el ahorro energético en ciertas situaciones y perjudicándolo en otras. Según Bouchlaghem (Bouchlaghem, 2000), los dispositivos de sombra deberían diseñarse para que se puedan adaptar o modificar según las estaciones, permitiendo la sombra en verano e impidiéndola en invierno. Se ha demostrado, mediante simulación con TRANSYS, que incrementando la protección solar ofrecida por los aleros, la demanda anual de frío decrece al mismo tiempo que crece la demanda anual de calor (Florides et al., 2002). Esto se debe a que estos dispositivos bloquean parte de radiación solar que es beneficiosa en invierno. El efecto positivo y negativo será mayor conforme las ventanas estén más orientadas al sur, puesto que reciben más radiación solar anual. Podría ser ventajoso el uso de

aleros de protección de gran longitud en verano que puedan recogerse o retirarse en invierno.

El uso de sistemas de sombra móvil permite mayores beneficios en relación con la iluminación natural y un menor consumo energético. Tzempelikos et al. compararon la efectividad de sistemas pasivos fijos de sombra con un sistema automático de sombra sencillo, concretamente persianas enrollables automáticas (Tzempelikos & Athienitis, 2007). Establecieron un régimen alterno de funcionamiento de las persianas y calcularon la luz transmitida a la habitación según la ecuación 2.13:

$$D = \frac{E_b * \tau_b + E_d * \tau_d}{1 - \rho_{rs} * \rho_w} \quad (2.15)$$

donde D es la transmisión de radiación de la ventana; τ_b es la transmisión difusa de la ventana; τ_{rs} es la transmisión de la persiana enrollable; ρ_{rs} es la reflexión de la persiana. Con este dispositivo consiguieron incrementar la disponibilidad anual de iluminación natural en un 20%. Ello supone un ahorro energético en iluminación artificial, así como un incremento de la productividad.

Los aleros permiten evitar la entrada de radiación directa en la ventana durante ciertos momentos del día, regulando la entrada de calor e iluminación natural no deseada, como muestra la figura 2.15:

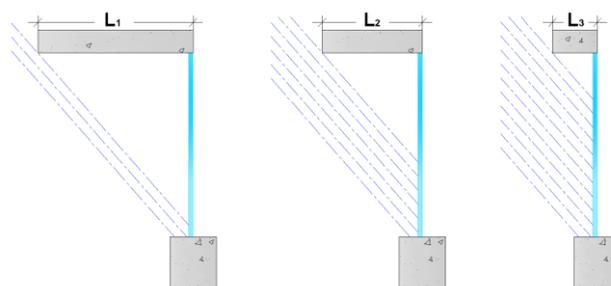


Figura 2.15. Efecto del alero sobre la radiación incidente en una ventana.

Fuente: elaboración propia.

Florides et al. (Florides et al., 2002) cuantificaron el efecto de la longitud del alero sobre la demanda energética. Obtuvieron que una mayor longitud del alero permite reducir la demanda de refrigeración y aumenta la de calefacción.

Robert y Jones midieron la relación entre la dimensión del alero y la radiación solar recibida en invierno (Jones, 1980). Describieron un método para calcular las dimensiones óptimas del alero para una localización concreta. Concluyeron que, cuando se superan estas dimensiones, a pesar de reducirse la radiación recibida en verano, no se compensan las pérdidas producidas en invierno debido a una reducción del calor solar recibido.

Sombra del propio edificio

Mediante el diseño se puede conseguir que sea el propio edificio el que arroje sombra sobre sí mismo, sin necesidad de elementos adicionales. Esto puede resultar beneficioso especialmente en edificios aislados que reciben gran cantidad de radiación solar directa indeseada. Surge así el concepto de fachada “auto-sombreada” (*self-shading*).

La forma más empleada para este fin es la de pirámide invertida (Chwieduk & Bogdanska, 2004). Algunos arquitectos optan por inclinar las paredes en su conjunto, como en el Tempe City Hall. Un problema de este diseño es que, al inclinarse también las ventanas, la superficie efectiva que recibe radiación solar se reduce. Por tanto, es necesario aumentar la superficie de ventana. Este inconveniente se evita en diseños de pirámide invertida escalonada, como en el Banco de Israel. En este edificio, la superficie de ventana no se ve afectada. La figura 2.16 muestra ejemplos de este tipo de edificios.



a) Tempe City Hall, Arizona
Hall, Boston

b) Banco de Israel

c) City Hall, Boston

Figura 2.16. Ejemplos de edificios “auto-sombreados”.

Fuente: (Chwieduk & Bogdanska, 2004)

Según el ángulo de inclinación de la fachada se obtiene un mayor o menor período de sombra. A mayor ángulo de inclinación, más horas de sombra. Por ello, el aprovechamiento de las fachadas “auto-sombreadas” sólo es útil cuando se necesitan un número limitado de horas de sombra, pues en caso contrario se obtendrían unas paredes excesivamente inclinadas.

Beneficios energéticos del factor de sombra en climas fríos

La cantidad de luz solar que entra en el edificio a través de las ventanas depende de la latitud, el clima, la disponibilidad solar del emplazamiento, el ángulo de radiación solar incidente, la obstrucción que pueden crear otros edificios y la energía reflejada por elementos próximos (Salat, 2009)

Los procedimientos empleados para el estudio de la disponibilidad de luz solar en un emplazamiento concreto podrían clasificarse en:

- Métodos gráficos (Littlefair, 1998)
- Estudio del ángulo de obstrucción (Littlefair, 2001)
- Envoltura solar (I. Capeluto & Shaviv, 1997)
- Métodos informáticos (Kabre, 1998)

Sombra arrojada por edificios próximos

El emplazamiento es el factor con mayor impacto sobre el calentamiento solar pasivo. Para Littlefair, la pérdida de luz natural y ganancia de calor debido a obstrucciones próximas son parámetros característicos de la propia ciudad (Littlefair, 1998). Los edificios altos y otras construcciones cercanas afectan a la distribución de luz natural en el interior y bloquean la entrada de luz solar, particularmente durante el invierno. La figura 2.17 muestra un ejemplo de ángulo de obstrucción. No se ha estudiado lo suficiente acerca de los efectos de las obstrucciones sobre la luz difusa recibida. A medida que la zona urbana es más densa, las técnicas desarrolladas hasta el momento para el cálculo de la radiación solar obstruida como consecuencia de los inmuebles pierden precisión.

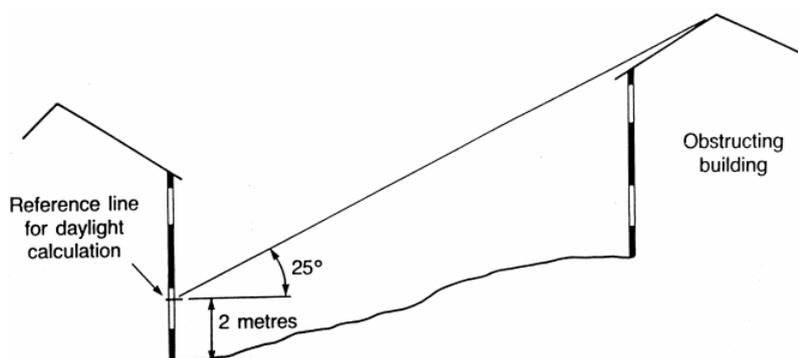


Figura 2.17. Sección de un edificio mostrando un ángulo de obstrucción de 25°

Fuente: (Littlefair, 2001)

El ángulo de obstrucción puede calcularse por métodos gráficos, empleando los diagramas de trayectoria solar. La figura 2.18 muestra un diagrama solar, para una latitud de 55° , señalando el impacto de un ángulo de obstrucción de 10° y de 40° . Se puede observar que la línea de obstrucción de 10° permite a la fachada recibir gran parte de la radiación solar, mientras que la línea de 40° bloquea todo el sol durante los meses de septiembre a marzo.

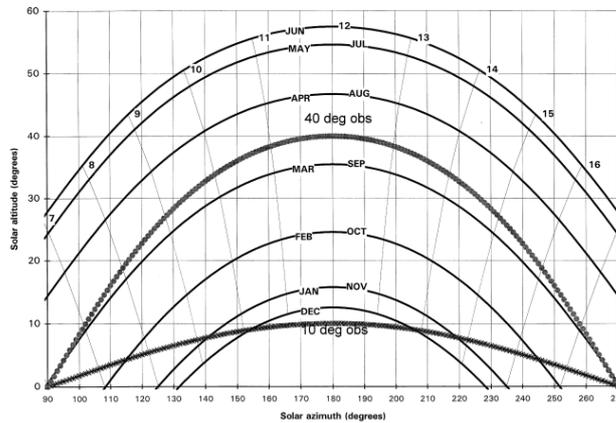


Figura 2.18. Diagrama solar para latitud de 55°, con líneas de obstrucción de 10° y 40°.

Fuente: (Littlefair, 1998)

Es posible establecer unos valores de ángulo de elementos próximos a partir de los cuales los habitantes perciben la reducción de luz natural, con el consecuente aumento de la demanda de iluminación artificial. La tabla 2.4 recoge el valor máximo del ángulo de obstrucción para que un edificio siga recibiendo la suficiente luz solar, dependiendo de la latitud de su emplazamiento.

Tabla 2.4. Ángulos de obstrucción de la luz debido a elementos próximos, según la latitud del emplazamiento. Fuente: (Littlefair, 2001)

LATITUD (°)	CLIMA	ÁNGULO OBSTRUCCIÓN (°C)
35	Mediterráneo	40
40	Mediterráneo templado	35
45	Templado	30
50	Templado	25
55	Frío templado	22
60	Sub-ártico	20

El acceso a la radiación solar pasiva de los edificios es un derecho adquirible y que debería ser protegido por la legislación, ya sea a nivel nacional o a nivel de planes locales (Littlefair, 1998). Las necesidades de recibir radiación solar en invierno no sólo deben ser tenidas en cuenta durante la fase de diseño del edificio en cuestión, sino también durante la fase de diseño de los barrios, incluyendo aceras y espacios abiertos. Surge así la idea de proyectar cada distrito como un sistema optimizado que debe recibir la cantidad de sol necesaria para hacerlo eficiente y asegurar el confort de los habitantes. Las pautas de diseño propuestas por Capeluto y Shaviv se basan en la obtención del “volumen solar” de los edificios, en función de su localización y orientación (I. Capeluto & Shaviv, 1997). La figura 2.19 muestra un ejemplo. Los autores trabajaron con estos gráficos para determinar la altura de edificios, ancho de las calles y orientación del conjunto de forma que se obtengan los niveles de densidad urbana más altos posibles junto con la exposición solar óptima.

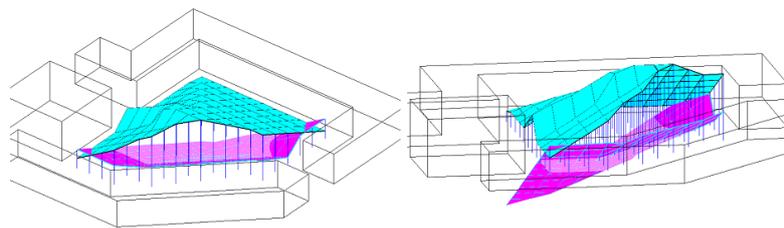


Figura 2.19. Volumen solar como conjunción de envoltura de derecho solar (plano superior) y envoltura de recepción solar (plano inferior). Fuente: (I. Capeluto & Shaviv, 1997).

2.2.6. Sistemas pasivos

Las técnicas pasivas de control de la temperatura y humedad interior ya se empleaban en la antigüedad. Con la extensión del uso de la energía eléctrica estos métodos cayeron en desuso (Raman, Mande, & Kishore, 2001). En países desarrollados, especialmente aquellos con climas muy cálidos, existe un interés creciente por los sistemas de bajo coste para enfriamiento pasivo de los edificios

(Givoni, 1991). Estos mecanismos se fundamentan en el movimiento convectivo natural provocado por la diferencia de densidad entre el aire frío y el aire caliente (Raman et al., 2001). Sin embargo, el término pasivo no excluye el uso de ventiladores o bombas de impulsión cuando permitan mejorar el funcionamiento. Este concepto enfatiza el uso de fuentes naturales de enfriamiento o calentamiento, pero se precisa algún tipo de fuerza para impulsar la instalación. El procedimiento pasivo de transferencia de calor es económico y simple. Por lo tanto el ratio de consumo energético, en comparación con el total de la instalación, es relativamente bajo (Givoni, 1991). El tipo de sistema pasivo escogido influirá en diversos aspectos del diseño.

Enfriamiento pasivo

El enfriamiento pasivo, *passive cooling*, se define como la limitación de calor hacia el interior del edificio, empleando procesos naturales para rechazar el calor a la atmósfera ambiente por convección, evaporación y radiación, o bien a la tierra adyacente por conducción y convección (Givoni, 1994).

En este apartado se seguirá la clasificación de sistemas pasivos realizada por Givoni y resumida en el siguiente esquema (Givoni, 1994)

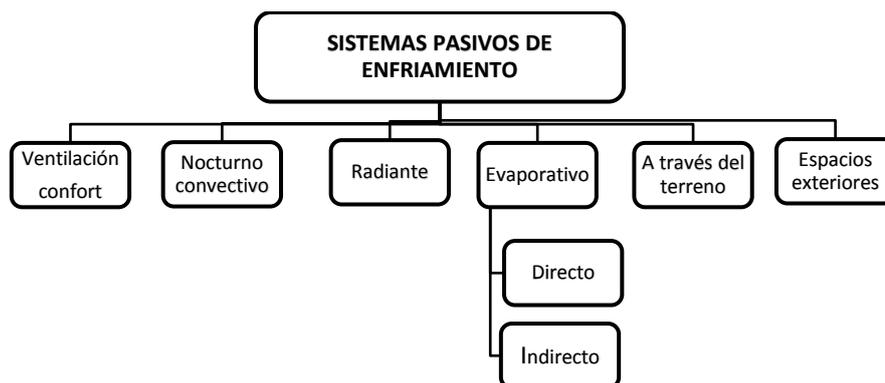


Figura 2.20. Clasificación de sistemas pasivos de enfriamiento. Fuente: (Givoni, 1994)

La efectividad de los sistemas pasivos de enfriamiento está muy relacionada con el gradiente de temperatura exterior entre el día y la noche y con los picos de temperatura máxima según la localización. Algunos procedimientos pasivos proporcionan una efectividad inmediata, como la ventilación natural y el enfriamiento evaporativo directo. Otros sistemas almacenan el frío en la masa estructural del edificio. El principal factor que limita su eficiencia y aplicabilidad es la capacidad limitada de la masa estructural del edificio de almacenar energía térmica (Givoni, 1991). Atendiendo a la anterior clasificación de métodos, se resumen los más importantes.

Ventilación natural

También denominada “ventilación confort” (*comfort ventilation*) se basa en el efecto psicológico positivo del flujo de aire exterior con una velocidad adecuada a través del edificio. En zonas con climas cálidos húmedos este efecto mejora notablemente la sensación de bienestar de los habitantes, aun cuando el aire entrante no presenta mejores condiciones de temperatura o humedad que el aire interior. La ventilación diaria es, por lo tanto, necesaria para minimizar el efecto psicológico de la alta humedad y mejorar la pérdida convectiva de calor del cuerpo (Givoni, 1991).

El término “ventilación natural avanzada” fue acuñado para englobar los edificios que emplean el efecto chimenea (aprovechando el movimiento natural del aire debido a diferencia de temperatura y densidad) para mantener el flujo de aire (Kevin J. Lomas, 2007). La figura 2.21 muestra un ejemplo.

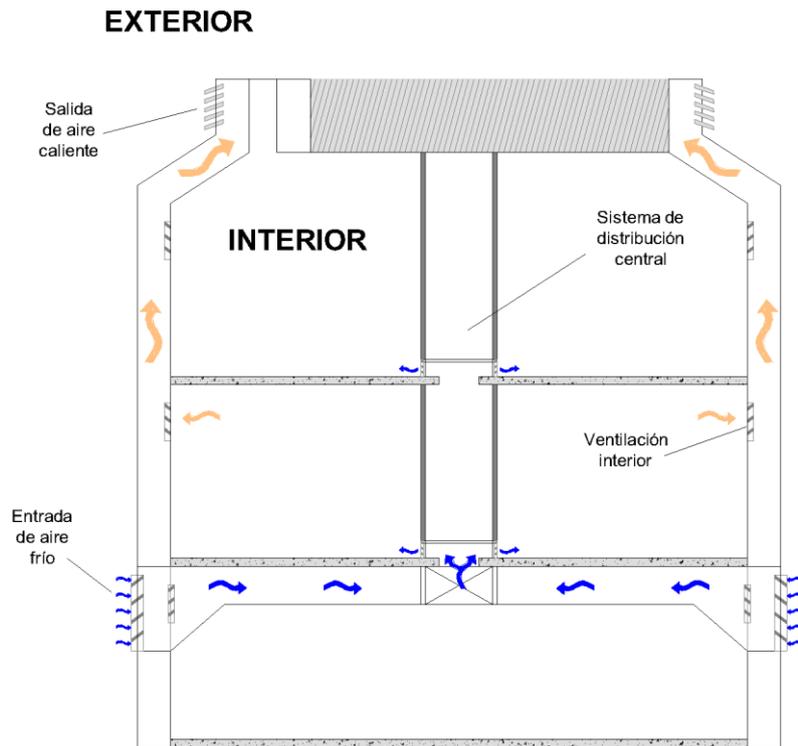


Figura 2.21. Esquema funcionamiento sistema ventilación natural.

Fuente: elaboración propia.

Enfriamiento nocturno convectivo

Se fundamenta en el enfriamiento de la masa estructural del interior del edificio mediante ventilación nocturna (*nocturnal convective cooling*). Mantener el edificio cerrado durante el día evita que las temperaturas interiores asciendan. Este procedimiento es aplicable en regiones áridas o desérticas, con altas temperaturas diurnas, y en las que la temperatura mínima nocturna en verano está por debajo de los 20°C. También es efectivo en edificios no residenciales con altas demandas de refrigeración y sin ocupación durante la noche, como edificios lectivos o de oficinas. La ventilación nocturna ayuda a reducir los picos de demanda y periodos de funcionamiento de los equipos eléctricos de refrigeración. Estudios experimentales han demostrado que puede reducirse la temperatura media de una estancia hasta en 3°C mediante ventilación nocturna (Givoni, 1994).

Enfriamiento radiante

El enfriamiento radiante (*radiant cooling*) requiere la construcción de techados densos y altamente conductivos (por ejemplo de hormigón) y la disposición de un material aislante. Durante el día el aislamiento exterior del tejado minimiza el calor ganado de la radiación solar. La masa enfriada del tejado puede servir como un amortiguador del calor y absorber, a través del techo, el calor entrante y el interno generado durante el día. El sistema es eficiente en relación con la pérdida de calor durante la noche (Givoni, 1991).

Enfriamiento evaporativo

Aprovecha las corrientes de aire naturales para enfriar los edificios mediante dispositivos de evaporación directa o indirecta de agua en el aire. Un ejemplo de evaporación directa es la colocación de almohadillas de tela húmedas en las ventanas. Un inconveniente de este sistema es la reducción de la visión a través de las ventanas (Givoni, 1991). En los sistemas de evaporación indirecta el aire interior no aumenta su contenido de vapor. El aire exterior accede al tejado, que está a menor temperatura. De ahí, mediante convección, el aire frío se distribuye por el edificio.

Ejemplos de evaporación indirecta son el tejado de paja que se humedece durante la noche y se evapora en el transcurso del día, o el estanque de agua en el tejado. El método ideado por Raman et al, ilustrado en la figura 2.22., es uno de los más efectivos y el que consigue mayor descenso de la temperatura interior (Raman et al., 2001).

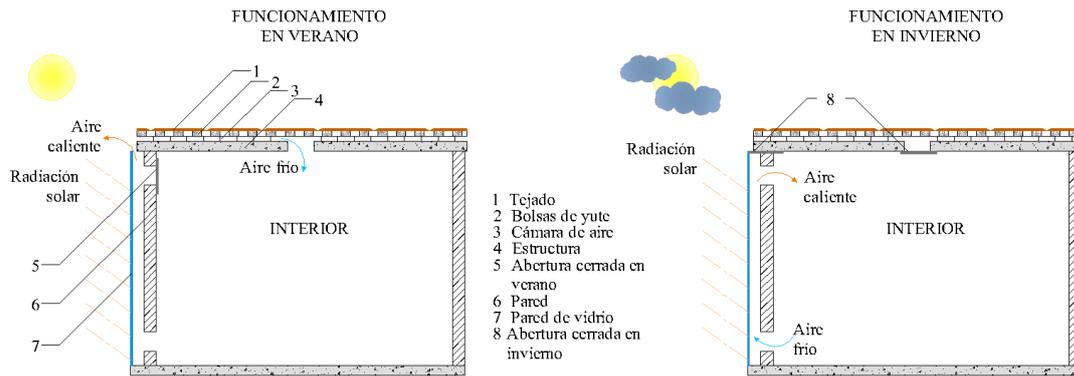


Figura 2.22. Sistema enfriamiento evaporativo.

Fuente: elaboración propia a partir de (Raman et al., 2001)

Este mecanismo consiste en la instalación de unas bolsas de yute (textil natural) u otro material humedecido para enfriar el aire que accede al tejado por los huecos de ventilación superiores. Se combina con una chimenea natural para mantener el movimiento convectivo en el edificio, de forma que el aire frío cuando entra en contacto con esta pared, se calienta, disminuye su densidad y asciende a través de esta pared hasta su salida por los huecos superiores de la misma. Pueden alcanzarse beneficios en invierno, retirando las bolsas húmedas y modificando la entrada de aire. Este sistema permite mantener una temperatura interior 10°C menor en verano y 15°C superior en invierno respecto del exterior (Raman et al., 2001).

Enfriamiento a través del terreno

Se aprovecha la inercia térmica del suelo para el enfriamiento del edificio. Pueden disponerse edificaciones enterradas o semienterradas, o instalarse conducciones subterráneas. En regiones con un clima templado, la temperatura natural de la tierra en verano, a una profundidad de 2-3 m, puede ser lo suficientemente baja para servir como una fuente de enfriamiento. En regiones más calurosas, la temperatura natural de la tierra en verano es normalmente demasiado alta como para servir de fuente de refrigeración (Givoni, 1991).

Calentamiento pasivo

Mediante el uso de opciones pasivas, basadas en propiedades termo-físicas y en la configuración de la envolvente del edificio, pueden eliminarse 2/3 del discomfort térmico (Ralegaonkar & Gupta, 2010).

El aprovechamiento pasivo de la energía solar consiste en el uso de determinados elementos del edificio (paredes, cubierta, vidrios) para almacenar calor. El grado de eficacia de estos sistemas depende de las condiciones climáticas, los materiales de construcción escogidos y el tipo de utilización de la energía solar, directa o indirecta (Neufert, 1995).

Recintos con ganancias solares directas, como los solariums, proporcionan una superficie extra de absorción de la radiación solar y una masa adicional para su almacenamiento. Son los más efectivos en lo que atañe al calentamiento y la iluminación diurna dentro del edificio (Ralegaonkar & Gupta, 2010). Se han investigado más las técnicas pasivas de calentamiento que las técnicas pasivas de enfriamiento (Raman et al., 2001). Por lo general, este tipo de mecanismos pasivos funcionan mejor cuando se combinan entre sí (H.-Y. Chan, Riffat, & Zhu, 2010).

A continuación se describen los principales métodos pasivos de calentamiento del edificio:

Muro Trombe

Su diseño se basa en la anexión al muro de un vidrio exterior, dejando un canal de aire entre ambos y unas aberturas superiores e inferiores para controlar el flujo de aire. La energía solar es almacenada en el muro y posteriormente transferida al interior del edificio por conducción, saliendo el aire caliente por los respiraderos superiores. El aire frío accede al espacio entre el muro y el cristal a través de los respiraderos inferiores y aumenta su temperatura en contacto con el muro, iniciándose el ciclo de nuevo (H.-Y. Chan et al., 2010). Son numerosos los investigadores que han tratado de mejorar el diseño inicial. La figura 2.23 recoge algunos ejemplos (H.-Y. Chan et al., 2010)(Fang & Li, 2000): a) corresponde a un diseño clásico, b) es un muro Trombe-Michel en el que se añade una pared aislante

entre el vidrio y el muro, y finalmente c) muestra la sustitución del muro macizo por un muro en celosía.

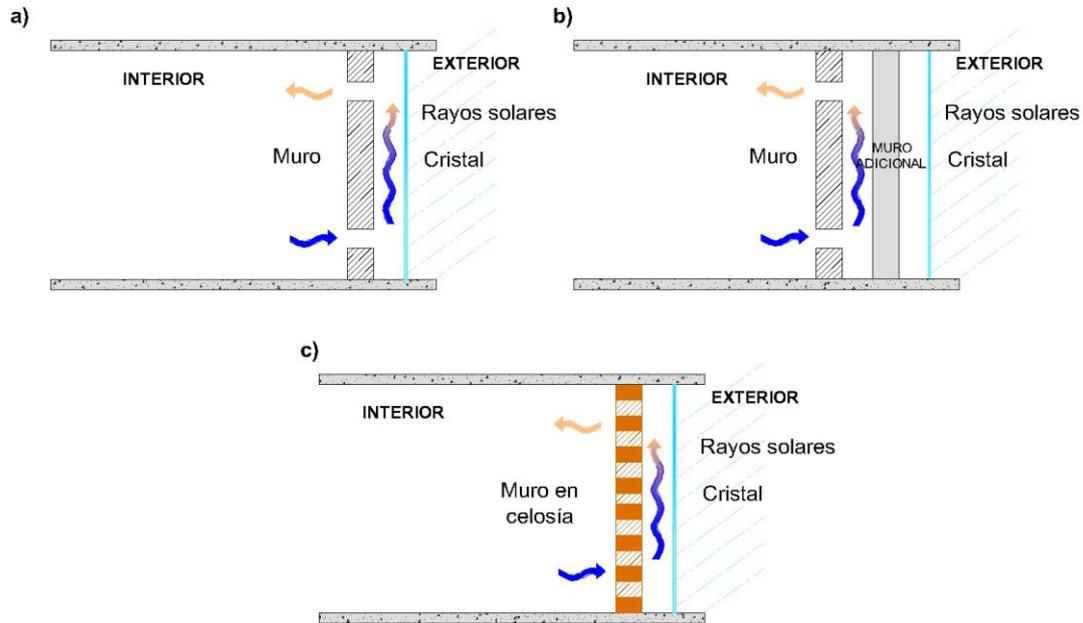


Figura 2.23. Modalidades de muro Trombe. Fuente: elaboración propia.

El modelo de la pared en celosía presenta una mejora de casi el 18% en la eficiencia térmica (llegando hasta el 30.2% de eficiencia) y un ahorro del hormigón para su construcción del 35% (Fang & Li, 2000).

Chimenea solar

Emplea el movimiento convectivo natural del aire debido a la diferencia de densidad para crear corrientes internas en el edificio. En los casos en los que la chimenea se adhiere a la pared del edificio, su funcionamiento es similar al del muro Trombe ya mencionado, proporcionando beneficios también en verano. A pesar de ofrecer resultados positivos, no siempre podrá ser empleada debido por ejemplo a limitaciones estéticas (H.-Y. Chan et al., 2010). Según la distribución y apertura de los respiraderos de ventilación, la chimenea solar puede funcionar

como sistema de ventilación natural, método de calentamiento pasivo o como dispositivo de aislante térmico, según muestra la figura 2.24.

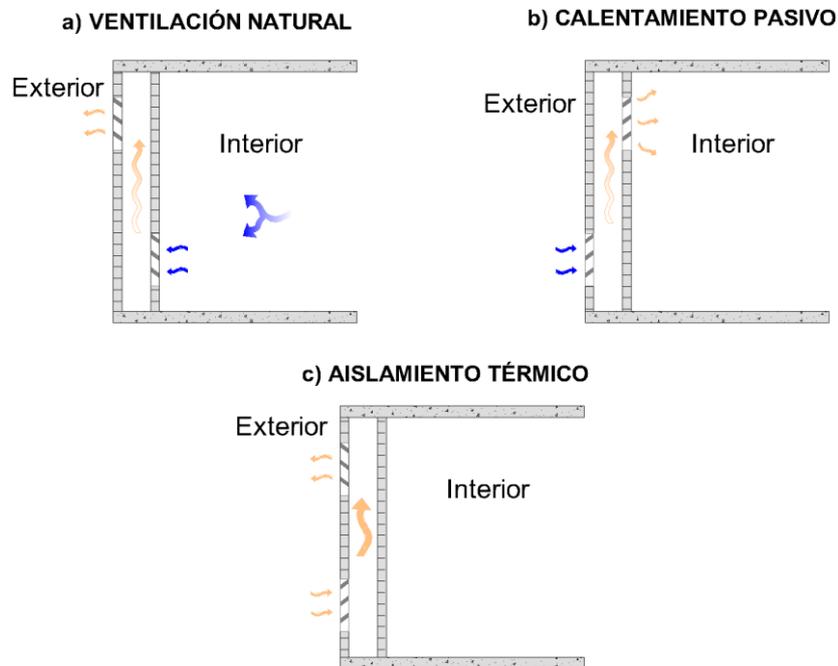


Figura 2.24. Modalidades de chimenea solar. Fuente: elaboración propia.

Fachada solar transpirante sin cristales

Está formada por láminas de metal con huecos de ventilación, como muestra la figura 2.25. La chapa metálica del exterior recibe la radiación solar, y el aire que accede (con ayuda de un ventilador) a través de los huecos al interior, es calentado. Este aire se conduce hasta la conexión con el sistema de climatización. Resultados experimentales demuestran que este sistema puede proporcionar un ahorro del consumo energético de hasta 1 MWh/m²año, con una eficiencia de hasta el 63–68% (H.-Y. Chan et al., 2010). En comparación con el muro Trombe, su construcción es más económica.

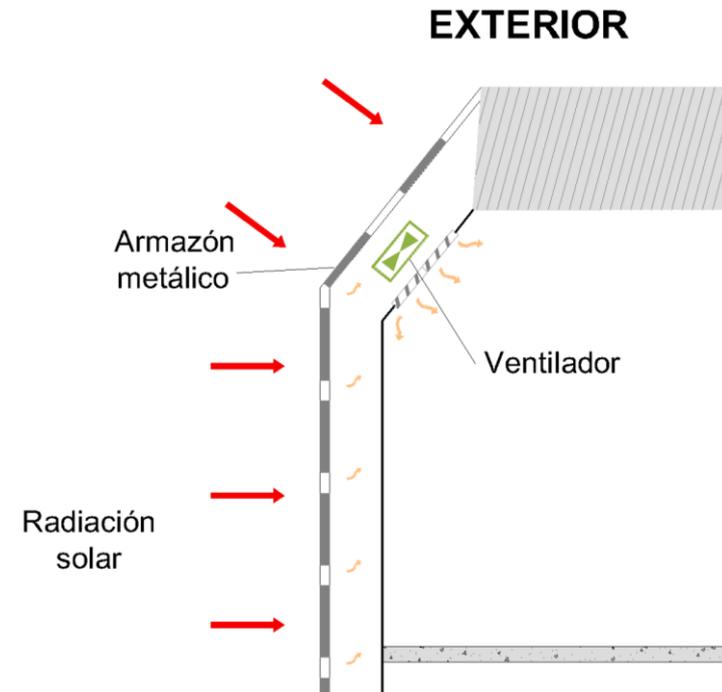


Figura 2.25. Esquema funcionamiento pared solar metálica.

Fuente: elaboración propia.

Uso de materiales de cambio de fase como sistemas pasivos

Los materiales con cambio de fase (*Phase Change Material-PCMs*) son materiales con un alto calor latente que, a la temperatura de cambio de fase son capaces de almacenar o liberar grandes cantidades de energía y pueden ser aprovechados como mecanismo de almacenaje térmico de energía solar. Mientras se les aporta calor por debajo del punto de fusión, estos materiales almacenan una gran cantidad de energía en forma de calor sensible. Cuando el material alcanza la temperatura de fusión, cambian de fase mientras se mantiene una temperatura constante, produciéndose el almacenamiento de calor. Cuando el líquido se enfría y vuelve a la fase sólida, el calor almacenado es cedido al ambiente (Sage-Lauck & Sailor, 2014)

La combinación de materiales de construcción con este tipo de compuestos es una forma efectiva de incrementar la capacidad de almacenamiento térmico de los elementos constructivos (Memon, 2014). Estos materiales pueden ser empleados

tanto en sistemas de climatización pasivos como activos. Deben poseer unas características físico-térmicas, cinéticas, químicas, económicas y ambientales aptas para su uso como mecanismo de almacenamiento térmico, aunque un solo material no puede contener todas estas propiedades.

El uso de materiales de cambio de fase es muy apropiado cuando la temperatura de fusión del material es similar a la temperatura del aire deseada en el interior y cuando la variación de la temperatura a lo largo del día permite el ciclo entero entre la fase sólida y líquida del material (Sage-Lauck & Sailor, 2014).

Los materiales de cambio de fase pueden agregarse al resto de componentes o elementos de construcción mediante incorporación directa, inmersión, encapsulación o mediante compuestos de forma estable. El esquema a continuación recoge una clasificación de este tipo de materiales basada en su composición química:



Figura 2.26. Clasificación de los materiales de cambio de fase.

Fuente: (Memon, 2014)

A pesar de que su uso en sistemas constructivos se conoce desde los años setenta aproximadamente (Sage-Lauck & Sailor, 2014), ha sido en los últimos años cuando se ha expandido su uso e investigación. Las últimas investigaciones en este campo se centran no sólo en el perfeccionamiento de las propiedades de estos materiales, sino que tratan de desarrollar nuevas metodologías para valorar su eficacia cuando se integran en un elemento constructivo.

El uso de este tipo de materiales permite mejorar el confort térmico en el interior del edificio y reducir las fluctuaciones de temperatura, especialmente en edificios muy herméticos, como es el caso de las *passive-house*. Sage-Lauck et al. observaron una reducción de hasta el 60% en el número de horas en las que el interior de una estancia está por encima de la temperatura de confort debido a un sobrecalentamiento (Sage-Lauck & Sailor, 2014). Estos autores emplearon el software EnergyPlus™ para evaluar el rendimiento de un material de cambio de fase macro-encapsulado denominado BioPCM™.

Jaworski et al. estudiaron el rendimiento térmico de un falso techo formado por un compuesto de yeso y material de cambio de fase microencapsulado (Jaworski, 2014). Mediante la libre circulación del aire por conductos internos del falso techo, este elemento se diseñó como un sistema de refrigeración pasivo del edificio y de intercambio de calor. Con este sistema consiguieron una reducción de las oscilaciones de temperatura en el interior.

Uno de los aspectos más innovadores sobre la investigación en materiales de cambio de fase es la creación de mecanismos de simulación que permitan conocer su comportamiento y que en un futuro se incorporen a las herramientas habituales de simulación energética de edificios. Guichard et al. crearon un modelo térmico para analizar el comportamiento de un tejado al que se incorporaron este tipo de materiales (Guichard, Miranville, Bigot, & Boyer, 2014). Desarrollaron un modelo numérico que fue integrado a un sistema de simulación del edificio más complejo, codificado en MATLAB®.

2.2.7. Estudio del tipo de vidrio

El vidrio de las ventanas constituye uno de los puntos más débiles del control térmico del interior del edificio. En una casa familiar estándar, entre un 10% y un 20% de las pérdidas de calor se producen a través de las ventanas (Roos & Karlsson, 1994).

Confort térmico e iluminación interior

En el diseño de los vidrios se debe considerar el comportamiento en términos de transmisión de calor, confort térmico, transmisión de luz y apariencia (Chaiyapinunt, Phueakphongsuriya, Mongkornsaksit, & Khomporn, 2005). Los vidrios que reducen la entrada de la radiación solar son más efectivos en verano y permiten reducir la demanda de refrigeración. En cambio, en invierno provocan un aumento de la necesidad de calefacción porque impiden que se aproveche la energía solar para el calentamiento pasivo del edificio.

El desarrollo de vidrios que reducen la cantidad de radiación no debe afectar a la visión a través de los mismos, especialmente cuando se requiere mucha iluminación natural, como es el caso de los edificios de oficinas. Una reducción de la iluminación natural provoca un aumento del uso de luz artificial, lo que se traduce en un mayor coste energético y un aumento de la temperatura interna (Reppel & Edmonds, 1998).

Por otra parte, las soluciones de diseño que mejoran el nivel de luz diurna que traspasa las ventanas están a menudo asociadas con un riesgo potencial de sobrecalentamiento interior y un aumento de la demanda de refrigeración en estaciones calurosas (Pereira & Sharples, 1991), (Reppel & Edmonds, 1998).

Chen et al. realizaron un estudio del potencial de ahorro energético en un edificio industrial en China mediante el aprovechamiento de la iluminación natural y su repercusión en la demanda final de calefacción (Chen et al., 2014). Evaluaron dos estrategias de aprovechamiento de la iluminación natural, la primera un control on/off y la segunda un control del oscurecimiento interior. Obtuvieron un potencial de ahorro del uso de iluminación artificial de entre el 36.1% y el 41.5% para ambas estrategias, mientras que la demanda de calefacción se incrementó

entre un 7.1% y un 8.7%. Construyeron un modelo del edificio en Ecotect (Autodesk®) y realizaron una simulación de la iluminación natural con el software Radiance (Desktop®). Finalmente, evaluaron el consumo energético de ambas propuestas mediante la simulación con el software EnergyPlus™.

Tipos de vidrio

Los vidrios que proporcionan un ahorro energético pueden clasificarse en (Yang et al., 2006):

- Vidrios absorbentes: transforman la radiación solar absorbida en energía calorífica, aumentando su temperatura, y dispersando el calor en la habitación a través de convección y radiación para reducir la radiación directa a través del cristal.
- Vidrios reflectantes: son aquellos con un film o imprimación que bloquea la entrada de radiación solar en la habitación.
- Vidrios de baja radiación: también pertenecen a los vidrios con imprimación. Reducen el coeficiente de transferencia de calor mediante un film o imprimación. También pueden facilitar el ahorro energético en invierno.

Vidrios con imprimación

Están tratados con capas de otro material para mejorar su comportamiento térmico. Los más comunes se basan en metales (Cr, Ti, Ag y acero inoxidable), nitritos metálicos (CrN, TiN, ZrN) u óxidos metálicos (SnO₂, TiO₂, ZnO). Las capas impresas pueden ser de baja emisividad, reflectivas, tintadas o selectivas de espectro. En general, la mayoría se producen mediante un proceso de alto coste (Gijón-Rivera, Álvarez, Beausoleil-Morrison, & Xamán, 2011).

El comportamiento térmico de este tipo de vidrios depende de sus propiedades espectrales. Para valorar la efectividad de estos vidrios en términos de confort

térmico y transmisión de calor, deben evaluarse simultáneamente las propiedades de transmisión total y la absorción total del cristal (Chaiyapinunt et al., 2005).

Las imprimaciones o films que se adhieren al vidrio reducen el nivel de transmisión a la vez que aumentan el de absorción. Un índice de transmisión alto intensifica el riesgo de sobrecalentamiento interior. Por otra parte, un índice de absorción elevado provoca un incremento de la temperatura de la superficie del cristal. Al añadir capas o film al vidrio, disminuye el efecto negativo de la radiación solar dentro del inmueble, pero la temperatura de la superficie del cristal alcanza niveles indeseados y decrece el nivel de iluminación natural interior. Los vidrios con una capa adicional (excepto los reflectantes) que tienen un valor de transmisión alto provocan mayor discomfort en los usuarios (Chaiyapinunt et al., 2005).

Gijón-Rivera et al. han aportado una solución a este problema al desarrollar vidrios con una capa interna que impide el calentamiento excesivo del cristal (Gijón-Rivera et al., 2011). Evaluaron la efectividad de un vidrio con una imprimación de una combinación química (SnS y Cu_xS) que limita el acceso de luz y calor al edificio. Obtuvieron que el ahorro energético producido por un vidrio óptimo está influenciado por el clima en el que se sitúa el edificio objeto de estudio.

Vidrios selectivos del ángulo de incidencia de la radiación

La intensidad de la radiación solar recibida depende de su ángulo de incidencia. Los rayos con un ángulo mayor (verano y mediodía) proporcionan más radiación. Un sistema que seleccione el ángulo de los rayos que acceden al interior puede ser efectivo para el control térmico.

Los dispositivos de selección del ángulo pueden construirse en el interior de los cristales, incorporarse dentro de nuevos objetos situados entre los cristales, o ser parte de elementos unidos a los marcos interiores o exteriores de la ventana. Este tipo incluye una gran variedad como: persianas, pantallas, tablillas fijas o móviles, e incluso superficies acristaladas para la redirección de la luz solar que accede (McCluney, 1998).

Reppel et al. desarrollaron un vidrio capaz de seleccionar los rayos que acceden al edificio en función de su ángulo de incidencia (Reppel & Edmonds, 1998). Todo ello sin afectar a la transparencia del cristal. El sistema ideado se basa en la colocación de bandas horizontales en el interior del espesor del vidrio. Los rayos de sol al incidir sobre estas bandas sufren una serie de reflexiones y desvían su recorrido inicial. Trabajando con la distancia entre las bandas y el ancho de éstas, calcularon el recorrido de cada rayo. Consiguieron desviar o reflejar los rayos con mayor ángulo de incidencia y permitir el acceso al interior sólo de los rayos con menor ángulo. Formularon la fracción de rayos reflejados como una ecuación a partir del ángulo de incidencia. La figura 2.27 muestra cómo se produce la transmisión de los rayos solares a través de un vidrio selectivo del ángulo.

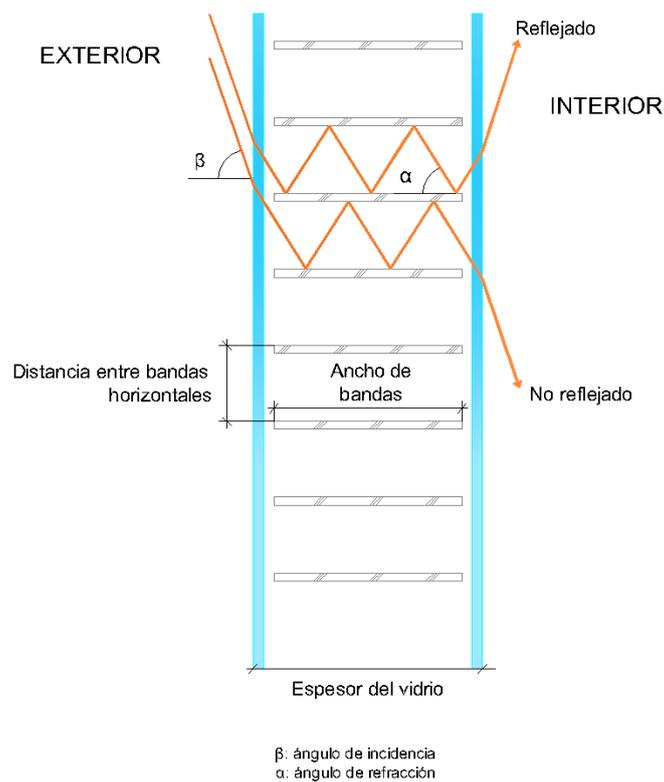


Figura 2.27. Transmisión de luz a través de un vidrio selectivo del ángulo.

Fuente: elaboración propia.

Vidrios que proporcionan selección del espectro

También pueden instalarse cristales selectivos del espectro solar, en los que se controla la radiación según la longitud de onda (Roos & Karlsson, 1994)(McCluney, 1998).

Soluciones constructivas

Giro del vidrio respecto al edificio

Es un sistema efectivo para modificar la cantidad de calor que entra en el edificio a través de las ventanas. La modificación del ángulo existente, entre el vidrio y la fachada, conlleva cambios en la intensidad de radiación solar recibida y por tanto en las ganancias de calor (Saleh, Kaseb, & El-Refaie, 2004). Mediante soluciones constructivas que permiten aumentar el ángulo de giro del cristal, puede aumentarse considerablemente el área que recibe radiación y así incrementar las ganancias solares. En un modelo optimizado, mediante simulación, se consiguió aumentar la ganancia solar en un 63% respecto a un modelo sin rotación en los cristales (Saleh et al., 2004). El mayor inconveniente de este sistema es que las ganancias también se aumentan en verano, al ser un sistema fijo, y pueden provocar un aumento de la demanda de refrigeración. La figura 2.28 muestra varias de estas soluciones.

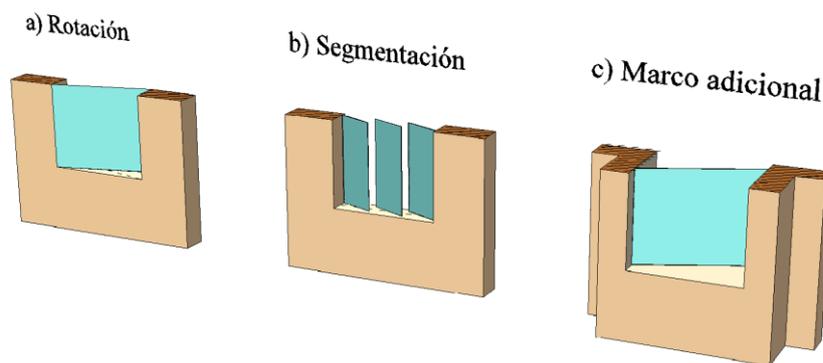


Figura 2.28. Soluciones constructivas para giro del vidrio: a) rotación, b) segmentación, c) marco unido a la ventana. Fuente: (Saleh et al., 2004)

Doble cristal

Otra forma de optimización del comportamiento de las ventanas es el uso de doble cristal. Puede resultar un método efectivo tanto para climas cálidos como para climas fríos (Gijón-Rivera et al., 2011). En el primer caso debe instalarse doble cristal transparente, y en el segundo, doble cristal con una imprimación que limita el calentamiento de la superficie de la ventana.

Sistemas de iluminación diurna avanzada

Su objetivo es introducir la iluminación diurna en el centro de los espacios de un edificio. Los sistemas de iluminación solar incluyen los conductos de luz solar o tubos solares, las pantallas solares situadas en el tejado, sistemas de colección óptica y sistemas especiales de captación solar en las paredes (McCluney, 1998). Un inconveniente de su uso es la dificultad para valorar su comportamiento debido a la naturaleza compleja de los mecanismos de selección del ángulo.

2.3. CÁLCULO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS

Los usuarios de un edificio consumen energía para cubrir las necesidades de climatización, iluminación, agua caliente sanitaria y el uso de equipamientos. Tal y como se ha mostrado, la demanda de climatización es la que tiene un mayor peso en el resultado final y es la principal responsable de las emisiones de CO₂ asociadas al consumo energético debido al uso de los edificios.

La demanda térmica de los edificios surge como resultado de mantener la temperatura interior en un rango confortable para los usuarios. Esta demanda está afectada por una serie de efectos dinámicos que representan los fenómenos de transferencia de calor que se producen en un edificio.

Existen métodos estandarizados que detallan el procedimiento de cálculo de la demanda energética de la climatización y la refrigeración de un edificio. En estos métodos se realiza un balance entre los requerimientos energéticos para mantener a los usuarios bajo unas condiciones de confort térmico y las pérdidas y ganancias de calor que se producen en el edificio como consecuencia de la interacción térmica con el medio.

Las técnicas de simulación dinámica energética de edificios se basan en los principios de la termodinámica y las ecuaciones que la definen, junto con los supuestos asumidos por el usuario, para calcular la demanda energética final del edificio. El uso de estos procedimientos permite conocer en profundidad el uso de la energía en el edificio, ya sea un edificio real o en fase de proyecto.

En este capítulo se describe el confort térmico como causante de la demanda de climatización. Se detallan los fundamentos de la transferencia de calor presentes en un edificio. A continuación, se analizan los métodos estandarizados para el cálculo de la demanda energética para la climatización. Por último, se describen las propiedades de las herramientas de simulación dinámica y los pasos a seguir para realizar la simulación de un edificio.

2.3.1. Confort térmico y demanda de climatización

Las personas están influenciadas por el clima en el que viven y su respuesta a las condiciones del espacio que habitan. El consumo de energía para climatización de un edificio, debe satisfacer las necesidades de sus ocupantes para mantener unas condiciones térmicas y de humedad confortables. La temperatura de confort es el resultado de la interacción entre unos sujetos y el edificio que ocupan y se define como la temperatura equivalente donde una persona se siente térmicamente confortable (Nicol & Humphreys, 2002).

La percepción por parte de los ocupantes de una sensación de confort depende de factores tanto físicos como psicológicos. Son cuatro los factores ambientales de los que depende la sensación física de comodidad térmica: la temperatura del aire, el campo radiante en el que se encuentre el sujeto, la humedad relativa y el movimiento del aire. La “zona de comodidad térmica” es el rango de condiciones en las que el cuerpo humano se siente cómodo en un medio.

A pesar de que los factores que influyen en la comodidad térmica de los sujetos fueron estudiados en profundidad anteriormente, fue el científico Fanger quien en los años setenta, desarrolló un modelo para valorar la sensación térmica del usuario. A fecha de hoy, este método sigue siendo aplicado para el cálculo de instalaciones de climatización (Fanger, 1972). Fanger estableció relaciones empíricas basadas en la observación de sujetos y relacionó la temperatura como función del calor metabólico. También relacionó las pérdidas de calor por evaporación como una función de la superficie del cuerpo que produce calor metabólico.

En el método Fanger se estiman factores como la vestimenta, la tasa metabólica, la temperatura del aire, la temperatura radiante media, la velocidad del aire y la humedad relativa. En base a estos parámetros, se calculan dos índices de valoración:

- Voto medio estimado, (PMV). Indica el valor medio de los votos emitidos por un grupo de personas en base a una escala de sensación térmica de 7

niveles que va desde frío, fresco a muy caluroso. Este índice predice el valor medio de la sensación térmica.

- Porcentaje de personas insatisfechas, (PPD). Predice de forma cuantitativa la proporción de usuarios que consideran que la sensación térmica del entorno no es agradable.

El valor de estos índices permite establecer categorías de calidad de ambiente térmico (tabla 2.5), donde PD es el porcentaje de insatisfechos y DR es el porcentaje de población molesta por corrientes de aire.

Tabla 2.5. Categorías del ambiente térmico según los valores de PMV y PDD del método Fanger. Fuente: UNE-EN-ISO 7730:2006 (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2006)

Categoría	Estado térmico del cuerpo en su conjunto		Incomodidad local			
	PDD %	PMV	DR %	PD %		
				diferencia de temperatura vertical del aire	provocada por suelo caliente o frío	asimetría radiante
A	< 6	- 0.2 < PMV < +0.2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	- 0.5 < PMV < +0.5	< 20	< 20	< 10	< 5
C	< 15	- 0.7 < PMV < +0.7	< 30	< 30	< 15	< 10

Este método ha sido un referente desde que se publicó y, por ejemplo, fue adoptado por la normativa española para el cálculo del bienestar térmico de espacios. Sin embargo, los nuevos métodos tienen cada vez más en cuenta los aspectos psicológicos, culturales y sociales del confort térmico.

Según Brager and de Dear, la percepción térmica de un sujeto está influenciada por experiencias pasadas, factores no térmicos y expectativas térmicas del individuo (Brager & de Dear, 1998). Según estos autores, la adaptación térmica de una persona a su entorno es el resultado de tres procesos: adaptación de la conducta, aclimatación fisiológica y habituación psicológica o de las expectativas.

De acuerdo con Nicol et al., los índices racionales que emplean las normas de diseño de instalaciones de climatización no tienen en cuenta determinados factores, proponiendo unos índices en los que se tenga en el proceso de adaptación térmica de los individuos (Nicol & Humphreys, 2002). Destacan los beneficios, sobre la eficiencia del edificio, que tiene permitir el acceso de los usuarios al control de las instalaciones de climatización del edificio.

Son diversos los métodos de valoración del bienestar térmico del individuo. En 1969, Givoni planteó un diagrama psicrométrico mediante el cual, a partir de los datos de humedad y temperatura, es posible evaluar la sensación térmica y de confort. El diagrama de Givoni se muestra en la figura 2.29, donde pueden observarse las zonas de confort higrométrico y las zonas en las que el confort es alcanzable mediante estrategias pasivas, como ventilación cruzada o enfriamiento evaporativo.

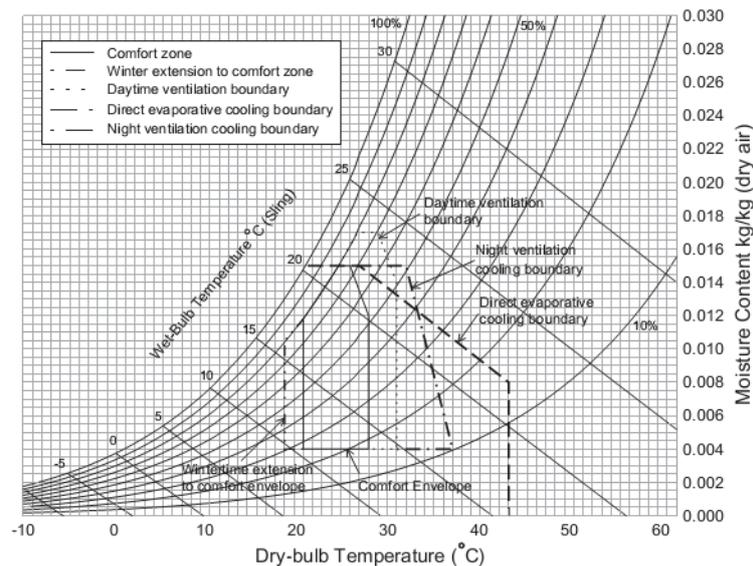


Figura 2.29. Diagrama de Givoni para países desarrollados.

Fuente: (K.J. Lomas, Fiala, Cook, & Cropper, 2004)

Un método típico de valoración del confort térmico es la encuesta directa al usuario. En la escala Bedford, el individuo puede identificar su sensación en 7 categorías, desde “demasiado caliente” a “demasiado frío”, pasando por estadios

intermedios. Métodos más avanzados como el de la norma 55-2013 de la *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRE) "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy"*, se basan en un método racional en el cual el índice de confort expresa el estado térmico del cuerpo en términos de temperatura, humedad, movimiento del aire, vestimenta y actividad.

La respuesta del individuo y el proceso de adaptación a un entorno que no está a la temperatura ideal, difieren según se trate de un espacio climatizado o de un edificio naturalmente ventilado, puesto que los ocupantes de un edificio sin climatización mecánica mantienen unas expectativas de confort más amplias y menos estrictas. En cambio, en un edificio climatizado el individuo tiene expectativas más rígidas (Brager & de Dear, 1998).

La humedad es un factor a considerar cuando se detallan condiciones de comodidad térmica. La humedad relativa del aire cuantifica la capacidad del aire para absorber humedad y por tanto la cantidad de calor que puede disipar un cuerpo mediante evaporación. Según Çengel, un rango de humedad relativa deseable se encuentra entre el 30 y el 70%, siendo el 50% el óptimo (Çengel, 2007). También influye la velocidad del aire interior de manera que, una velocidad excesiva, causa un rápido enfriamiento del cuerpo humano y por lo tanto una sensación de disconfort térmico.

Estos métodos de valoración son empleados por las normas técnicas y códigos para establecer unos requisitos de confort mínimos y sirven de base en el dimensionamiento y diseño de instalaciones de climatización y ventilación. Cuanto más precisas sean estas escalas de valoración se evitarán sobredimensionamientos en las instalaciones. (Nicol & Humphreys, 2002). Contar con las herramientas adecuadas para precisar las condiciones de confort en un edificio es imprescindible para el diseño eficiente de instalaciones y crear así un edificio sostenible.

2.3.2. Procesos de transferencia de calor en edificios

Antes de introducir los mecanismos y fórmulas básicas de transferencia de calor en los edificios, es preciso realizar una breve introducción de los conceptos de temperatura y calor.

La temperatura de un sistema es una propiedad termodinámica cuantificable. Es una medida, utilizada por la física y la química, que expresa la energía térmica o el grado de calor de un cuerpo o del ambiente. Al ser una propiedad intensiva, resulta independiente de la cantidad de materia en el sistema. El calor es la forma de la energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura.

Cuando dos sistemas con temperaturas diferentes entran en contacto, se produce una transferencia de energía debido a que las partículas con mayor energía cinética transfieren, mediante choques, parte de su energía a las restantes partículas. Pasado un tiempo, la energía cinética media de todo el conjunto es la misma y ambos sistemas se encontrarán a la misma temperatura.

Se denomina transferencia de calor al proceso mediante el cual tiene lugar este transporte de energía. La termodinámica estudia la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro.

Los procesos de transferencia de calor comprenden intercambio y/o conversión de energía y obedecen a las dos primeras leyes de la termodinámica. La primera es la ley de conservación de la energía generalizada para incluir el calor como una forma de transferencia de energía. La segunda ley de la termodinámica establece restricciones y direcciones a los procesos de intercambio energético.

La aproximación ingenieril de la termodinámica trata de desvelar la tasa de transferencia de calor para una diferencia de temperatura especificada (Kreith, Manglik, & Bohn, 2012).

En el caso de los edificios, estudia la diferencia entre la temperatura exterior (según las condiciones climáticas, de radiación solar y viento) y la temperatura que se desea mantener en el interior (también llamada temperatura de confort)

Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio sólido, el calor fluye de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. Son tres los mecanismos de transferencia de calor: conducción, radiación y convección. En un sistema complejo como es un edificio, se dan los tres mecanismos de forma simultánea.

Conducción

Es un fenómeno molecular que se produce mediante el contacto directo entre dos cuerpos sólidos a diferente temperatura, fluyendo el calor de la región de mayor temperatura a la de menor.

La ecuación que define la conductividad térmica se denomina ley de la conducción de Fourier en honor al científico que la propuso (ecuación 2.16). La capacidad de conducir calor de un sólido se representa por su conductividad térmica k , expresada en $W/m\cdot K$. La conductividad térmica es una característica de cada material y determina su capacidad de adaptación para un uso determinado.

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

En esta ecuación, q_k es el caudal de calor expresado en W , y dT/dx el gradiente de temperatura y A es el área normal a la dirección del flujo de calor en m^2 . El signo negativo señala que el calor fluye del sistema de mayor temperatura al de menor.

En el caso de conducción de calor unidimensional en régimen permanente a través de una pared plana, el gradiente de temperatura y el flujo de calor son constantes en el tiempo. Suponiendo que la conductividad térmica del material, que forma la pared, es independiente de la temperatura (T), se obtiene la siguiente fórmula de conducción de calor a través de la pared (ecuación 2.17):

$$q_k = \frac{Ak}{L} (T_{caliente} - T_{fría}) = \frac{\Delta T}{L/Ak} \quad (2.17)$$

siendo L el espesor de la pared. El cociente L/k es la resistencia térmica unitaria R_k que la pared opone al flujo de calor por conducción (ecuación 2.18), expresada en $m^2/k\cdot W$:

$$R_k = \frac{L}{k} \quad (2.18)$$

Para una pared formada por capas de distintos materiales, con diferentes valores de conductividad térmica, se calcula la resistencia total R_T del sistema como la suma de las resistencias de cada capa de material:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (2.19)$$

siendo R_n la resistencia térmica del material n . En la figura 2.30 se establece una analogía entre un sistema de flujo de calor por conducción y un circuito térmico y eléctrico:

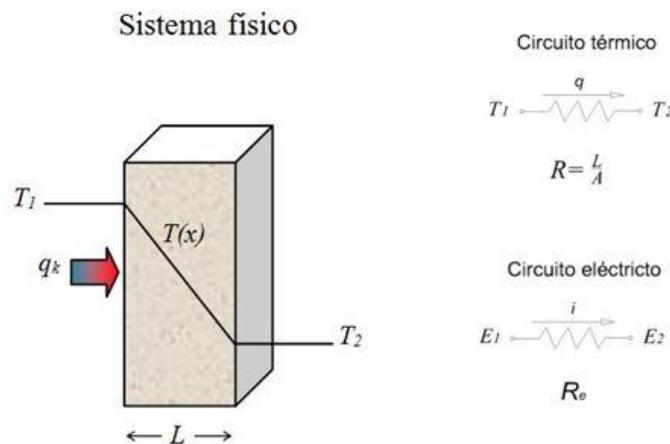


Figura 2.30. Distribución de temperatura a través de una pared plana en régimen permanente y la analogía con un circuito térmico y eléctrico. Fuente: (Kreith et al., 2012)

En el caso de una pared formada por diversas capas, y en condiciones estables, el gradiente de temperatura a través de la pared, es constante pero difiere de una capa a otra según la conductividad de cada material. En condiciones inestables, el perfil de la temperatura a lo largo de una capa es curvo, pero cuando se considera la resistencia del sistema en su conjunto, el gradiente permanece continuo (Davies, 2004).

En el diseño de edificios y para sistemas formados por distintas capas de materiales, se denomina transmitancia térmica U , expresada en W/m^2K , como el flujo de calor, en régimen estacionario, para un área y diferencia de temperaturas unitarias de los medios situados a cada lado del elemento que se considera.

La transmitancia térmica se define según la ecuación:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (2.20)$$

donde R_T es la resistencia térmica total de la pared o el elemento, calculado según la ecuación 2.19.

Convección

Es la forma de transmisión entre un sólido y un fluido o entre un líquido y un gas, y que se produce por el movimiento del fluido, pudiendo ser este movimiento natural o forzado (Sigalés, 2003). Fue Newton quien formuló la expresión para obtener la velocidad de enfriamiento o intercambio de calor mediante convección:

$$q = hA(T_{superf.} - T_{fluido}) \quad (2.21)$$

donde q es el caudal de calor transferido en W , h es el coeficiente superficial de transmisión de calor del sólido en W/m^2K , A es el área normal a la dirección del flujo de calor en m^2 y $T_{superf.} - T_{fluido}$ es el gradiente de temperatura.

Radiación

La transferencia de calor por radiación no necesita un medio para propagarse y en el vacío se efectúa en línea recta. El intercambio de energía por radiación puede producirse entre dos superficies, entre una superficie y un medio participante o puede implicar una interacción entre diversas superficies y gases participantes. En

nuestro ámbito de estudio, es de interés la radiación térmica, que es la emitida por los cuerpos debido a su temperatura. El flujo de potencia radiante emitida por una superficie se expresa mediante la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$q = A\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.22)$$

considerando q como la potencia radiante global en W, A el área de la superficie de emisión en m^2 , $T_1^4 - T_2^4$ el gradiente de temperatura y siendo σ una constante de proporcionalidad denominada constante de Stefan-Boltzmann con el valor de $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

La anterior ecuación se aplica sólo a los denominados cuerpos negros, que son aquellos que sólo absorben y emiten calor sin reflejarlo, y cuya superficie se comporta igual sea cual sea la frecuencia y la dirección de la radiación incidente o emergente.

Para otros tipos de superficies que no irradian tanta energía, los denominados “cuerpos grises”, se introduce en la ecuación el factor de emisividad ε que relaciona la radiación de la superficie “gris” con la de una superficie negra ideal y cuyo valor varía entre 0 y 1. La emisividad o emitancia de una superficie depende de las propiedades de sus materiales. Las propiedades de radiación de una superficie son funciones de la longitud de onda, la temperatura y la dirección. De esta manera, la transferencia de calor por radiación neta entre dos cuerpos “grises”, se determina por la siguiente ecuación (ecuación 2.23);

$$q = A\mathcal{F}_{1-2}\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.23)$$

Donde \mathcal{F}_{1-2} es un módulo adimensional denominado factor de forma de la radiación o factor de vista en el que se incorporan las emitancias y geometrías relativas de los cuerpos reales.

Transferencia de calor unidimensional

Los problemas de transferencia de calor pueden ser unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales. La transferencia de calor a través de la pared de un edificio o un vidrio de una ventana, puede considerarse como unidimensional, ya que ocurre predominantemente en una dirección –la normal a la superficie considerada– y el calor transferido en el resto de direcciones es despreciable (Çengel, 2007).

Por lo general, los materiales empleados en la construcción tienen una naturaleza isotrópica, es decir, presentan las mismas propiedades en todas las direcciones. La absorción de energía solar por un cuerpo opaco ocurre dentro de pocas micras de la superficie y la energía que penetra en el medio se puede tratar como un flujo específico de calor sobre esa superficie.

La figura 2.31 muestra el esquema de transmisión de calor en un muro exterior.

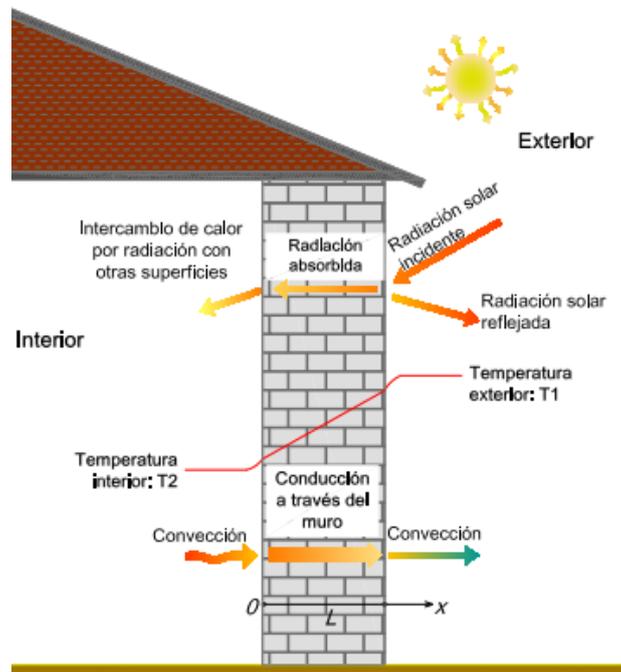


Figura 2.31. Esquema de transmisión de calor en un muro exterior de espesor = L .

Fuente: elaboración propia.

Conducción de calor en estado estacionario en paredes planas

Una pared sometida a un gradiente de temperatura presenta una naturaleza isotérmica, es decir, la temperatura en puntos diversos de la superficie interior es prácticamente la misma. Lo mismo sucede en varios puntos de la cara exterior de la pared, produciéndose el mayor flujo de calor en la dirección normal a las superficies exterior e interior, ya sea de adentro hacia afuera o viceversa. El espesor pequeño de la pared hace que el gradiente de temperatura en esa dirección sea grande.

El balance de calor en la pared puede expresarse como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{transferencia de calor} \\ \text{hacia la pared} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Razón de} \\ \text{transferencia de calor} \\ \text{hacia afuera de la pared} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Razón del cambio} \\ \text{de la energía} \\ \text{de la pared} \end{array} \right)$$

La expresión matemática correspondiente a este balance de calor se define:

$$\dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{sal} = \frac{dE_{pared}}{dt} \quad (2.24)$$

siendo \dot{Q}_{ent} la razón de la transferencia de calor entrante en la pared, en W; \dot{Q}_{sal} el correspondiente para la transferencia de calor hacia fuera de la pared; $\frac{dE_{pared}}{dt}$ es el cambio de energía en la pared para un periodo de tiempo. En una situación estacionaria, $\frac{dE_{pared}}{dt} = 0$, siendo la razón de transferencia de calor a través de la pared. La razón de la conducción de calor a través de una pared plana es proporcional a la conductividad térmica promedio, al área de la pared y a la diferencia de temperatura, pero inversamente proporcional al espesor de la pared (Çengel, 2007), y se define según la ecuación (ecuación 2.25):

$$\dot{Q}_{cond,pared} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.25)$$

donde $\dot{Q}_{cond,pared}$ es la razón de transferencia de calor por conducción en W; k el coeficiente de conductividad térmica en W/mK; A es el área de la pared en m²; T_1 y T_2 las temperaturas a ambos lados de la pared; L el espesor de la pared en m. Siendo el área de la pared y la razón de transferencia constantes, la división $\frac{T_1-T_2}{L}$ es también constante, por lo que la temperatura a través de la pared varía linealmente con x , pudiéndose determinar la temperatura en cualquier ubicación del espesor de la pared.

Se denomina resistencia térmica de una pared a conducción, en K/W, a la relación:

$$R_{pared} = \frac{L}{kA} \quad (2.26)$$

Para expresar la resistencia térmica de una pared a convección, considerando que h_{conv} es el coeficiente de transferencia de calor por convección:

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}A} \quad (2.27)$$

Quedando la ecuación de transferencia de calor por convección:

$$\dot{Q}_{conv,pared} = \frac{T_1-T_2}{R_{conv}} \quad (2.28)$$

En el caso de una pared rodeada por un gas, la razón de transferencia de calor por radiación entre una superficie de emisividad ε y área A_s , estando la pared a temperatura T_s y las superficies circundantes a temperatura promedio T_{alred} , se expresa como:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_{alred}^4) = h_{rad}A_s(T_s - T_{alred}) = \frac{T_s-T_{alred}}{R_{rad}} \quad (2.29)$$

donde h_{rad} es el coeficiente de transferencia de calor por radiación, expresado en W/m^2K . Puede definirse la resistencia térmica en K/W de una superficie a la radiación como:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}A_s} \quad (2.30)$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación, h_{rad} , depende en gran medida de la temperatura. En cambio, el coeficiente de transferencia de calor por convección, h_{conv} , no depende de la temperatura. Una pared está sometida a procesos de convección y radiación simultáneamente. Puede calcularse un coeficiente de transferencia de calor combinado, $h_{combinado}$, como la suma de los coeficientes de transferencia de calor por convección y por radiación.

En el caso de una pared expuesta a convección a ambos lados, el balance de energía se puede expresar como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{convección de calor} \\ \text{hacia la pared} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{conducción de calor} \\ \text{a través de la pared} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{convección de calor} \\ \text{desde la pared} \end{array} \right)$$

Siguiendo las expresiones matemáticas anteriormente detalladas, puede obtenerse la resistencia térmica total de la pared, expresada como la suma de las resistencias en serie a convección a cada lado de la pared y la resistencia a conducción de la propia pared (ecuación 2.31):

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{pared} + R_{conv,2} \quad (2.31)$$

Empleando las fórmulas anteriores puede calcularse el ratio de transferencia de calor estacionario sin ser necesario conocer las temperaturas superficiales a ambos lados de la pared.

Sin embargo, comúnmente, las paredes están formadas por más de un material con distintas características térmicas y de transmisión. En este caso, la resistencia total, será la suma de las resistencias de los distintos materiales:

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{pared1} + R_{pared2} + R_{conv,2} \quad (2.32)$$

El cálculo de la razón de transferencia de calor estacionaria se expresa como:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (2.33)$$

En la figura 2.32 puede observarse el descenso de la temperatura a lo largo del espesor de una pared formada por dos materiales y sujeta a convección a ambos lados y su equivalente como resistencias térmicas.

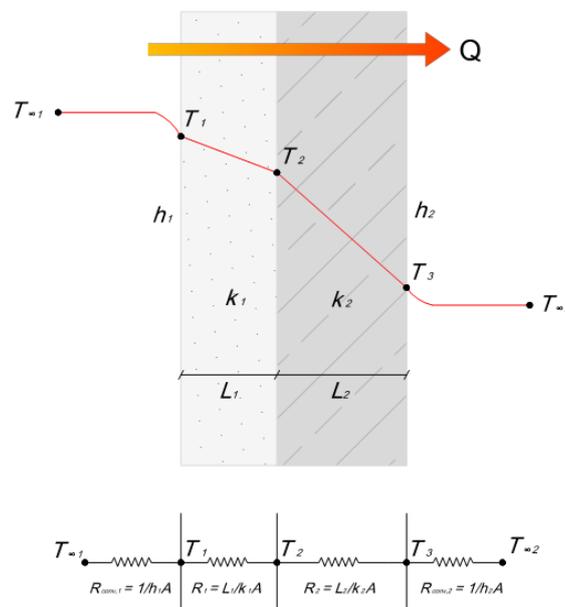


Figura 2.32. Esquema de transferencia de calor a través de una pared plana de dos materiales y el equivalente en resistencias térmicas. Fuente: elaboración propia a partir de (Çengel, 2007)

El concepto de resistencia térmica es utilizado con amplitud en la práctica para resolver este tipo de problemas, si bien su aplicación está delimitada a procesos estacionarios, sin generación de calor. Una vez calculado \dot{Q} , es posible conocer la temperatura superficial T_j en cualquier punto a partir de la temperatura conocida en otro lugar T_i :

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_j}{R_{total,i-j}} \quad (2.34)$$

siendo $R_{total,i-j}$ es la resistencia térmica entre los lugares i y j . La caída térmica de temperatura a través de una capa que forma parte de una pared, puede conocerse resolviendo la ecuación:

$$\Delta T = \dot{Q} R_{capa} \quad (2.35)$$

La difusividad térmica (α) de un material, expresada en m^2/s , representa la velocidad con que se propaga el calor a través del mismo. Es función de la densidad del material (ρ) y del calor específico del mismo (c):

$$\alpha = k / \rho \cdot c \quad (2.36)$$

El producto $\rho \cdot c$ se conoce como la capacidad calorífica de un material y representa la capacidad de almacenamiento de calor de un material por unidad de volumen, en $J/m^3 \cdot ^\circ C$. Para conocer cómo esta propiedad de una pared puede jugar a favor del aprovechamiento energético, se introduce el concepto de masa térmica del edificio.

2.3.3. Conceptos de masa térmica e inercia del edificio

La masa térmica de un material es la capacidad de absorber calor (por convección y radiación), almacenarlo y liberarlo más tarde, y se expresa en $J/^{\circ}C$ o $J/^{\circ}K$. Términos similares son la capacitancia térmica o la capacidad de calor. Esta capacidad guarda relación con el peso específico de los materiales, ya que a mayor peso específico, mayor capacidad para almacenar energía calórica y por tanto mayor masa térmica.

La masa térmica está contenida en las fachadas, particiones, techos y suelos del edificio construidos con materiales de alta capacidad térmica, como hormigón, ladrillos y azulejos (Balaras, 1996). Un edificio con una masa térmica elevada sufre de forma más atenuada las fluctuaciones climáticas externas que un edificio con una masa térmica ligera.

Son diversos los factores físicos que intervienen en el concepto de masa térmica del edificio, como son: las ganancias internas de calor, la radiación solar recibida a través de las ventanas, el clima, el nivel de aislamiento térmico y el caudal de ventilación e infiltración del mismo del edificio. También afecta el tipo de edificio y el uso que se le está dando (Kalema, Johannesson, Pylsy, & Hagengran, 2008).

Desde el punto de vista de diseño del edificio, el aprovechamiento de la masa térmica del edificio permite una reducción considerable de la demanda energética para calefacción y refrigeración. Durante el invierno, la envolvente almacena calor como consecuencia de la radiación solar diurna y los sistemas de calefacción. Dependiendo de la inercia térmica el edificio liberará durante la noche este calor, que es cuando más se necesita. El aprovechamiento de este efecto favorece que la temperatura del interior permanezca durante más horas dentro del rango de confort reduciéndose la demanda pico (Al-Sanea, Zedan, & Al-Hussain, 2012).

Cuando se habla de masa térmica en edificios suelen referenciarse como: de peso pesado, peso medio y peso ligero. En el caso de un edificio, la masa térmica está relacionada con la inercia térmica. La inercia térmica de un edificio es la capacidad que tienen los elementos constructivos que lo componen de conservar la energía térmica recibida e ir liberándola progresivamente. Una masa térmica alta, ayuda a reducir las fluctuaciones en la temperatura interna del edificio, dotándolo de mayor estabilidad térmica. La inercia térmica interna del edificio C_m , expresada en

J/K, puede calcularse siguiendo el método simplificado de la norma EN 13786 “Prestaciones térmicas de los productos y componentes para edificación. Características térmicas dinámicas, anexo A. Métodos de cálculo”:

$$C_m = \sum A_j k_j \quad (2.37)$$

, donde k_j la capacidad térmica por área del elemento j expresado en J/(m²K), y A_j el área del elemento en m².

$$k_j = \sum \rho_i c_i d_i \quad (2.38)$$

La capacidad de cada elemento o material i es producto de la densidad del material ρ_i expresada en kg/m³, el calor específico del material c_i en J/(kg·K) y el espesor de la capa del material d_i en metros.

El interés por las ventajas del efecto de la masa térmica de los edificios ha cambiado con el paso del tiempo (Kalema et al., 2008) Tradicionalmente, el objetivo del estudio de la masa térmica de edificios ha sido conseguir un nivel de aislamiento óptimo que permitiese reducir la demanda de calefacción, especialmente en climas fríos.

En los últimos años se ha producido un incremento del equipamiento eléctrico presente en los hogares y edificios, lo que provoca un aumento del calor generado en el interior. Así mismo, los novedosos sistemas de acristalamiento, de gran rendimiento térmico, favorecen el sobrecalentamiento en las áreas adyacentes a los huecos acristalados, especialmente en huecos orientados al sur en climas templados y cálidos. Ambas situaciones provocan un aumento de la temperatura interna, sobre todo en estaciones cálidas, con la consecuente necesidad de aumentar el caudal de ventilación o la demanda de refrigeración. Este hecho está llevando a los investigadores a modificar la concepción de la masa térmica y a considerarlo como un elemento de cálculo a incluir en el balance energético total del edificio.

Los materiales de alta capacidad térmica tienen la cualidad de absorber la energía calórica y distribuirla gradualmente en su estructura interna. Los procesos de transmisión de calor por conducción a través de estos materiales propician un efecto de almacenamiento de calor. Se denomina retraso térmico o desfase al tiempo que tarda en pasar el calor a través del material. El amortiguamiento térmico cuantifica la reducción de la temperatura cíclica de una superficie respecto a la temperatura cíclica de la superficie contraria. Como consecuencia de estos efectos es posible alcanzar una estabilización de la temperatura interior del edificio respecto de la temperatura exterior.

Por lo general, un edificio de masa térmica pesada sufre menos las variaciones de temperatura del aire interior y el desfase de tiempo que tarda el calor en atravesar la envolvente es mayor. Al-Sanea et al. formularon los conceptos de: “ahorro potencial energético de la masa térmica” y “masa térmica crítica” (Al-Sanea et al., 2012). El potencial de ahorro energético de masa térmica representa el ahorro de energía alcanzable mediante un aprovechamiento de la carga de transmisión que se produce en la masa térmica del edificio, excluyendo los ahorros debido al aislamiento térmico. La masa térmica crítica es aquella en la que se obtiene el máximo potencial de ahorro energético y a partir de la cual un aumento de la masa térmica no conlleva una mejora en el comportamiento energético del edificio, y sí un mayor consumo de materiales.

La optimización de la masa térmica depende de las propiedades de los materiales, la orientación del edificio, el tipo y la posición del aislamiento térmico, la superficie de los huecos acristalados, las condiciones climáticas, el régimen de funcionamiento de los sistemas de climatización, el régimen de ventilación y el nivel de ocupación (Al-Sanea et al., 2012) (Balaras, 1996). Por lo general, la masa térmica de un edificio es más efectiva si permite estar sombreada durante el verano y soleada durante el invierno, especialmente los vidrios (Talyor & Miner, 2014).

El control de la inercia térmica de un edificio y la velocidad de carga y descarga aporta importantes ahorros energéticos, especialmente en climas en los que haya una gran diferencia de temperatura entre el día y la noche, así como en ciudades en las que el efecto isla de calor es considerable (Talyor & Miner, 2014).

En el caso de edificios en climas fríos, el control de la inercia térmica del edificio permite obtener hasta un ahorro del 15% en calefacción y del 35% en refrigeración (Kalema et al., 2008). Al-Sanea et al., consiguieron un ahorro máximo anual de transmisión de cargas del 17% para refrigeración y del 35% para calefacción para un clima desértico (Al-Sanea et al., 2012). En el caso de este clima, demostraron que la posición exterior del aislamiento de fachada proporciona un mejor comportamiento térmico que colocándolo en una posición interior.

Controlar la inercia térmica del edificio tiene efectos positivos no sólo en el consumo energético, sino en el confort de los usuarios. Tal y como se ha citado, los edificios con alta masa térmica son menos susceptibles a las variaciones de temperatura exteriores, lo que se traduce en un ambiente térmico interior global más estable y en un mayor nivel de confort durante más tiempo, especialmente en las estaciones intermedias como primavera y otoño (Balaras, 1996).

Las propiedades termofísicas de una pared compleja como: la conductividad térmica, la densidad y calor específico, dependen del tiempo debido a las fluctuaciones de humedad y temperatura en el material. También dependen de la posición de los materiales y sus propiedades cuando no son anisotrópicos. Incluir la dependencia temporal de estas propiedades precisa de herramientas de análisis dinámico en el que se realice el cálculo en función de pequeñas variaciones temporales.

2.3.4. Métodos de cálculo reconocidos por la Directiva Europea de Eficiencia Energética en Edificios

La calificación energética de un edificio se expresa a través de diversos indicadores que dan una idea general sobre su comportamiento energético. El indicador energético principal es el valor de las emisiones anuales de CO₂ por superficie útil del edificio. En el apartado 2.1 de este documento de Tesis, se explicaba cómo mediante unos coeficientes de paso, y según la estructura del sector energético de un país, pueden obtenerse las emisiones de dióxido de carbono asociadas al consumo energético. Para obtener este nivel de emisiones, es necesario por tanto

conocer la demanda energética de un edificio, ya sea en fase de proyecto o en fase de uso, en unas condiciones normales de funcionamiento y ocupación.

El procedimiento o método de cálculo de la demanda energética de un edificio y los criterios para evaluar la eficiencia energética deben estar reglados y justificados por normas aprobadas por expertos. La existencia de un marco normativo para el cálculo permite además establecer unos estándares para comparar la eficiencia energética de edificios.

La Directiva Europea de Eficiencia Energética en Edificios (EPBD por sus siglas en inglés) (Parlamento Europeo y el Consejo, 2012) es el principal mecanismo legal de la Unión Europea para conseguir los objetivos de reducción de emisiones de gases efecto invernadero y del consumo energético en los edificios, objetivos prioritarios en la Unión. Propone las directrices para los estados miembros respecto a eficiencia energética en edificios.

Los tres principales objetivos de esta directiva son: a) establecer un marco común de medidas para el fomento de la eficiencia energética a fin de asegurar la consecución del objetivo principal de eficiencia energética de un 20% de ahorro para 2020; b) establecer normas destinadas a eliminar barreras en el mercado de la energía y a superar deficiencias que obstaculizan la eficiencia en el abastecimiento y el consumo de energía; c) disponer a los países miembros, el establecimiento de objetivos nacionales orientativos de eficiencia energética para 2020. Como consecuencia de la implantación de esta Directiva, a partir del 31 de diciembre de 2020, todos los edificios nuevos tendrán un consumo de energía casi nulo.

Para conseguir los objetivos de eficiencia energética recogidos en la citada Directiva, se ha desarrollado todo un marco normativo, a nivel europeo como estatal, que detalla las metodologías y procedimientos a seguir. Los estados miembros deben implantar un sistema de certificación energética de los edificios, estando obligados a adoptar una metodología de cálculo de la eficiencia energética de edificios y a fijar unos requisitos mínimos para alcanzar niveles óptimos en términos de costes.

En España, el Certificado de Eficiencia Energética es obligatorio desde junio del año 2013 para aquellos edificios de nueva construcción y las viviendas que estén

en régimen de venta o alquiler. El Código Técnico de la Edificación recoge los requisitos mínimos de eficiencia energética que deben cumplirse y la metodología a seguir en el Documento Básico Ahorro de Energía DB-HE (Ministerio de Fomento, 2009a)

La norma EN ISO/DIS 13790 "*Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*" (International Organization for Standardization (ISO), 2008) es el principal documento normativo que regula los procedimientos de cálculo de la demanda energética en edificios, englobando a su vez a otras normas. Este documento recoge tres métodos de cálculo: un método "cuasi-estacionario" mensual, un método horario simple y por último la opción de emplear un programa de simulación dinámica validado.

En los métodos estáticos, los efectos dinámicos se tienen en cuenta mediante unos coeficientes de correlación. Para el cálculo de la calefacción se estima un factor de utilización de las ganancias internas y solares para reducir la energía necesaria para calefacción. En el caso de la demanda de refrigeración se estima un coeficiente inverso al anterior, un factor de pérdidas, o bien un factor de ganancias. En los modelos dinámicos se modela cada flujo instantáneo de aire que tenga efecto sobre la temperatura interna y la inercia térmica del edificio.

Los procedimientos incluidos en la citada norma se han convertido en un referente internacional para el cálculo de la demanda energética para calefacción y refrigeración de edificios residenciales y no residenciales, y son numerosos los estados miembros de la UE que lo han adoptado como método oficial, especialmente las dos primeras metodologías simplificadas (Kalema et al., 2008) (Wauman, Breesch, & Saelens, 2013)

La norma ISO 13790 (International Organization for Standardization (ISO), 2008) acepta el uso de programas de simulación energética detallada como una alternativa a las metodologías de cálculo simplificadas. Aunque no se sugiere de forma directa ningún programa de simulación, sí se especifica que deben superar una serie de test de validación (Kokogiannakis, 2008). En el texto de la norma se establecen reglas comunes para las condiciones de los datos de entrada y los límites de frontera, independientemente del método de cálculo elegido, para asegurar una consistencia entre los métodos de cálculo posibles. Según

Kokogiannakis, incluir la opción de simulación detallada de edificios como una metodología válida, garantiza la igualdad de condiciones entre los distintos métodos desarrollados (Kokogiannakis, 2008).

Desde que se generalizaron estos procedimientos de cálculo, son muchos los autores que han realizado estudios para valorar su consistencia. Georgios et al. compararon los resultados de demanda de calefacción y refrigeración obtenidos con los métodos simplificados y con dos programas de simulación detallada (Georgios, Joe, Paul, Street, & Glasgow, 2007). Concluyeron que, según el caso estudiado, los resultados de los tres métodos pueden ser concordantes o pueden presentar diferencias significativas. Observaron que el método horario simplificado de la norma produce unos resultados más próximos a los obtenidos con los programas de simulación en ciertos supuestos: cuando se trata de cálculo de demanda de calefacción en sistemas de calefacción continua para edificios de alta masa térmica, edificios con pocas ganancias internas y edificios con altos índices de ventilación.

Por su parte, Atmaca et al. estudiaron las diferencias en el cálculo de la masa térmica de un edificio residencial siguiendo el método horario de la norma y un método de simulación detallada (en este caso emplearon el software EnergyPlus™) (Atmaca, Kalaycioglu, & Yilmaz, 2013). Concluyeron que en el caso de sistemas constructivos no complejos, el método simplificado de la masa según la norma ISO 13790 ofrece resultados paralelos a los obtenidos mediante el software de simulación energética, y resaltaron que los límites de la descripción de los edificios del método simplificado interfieren en la comparación del comportamiento de la masa térmica del edificio.

Corrado y Fabrizio compararon los parámetros dinámicos del método mensual de la norma con respecto a los resultados obtenidos con un modelo de simulación detallada (Corrado & Fabrizio, 2007). Emplearon también el software EnergyPlus™ para realizar su estudio. Obtuvieron que la no-linealidad de los procesos de transferencia de calor repercute en gran medida en la veracidad de los resultados del método simplificado. También concluyeron que los parámetros dinámicos son muy sensibles a ciertas propiedades de los edificios.

Modelos dinámicos de simulación

Un edificio puede considerarse como un sistema termodinámico en el que se puede evaluar el balance de energía. Las ganancias de calor que se dan en un edificio pueden ser internas o externas:

- Nivel de ocupación
- Irradiación del sistema de iluminación
- Funcionamiento de equipos en el interior
- Radiación solar recibida a través de los elementos de la envolvente (fachadas, huecos y cubiertas)

Por otra parte, en el edificio se producen pérdidas térmicas como consecuencia de la ventilación y la infiltración del aire exterior. De forma esquemática, la figura 2.33 recoge los procesos de transferencia de calor implicados en la simulación energética de edificios.

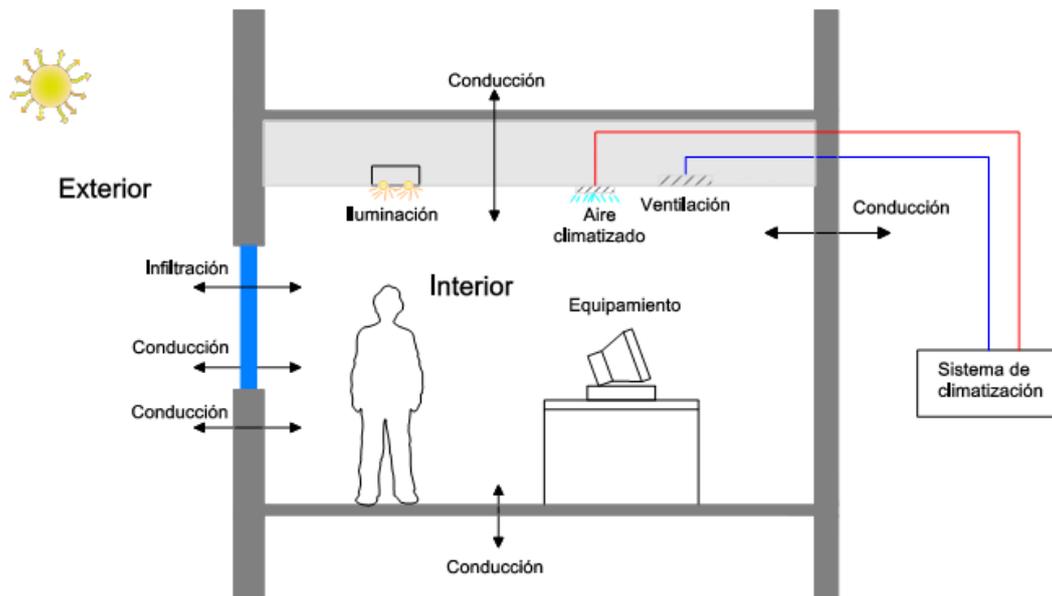


Figura 2.33. Procesos de transferencia de calor implicados en la simulación energética de edificios.

Fuente: elaboración propia.

La necesidad de incluir todas las interacciones dinámicas que se producen en el fenómeno de transferencia de calor en un edificio hace que sea preciso el uso de métodos o modelos dinámicos, modelos que por otra parte son matemáticamente complejos.

Según el IDAE, *“una simulación consiste en predecir cronológicamente el comportamiento de un objeto físico con un ordenador”* (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2008). En el caso de simulación energética de un edificio consiste en estimar, con cierta frecuencia temporal, la demanda energética como consecuencia de la actividad que se desarrolla en él. Esta demanda energética incluirá el uso del equipamiento estándar según el tipo de edificio. En el caso de edificios residenciales, la demanda energética calculada mediante modelos de cálculo, comprende la demanda de: calefacción, refrigeración, iluminación, agua caliente sanitaria y equipamientos habituales.

Los motivos para realizar una simulación pueden ser variados, principalmente conocer la demanda de energía, conocer la distribución de esta demanda y/o el peso de la demanda total que corresponde a cada uno de las necesidades básicas del edificio, estimar el impacto ambiental (en nivel de emisiones de carbono) de la demanda energética del edificio e incluso evaluar la efectividad de futuras estrategias de control del consumo.

El avance de las tecnologías computacionales permite la creación de módulos informáticos cada vez más precisos en el cálculo de la demanda energética en edificios. Los software de simulación energética se han convertido así en herramientas útiles para estudiar la eficiencia energética de edificios y el confort térmico (Maile, Fischer, & Bazjanac, 2007). Reducen el tiempo de cálculo con respecto a los métodos manuales simplificados y permiten obtener resultados muy detallados y fácilmente intercambiables con otros programas para el tratamiento de los datos. El análisis de estos resultados facilita al usuario conocer el funcionamiento operacional de un edificio determinado y compararlo con otros. Tras el reconocimiento de estos métodos como herramientas válidas, según la normativa, se ha extendido su uso para realizar la calificación energética de edificios.

Tal y como se ha citado anteriormente, es la demanda de calefacción la principal responsable del consumo energético en los edificios. La simulación térmica de un edificio trata de estimar el comportamiento térmico de las diferentes zonas que lo componen. Los procedimientos de simulación estacionarios no tienen en cuenta el efecto de la inercia térmica de los edificios ni las propiedades dinámicas de los materiales y sistemas constructivos. Por ello, es necesaria una metodología dinámica para conocer con rigor la demanda energética del edificio.

Desde un punto de vista matemático, para representar los flujos de energía que se dan en un edificio, deben resolverse varios tipos de ecuaciones complejas e interrelacionadas entre sí. Considerando un edificio como un sistema caracterizado por n parámetros y asumiendo que pueden darse p estados diferentes, el número de combinaciones sería p^n . Son numerosos los parámetros que caracterizan un edificio (capacidad térmica, ventilación, nivel de ocupación, tipo de vidrio, superficie expuesta a radiación solar...). Este gran número de parámetros da lugar a un número aún mayor de combinaciones, haciendo de los sistemas energéticos unos sistemas altamente complejos (Clarke, 2001). Para poder simular los fenómenos de transmisión de calor que se producen, debe darse una formulación matemática a estos problemas físicos. Un programa de simulación construye un modelo matemático para representar, con la máxima fiabilidad posible, los flujos de energía y sus interacciones (Clarke, 2001). La simulación que realizan estas herramientas se basa en los principios de la termodinámica y las ecuaciones que la definen junto con los supuestos asumidos por el usuario (Maile et al., 2007).

La simulación dinámica de edificios calcula, a partir de los datos de entrada definidos por el usuario y las bases de datos pre-establecidas en el simulador, la demanda energética del edificio y los usos en los que se emplea, en términos anuales generalmente, como resultado de las características del edificio y la actividad desarrollada por sus ocupantes (Communities and Local Government, 2009). Su estructura permite considerar las interacciones térmicas entre cada zona de edificios multizona.

El cálculo de la carga térmica en los edificios, a partir de modelos dinámicos, es ampliamente utilizado por los softwares de simulación y es además el método

recomendado por la Sociedad Americana de los Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*, a partir de ahora ASHRAE) y el Comité Europeo de Estandarización, CEN (*European Committee for Standardization*). El principio en el que se basan es determinar el balance de calor para un volumen de aire del espacio considerado, a una temperatura uniforme y calcular de esta ecuación la carga o la potencia necesaria para cumplir los requerimientos de temperatura interior (Ghiaus, 2013).

Estos modelos complejos están basados en modelos termodinámicos más sencillos que formulan cada flujo de energía unificados para representar el edificio en su conjunto. Este modelo unificado incluye modelos más simples especializados en evaluar los procesos de transferencia de calor, aire, humedad, iluminación y los flujos de energía tal y como ocurren dentro del edificio, sujetos a los factores climáticos e influenciados por la acción de los ocupantes (Clarke, 2001).

Todo proceso de simulación constará de tres partes diferenciadas. En primer lugar, se crea un modelo que representa el objeto a estudiar. Esta información puede introducirse directamente codificada o, la opción más común, puede generarse mediante un programa gráfico o interfaz. En la etapa de simulación se genera un modelo matemático o informático que, a partir de los datos anteriormente introducidos, simula el comportamiento del edificio. La última etapa es la de post-tratamiento o representación de los datos de una forma accesible para el usuario y en un formato almacenable.

Pueden realizarse dos tipos de modelos para representar un objeto. Por un lado, los objetos geométricos, y por otro lado, los objetos físicos que representan magnitudes intensivas que actúan sobre los modelos geométricos. Se crea así un modelo físico-matemático que permite representar los fenómenos físicos que se den en una geometría (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2008).

El modelo matemático que representa el flujo de calor, a través de un muro por ejemplo, evalúa momentos breves hasta llevar el proceso al límite. Sin embargo, un modelo en ordenador trabaja con cantidades discretas. Para evitar largos tiempos de computación, estos modelos adoptan como unidad mínima de volumen la

correspondiente a una habitación, recinto o conjunto de recintos. El modelo matemático calcula las aportaciones de energía y humedad que se producen en cada uno de estos volúmenes o unidades.

A cada una de las unidades mínimas, también llamadas zonas, se le asigna una entidad física que es una masa de aire húmedo y unos límites de frontera compuestos por las superficies geométricas que lo limitan. Después, se le asigna un objeto físico a cada superficie que lo limita, como una densidad de flujo de calor convectivo o una densidad de flujo de aire, lo que aporta entalpía específica a este volumen y permite realizar un balance energético sobre él (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2008). El programa de simulación realiza este balance a lo largo de todas las unidades de volumen definidas por el usuario agregando los resultados individuales para obtener un resultado final.

En resumen, en un modelo físico-matemático que representa un edificio, a cada elemento geométrico definido (tales como un volumen y la superficie que lo delimita) se le asignan objetos físicos (como flujo de calor o de aire), siendo posible obtener cantidades absolutas de una magnitud física (por ejemplo, cantidad de calor que traspasa un muro y accede al interior del volumen). Aunque este es el concepto generalizado para la creación de un modelo físico-matemático de un edificio, cada software de simulación aplica de forma diferente esta metodología.

Las ecuaciones físicas que evalúan cómo los objetos físicos actúan sobre los geométricos se resuelven matemáticamente por diferentes medios (ecuación de Laplace o método de diferencias finitas, por ejemplo). Se tienen en cuenta también si los elementos geométricos analizados tienen capacidad o no de almacenar energía y si ésta es representativa para ser incluida o no en el cálculo. Finalmente se realiza el balance de las densidades de flujo de energía, el denominado balance energético.

Etapas en la simulación energética de edificios

En la actualidad se ha desarrollado un gran número de aplicaciones informáticas de simulación energética de edificios, como son TRNSYS, EnergyPlus™, ESP-r, eQUEST... Aunque el principio de funcionamiento es similar para todos, las

diferencias entre ellos radican en aspectos como el modelo termodinámico empleado, la interfaz de usuario o la capacidad de exportar datos a otras aplicaciones.

La precisión de estos modelos de cálculo depende de tres aspectos: las habilidades del usuario para conseguir describir la realidad en el modelo de cálculo; la fiabilidad de los datos de entrada – dimensiones, propiedades térmicas de los materiales, coeficientes de transferencia de calor, etc...– y el método de cálculo empleado (Kalema et al., 2008).

Aunque se traten de programas muy avanzados, testados por la comunidad científica y con grandes capacidades de cálculo, gran parte del éxito de los resultados obtenidos radica en la habilidad y experiencia del profesional que los emplea, especialmente a la hora de introducir los datos de partida. Cuanta mayor experiencia tenga el “modelador” o usuario mayor fiabilidad puede derivarse de los datos de entrada.

Componentes: interfaz gráfica y motor de cálculo

Generalmente, las herramientas de simulación de edificios se componen de una interfaz y un motor de cálculo. El motor de cálculo contiene los algoritmos termodinámicos y matemáticos necesarios y suele estar compuesto a su vez por otros programas de cálculo para cada una de las necesidades energéticas. Por lo general, estas aplicaciones han sido desarrolladas por instituciones o centros de investigación especialistas en la materia y cuentan con el respaldo de estudios de verificación previos. En la mayoría de ocasiones estos motores de cálculo son de acceso libre y gratuito.

La interfaz es la herramienta de introducción de datos y puede ser una interfaz de entrada directa de datos o una interfaz gráfica. Una interfaz de usuario sencilla y una entrada de datos accesible son aspectos esenciales a la hora de escoger un software de simulación energética. Aun así, es necesario que el usuario conozca los procesos térmicos que se dan en el edificio y las limitaciones del programa de cálculo que está empleando. Al contrario que en el caso de los motores de cálculo,

la interfaz gráfica normalmente es desarrollada por agentes privados y no es gratuita.

La figura 2.34 ilustra el flujo de datos de un motor de simulación en el que, de forma simplificada, los datos de entrada son la geometría del edificio, las condiciones climáticas, las propiedades de los sistemas de climatización, el nivel de cargas internas, así como el número de usuarios y los horarios.

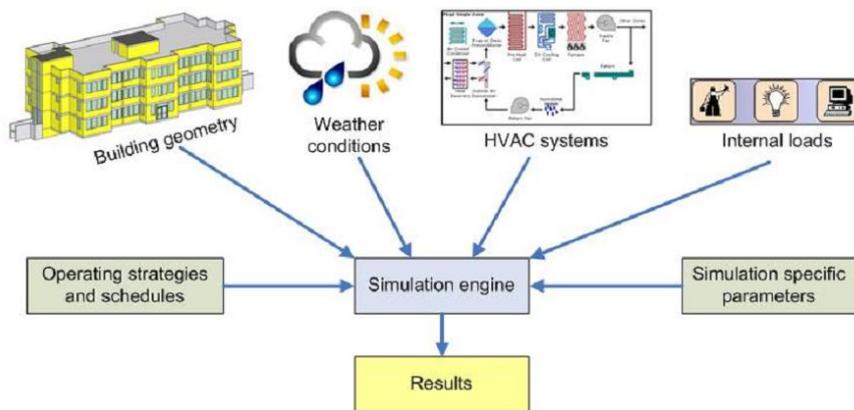


Figura 2.34. Flujo de datos de un motor de simulación.

Fuente: (Maile et al., 2007)

El motor de cálculo emplea los datos de entrada para realizar la simulación y ofrecer los resultados, generalmente en forma de informes, que incluyen también los errores o mensajes de advertencia obtenidos durante la simulación. Es habitual que estos resultados puedan ser leídos por la interfaz gráfica, o bien por otro programa de lectura de datos.

Los datos de entrada requeridos por los modelos dinámicos de simulación pueden agruparse en:

- Emplazamiento, orientación y geometría del edificio
- Condiciones externas (temperatura externa, velocidad del viento, nivel de radiación solar recibido, humedad exterior, entre otros)

- Condiciones térmicas internas que deben mantenerse en cada zona
- Propiedades termofísicas de los materiales de construcción y características térmicas de los cerramientos como la capacidad térmica y el aislamiento
- Aspectos que afectan a la pérdida de calor, como hermeticidad y ventilación
- Ganancias térmicas (debido a la ocupación, al equipamiento o ganancias solares)
- Intensidad y horarios de ocupación y uso del edificio
- Propiedades de los sistemas de calefacción, refrigeración, iluminación, equipamiento y demás servicios ya sean individuales o colectivos

Con los datos de entrada definidos, el software de simulación realiza las siguientes acciones (Communities and Local Government, 2009):

- Calcula la demanda energética para iluminación teniendo en cuenta el área acristalada, las sombras, sistemas de control de iluminación ...
- Establece unas ganancias de calor y un nivel de humedad en cada área, como resultado de las ganancias internas que se producen
- Calcula la transferencia de calor dentro del edificio y con respecto al exterior
- Calcula la demanda energética de los sistemas de climatización y ventilación para mantener las condiciones térmicas interiores requeridas
- Calcula la demanda energética derivada de los equipamientos instalados en el edificio según el uso del mismo
- Proporciona la calificación energética del edificio, o permite exportar el modelo creado a otro software que lo realice

Suposiciones en la construcción de un modelo

Algunos datos de entrada deben estar basados en suposiciones, especialmente en el caso de edificios no existentes. Cuando se modelizan edificios que ya existen, es tarea del usuario realizar una exhaustiva auditoría al edificio con el fin de recopilar la mayor cantidad de información del edificio existente y reducir así el número de suposiciones que ha de hacer durante la definición del edificio y sus sistemas.

El usuario debe conocer de antemano la importancia de las suposiciones que haga y, con conocimiento de las normas y códigos de diseño y en base a su propia experiencia profesional, tener las herramientas y capacidades necesarias para hacer unas suposiciones lo más próximas a la realidad (Maile et al., 2007).

Precisión del modelo

El nivel de precisión del modelo no puede ser determinado antes de comenzar, sino que debe evaluarse a lo largo del proceso.

Antes de decidir con qué precisión se va a trabajar, el usuario debe evaluar los siguientes conceptos:

- Calidad de los datos de entrada que conoce
- Limitaciones del programa escogido
- Confianza en las suposiciones que se vayan a realizar para la simulación
- Nivel de detalle de resultados necesarios para conseguir el fin para el que se está realizando la simulación

El hecho de no emplear el máximo nivel de precisión que permite el programa de cálculo, no significa que los resultados sean de menor calidad. De hecho, un proceso de simulación demasiado detallado pero que incluya supuestos poco fiables, no necesariamente da resultados razonables y correctos en comparación con la realidad (Kalema et al., 2008). El usuario debe considerar cuidadosamente la precisión y la validación (a través de otros estudios) del método elegido.

2.4. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

2.4.1. Situación del sector fotovoltaico

La Organización de las Naciones Unidas mantiene, entre sus objetivos para el año 2030, una reducción del 40% del consumo energético mundial y el acceso a los servicios energéticos de tres billones de personas hasta ahora excluidas (Grupo asesor sobre energía y cambio climático de la Organización de las Naciones Unidas, 2010)

Para conseguir una “transformación del sistema energético mundial”, la expansión del uso de las energías renovables se plantea como principal alternativa, frente al uso de las fuentes tradicionales, facilitando el acceso energético a las comunidades con bajo nivel de ingresos y configurándose como un mecanismo de la lucha contra el cambio climático.

Las fuentes de energía renovables cubren en la actualidad el 16.7% del consumo energético mundial (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2012). La energía eólica supone el 40% de la capacidad total de las fuentes renovables, seguida de la energía solar fotovoltaica que supone el 30% y la hidroeléctrica con el 25%.

La Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables se desarrolló con el objetivo de situar a los países de la UE a la vanguardia en la instalación y consumo de energías renovables y como medida para lograr los objetivos de reducciones de carbono (Parlamento Europeo y el Consejo, 2009).

En esta Directiva se establecen los objetivos de integración de las energías renovables principalmente en el sector del transporte, la edificación y el urbanismo. En concreto, se plasma el compromiso de cubrir el 20% del consumo total de la Comunidad, para el año 2020, con energías renovables. Para el caso de España la contribución debería ser del 20%. Asimismo, se incluye el objetivo de que se cubra al menos el 10% del consumo total del sector del transporte con biocarburantes. Este porcentaje es común para todos los estados miembros.

En España, el actual Plan de Energías Renovables fija los mismos objetivos, que la citada Directiva, como objetivos nacionales (Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2010).

La energía solar fotovoltaica ha sido la fuente energética renovable con mayor tasa de crecimiento anual durante los últimos años (ver figura 2.35). Sin embargo, debido a la crisis económica el sector sufrió un descenso del ritmo de crecimiento desde el año 2012.

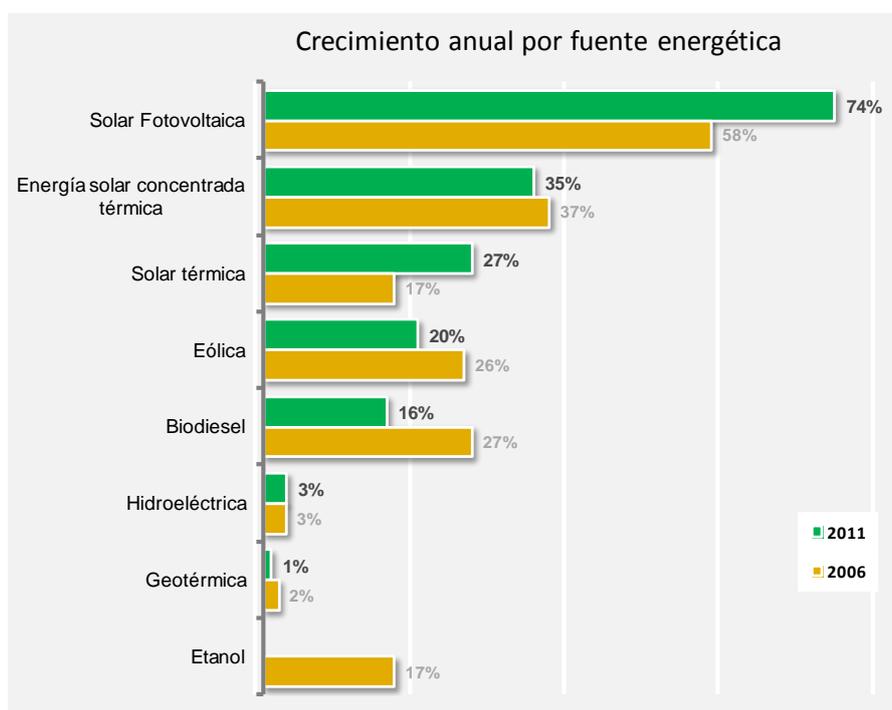


Figura 2.35. Crecimiento anual de la capacidad instalada por fuente de energía renovable. Fuente: (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2012)

En el ranking mundial, el país con mayor potencia fotovoltaica instalada es Alemania con más de 32,000 MW conectados, seguido de Italia y Japón. España se sitúa en un cuarto puesto con un 6.5% de la potencia mundial (figura 2.36). Se espera que sea en los mercados asiáticos donde se produzca un mayor aumento de la demanda en los próximos años.

Ranking de países con mayor capacidad fotovoltaica instalada

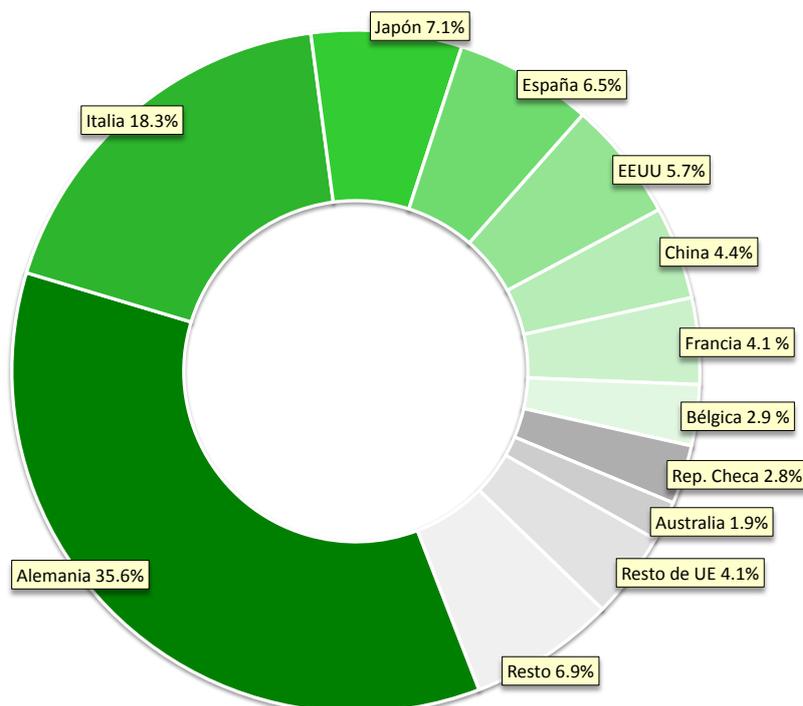


Figura 2.36. Ranking de los países con mayor capacidad de energía solar fotovoltaica instalada.

Fuente: (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2012)

La Unión Europea se ha convertido en líder en cuanto a potencia instalada, con un 75% de la capacidad de generación mundial (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2012). Tres han sido los hechos que han favorecido esta expansión: la reducción de costos de manufacturación, el incremento de la eficiencia de los módulos y el apoyo económico de los estamentos públicos (Bortolini, Gamberi, Graziani, Mora, & Regattieri, 2013).

En la siguiente gráfica se observa la tendencia histórica de la potencia instalada de los países europeos con mayor producción de fotovoltaica. Puede apreciarse cómo la tasa de crecimiento se ha mantenido constante tanto en Alemania como en Italia. Sin embargo, en países como España, la potencia acumulada ha permanecido prácticamente invariable durante los últimos años,

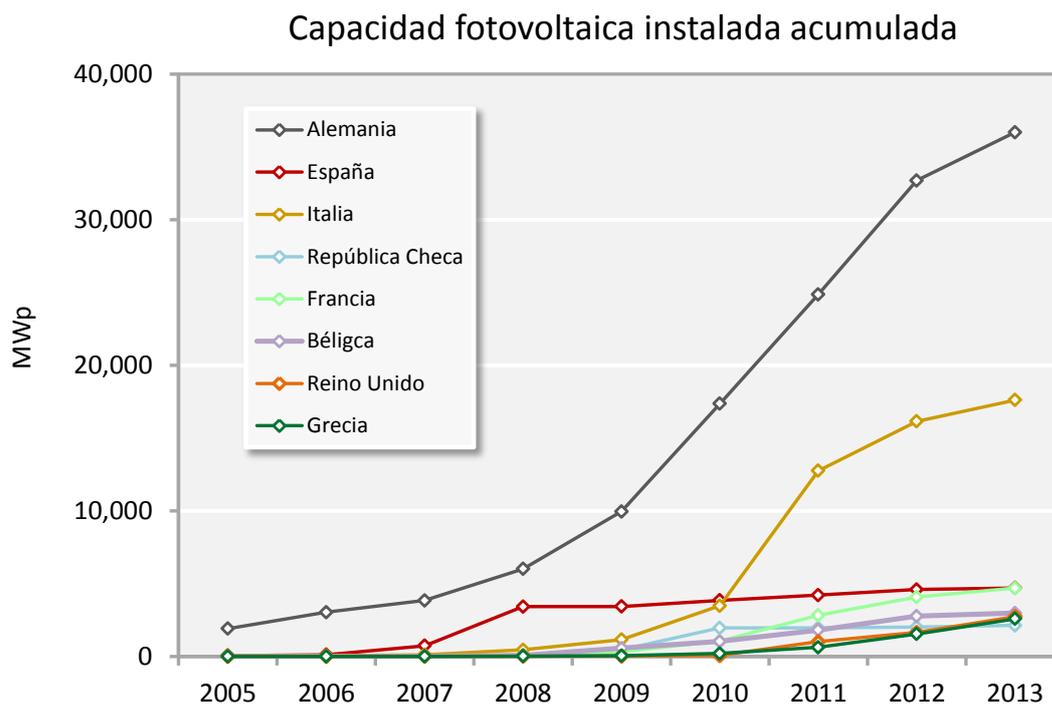


Figura 2.37. Capacidad fotovoltaica acumulada en algunos países europeos para el periodo 2005-2013. Fuente: (EurObserv'ER, 2008)(EurObserv'ER, 2009)(EurObserv'ER, 2010)(EurObserv'ER, 2011)(EurObserv'ER, 2012)(EurObserv'ER, 2013)

En el desarrollo del sector fotovoltaico en la Unión Europea, se pueden apreciar los siguientes fenómenos (Bortolini et al., 2013):

- Un incremento generalizado de la capacidad en todos los países. La potencia instalada en el año 2011 supone veinte veces la potencia que existía en 2005.
- Distribución irregular de la potencia instalada, destacando Alemania como primer productor a nivel mundial
- Tasa de crecimiento no constante en la mayoría de los países, principalmente como resultado de políticas irregulares de incentivos y protección de la energía solar fotovoltaica

La tecnología fotovoltaica fue la primera en cumplir los objetivos de expansión establecidos en el anterior Plan de Energías Renovables. El vigente Plan, prevé que la potencia media en energía solar fotovoltaica instalada en España alcance los 7,250 MW para el año 2040. Según este documento, son dos los objetivos del sector: la penetración masiva en el sistema eléctrico y la reducción de costes de la energía.

Los 8,156 GWh producidos por el sector fotovoltaico en España en el año 2012, supusieron un ahorro de 1,973,752 toneladas de carbono emitidas a la atmósfera (Unión Española Fotovoltaica, 2013). En el mismo año, las regiones con más potencia instalada fueron: Castilla La Mancha (905 MW), Andalucía (838 MW) y Extremadura (540 MW).

Las nuevas políticas europeas tienden a retirar los incentivos por la generación eléctrica fotovoltaica y promueven el desarrollo de políticas de fomento del autoconsumo y la generación distribuida.

El marco normativo que regula el sector en nuestro país, ha sufrido cierta inestabilidad recientemente, aumentando la incertidumbre de los inversores. El Real Decreto 1/2012, por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de pre-asignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos, suprimía los anteriores incentivos económicos de ayudas para el fomento de las energías renovables (Presidencia del Gobierno, 2012).

Dentro de este contexto, la evolución del autoconsumo de la energía solar fotovoltaica, mediante la integración de los sistemas en edificios, puede suponer una alternativa para fomentar el desarrollo del sector dentro de nuestro país.

2.4.2. Descripción de los sistemas fotovoltaicos

Se define como sistema fotovoltaico el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar y transformar la energía solar disponible, transformándola en utilizable como energía eléctrica (Fernández Salgado, 2007).

Aunque existen diferentes opciones para diseñar un sistema fotovoltaico, en general contienen los siguientes componentes (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2011):

- Generador fotovoltaico: es el que capta y convierte la radiación solar en corriente eléctrica
- Baterías o acumuladores: para el almacenamiento de la energía producida
- Regulador de la carga: asegura el mantenimiento de la carga de la batería y evita sobretensiones
- Inversor o acondicionador: transforma la corriente continua producida en corriente alterna
- Elementos de protección: protegen de la descarga de elementos en caso de fallo

Los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar en aislados, conectados a red o híbridos (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2011).

- Sistemas aislados: se emplean para proporcionar electricidad a los usuarios con consumos de energía muy bajos y emplazamientos aislados de la red general. Pueden estar equipados con sistemas de acumulación de la energía producida durante la fase de insolación. Las configuraciones de este tipo implican que el campo fotovoltaico debe estar dimensionado de forma que permita, durante las horas de insolación, la alimentación de la carga y a la vez la recarga de las baterías de acumulación.

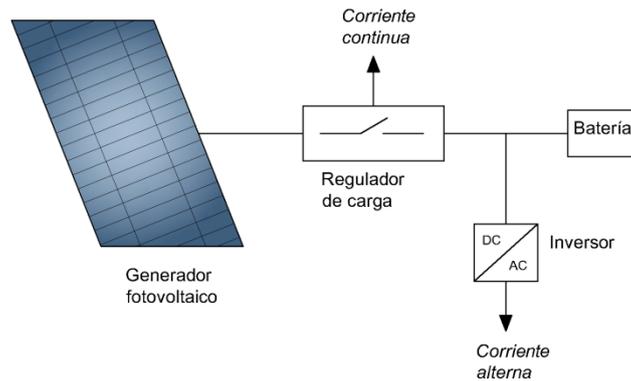


Figura 2.38. Esquema de sistema solar fotovoltaico aislado.

Fuente: elaboración propia.

- Sistemas conectados a red: la energía producida es vertida a la red de distribución y durante las horas de baja insolación la carga viene alimentada por la red. La energía generada es transformada en corriente alterna mediante los inversores y vertida a la red eléctrica de distribución. Este tipo de instalaciones cuentan con sistemas de seguimiento del estado de la tensión de la red de distribución para garantizar la entrega correcta de la energía y evitar situaciones peligrosas.

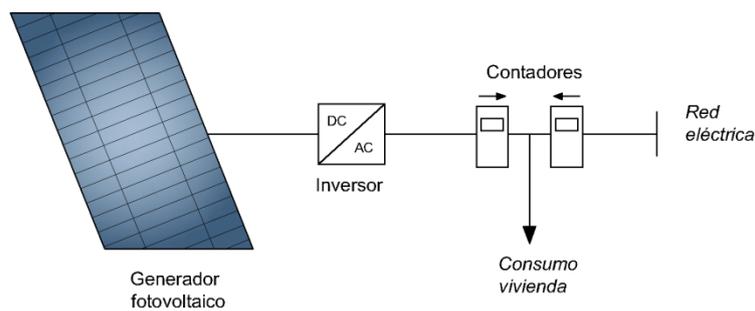


Figura 2.39. Esquema de sistema solar fotovoltaico conectado a red.

Fuente: elaboración propia.

- **Sistemas híbridos:** se combinan con otro tipo de generación de energía eléctrica. Estas instalaciones son apropiadas cuando se quiere aprovechar algún recurso energético localizado cerca de la instalación o cuando se quiere tener una mayor fiabilidad en el suministro de energía.

2.4.3. El módulo solar fotovoltaico

El efecto fotoeléctrico

Se define como efecto fotoeléctrico la generación de una corriente eléctrica en ciertos materiales cuando son iluminados por radiación electromagnética, sin que sea necesario que aparezca o intervenga ningún efecto mecánico o físico (Fernández Salgado, 2007).

El efecto fotoeléctrico se produce con algunos materiales que tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones. Los fotones procedentes de la luz inciden sobre la superficie de este material y son absorbidos por los electrones del medio, adquiriendo una cantidad de energía suficiente para escapar del mismo y generar una corriente eléctrica (ver figura 2.40) (Fernández Salgado, 2007)

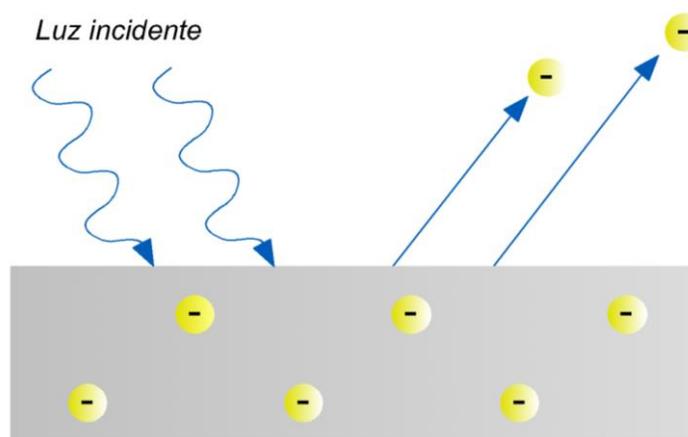


Figura 2.40. Efecto fotoeléctrico. Fuente: elaboración propia.

Al incidir la luz sobre el material se rompen los enlaces entre el núcleo y los electrones de valencia, que quedan libres y comienzan a circular por el semiconductor. Al desplazarse, el electrón deja un lugar con carga eléctrica positiva denominado hueco.

El material más utilizado para fabricar células solares es el silicio. Este elemento químico cuenta con cuatro electrones de valencia disponibles para unirse con los electrones de valencia de otros átomos.

Para conseguir un material semiconductor, se trata químicamente algunas regiones del material. En este tratamiento, se sustituyen algunos átomos de silicio por átomos de fósforo, elemento que cuenta con cinco electrones de valencia. Es lo que se conoce como “dopar” el material. De esta forma, cuatro electrones forman enlace con los átomos adyacentes de silicio. El electrón que queda libre podrá separarse del átomo de fósforo mediante una estimulación aportada por una fuente externa de energía térmica, pasando a estar en movimiento en el interior del cristal. Se consigue así un conductor “*tipo n*”

De la misma manera, cuando la sustitución del átomo de silicio se realiza con átomos de boro (que sólo tiene tres electrones de valencia) se da una situación en la que se necesita un electrón adicional. Este electrón que falta produce el efecto opuesto, como si de un electrón positivo se tratase, denominándose “hueco”. Este sería el denominado conductor “*tipo p*”.

Cuando se pone en contacto un material “*tipo n*” con un material “*tipo p*” se obtiene un *diodo* o enlace “*p-n*”. Los electrones que estén en estado libre dentro del material “*tipo n*” identifican que existe una región contigua en la que no existen electrones libre y así se generará un flujo de estos electrones hacia la otra zona. Los huecos del material “*tipo p*” detectan una región sin huecos y se produce un flujo de cargas positivas en el sentido contrario al flujo de electrones (Fernández Salgado, 2007).

En la zona de unión de ambos materiales se origina un campo eléctrico que va creciendo a medida que huecos y electrones siguen circulando. El proceso terminará cuando el potencial eléctrico del campo alcance un valor que impida la difusión de electrones y huecos. Alcanzado este valor de equilibrio se habrá creado

un campo eléctrico permanente sin la ayuda de campos eléctricos o elementos externos.

Al incidir un rayo solar sobre una región del material “*tipo p*”, si la energía térmica del fotón incidente es suficiente para romper un enlace del retículo del silicio, el fotón será absorbido y se creará una nueva pareja electrón-hueco. Como consecuencia del potencial eléctrico existente, el electrón liberado se trasladará hacia la zona del material “*tipo n*”. Análogamente, al incidir un fotón sobre la zona *n*, el hueco creado se moverá hacia la zona de material “*tipo p*”.

Este flujo da origen a un campo eléctrico como consecuencia de la acumulación de cargas positivas en la “*zona p*” y de cargas negativas en la “*zona n*”. Cuanto mayor sea el número de fotones incidentes mayor será el número de los campos que pasan a anularse uno a otro. Este proceso continúa hasta que se alcanza un valor en el que no hay un campo interno que separe cada pareja electrón-hueco. Esta condición determina la tensión a circuito abierto de la célula fotovoltaica (Fernández Salgado, 2007).

La célula fotovoltaica

Una célula fotovoltaica es un dispositivo formado por una lámina delgada de material “*tipo n*” y otra de mayor espesor de material “*tipo p*”. Al estar ambas capas unidas se genera un campo eléctrico en la unión “*p-n*”.

Al incidir la luz solar sobre la superficie de la célula, concretamente sobre la *zona n*, los fotones rompen el par electrón-hueco. La lámina de “*tipo n*” recoge los electrones y la del tipo *p* recoge los huecos, estableciéndose la diferencia de potencial dentro del cristal. Se genera así un flujo de electrones o corriente eléctrica de la *zona p* a la *zona n*.

La intensidad de la corriente eléctrica generada será proporcional a la cantidad de luz que reciba la célula y seguirá activa mientras la luz siga incidiendo sobre ella y la intensidad sea suficiente para romper el par electrón-hueco.

Son varias las limitaciones de este sistema que afecta al rendimiento (Fernández Salgado, 2007):

- a) Absorción incompleta de la radiación por la célula
- b) Utilización de sólo parte de la energía del fotón incidente
- c) Pérdidas por el “factor de voltaje”, que es la relación entre la tensión a circuito abierto de la célula y la diferencia entre la potencia de conducción del electrón y la de valencia
- d) Pérdidas por el “factor curvo”, que es la relación entre la tensión a circuito abierto de la célula y la tensión ideal de la unión $p-n$

Las células fotovoltaicas tradicionales más empleadas, son las formadas por silicio monocristalino aunque también existen las células de silicio policristalino y de silicio amorfo. Las propiedades de cada uno de estos materiales son (Fernández Salgado, 2007)(Méndez Muñiz & Cuervo García, 2011):

Silicio monocristalino:

- Rendimiento energético entre el 15-18%
- Presenta una estructura ordenada y un comportamiento uniforme
- Precisa de un elaborado proceso de manufactura que incremente al costo y el consumo de recursos asociado a su fabricación
- La superficie es de brillo uniforme

Silicio policristalino:

- Rendimiento energético entre el 12-15%
- Su estructura cristalina no es uniforme y los enlaces irregulares disminuyen el rendimiento
- Requiere de menos fases de cristalización para su fabricación

- El precio es menor en comparación con la célula de silicio monocristalino

Silicio amorfo:

- Rendimiento energético menor del 10%
- Presenta una estructura desordenada y gran número de defectos en los enlaces
- Su proceso de fabricación es más simple y menos costoso

Otros materiales que sirven de alternativa al silicio son el arseniuro de galio, el fosfuro de indio y el telurio de cadmio.

Células de película delgada

Están dentro del grupo de células de segunda generación y surgen de la necesidad de reducir los costes de fabricación. Aunque la metodología de fabricación es diferente, la estructura final del módulo suele ser similar (Martín Chivelet, 2011). Esta tecnología imprime sobre el vidrio muchas capas muy delgadas de células, cuyo espesor varía de nanómetros a decenas de micrómetros.

Los materiales fotovoltaicos más empleados en este tipo de células son el Silicio amorfo y otros silicios de película delgada, el telurio de cadmio (CdTe), cobre, indio y selenio (CIS) y cobre, indio, galio y selenio (CIGS). La tecnología de impresión requiere menos material, abarata los costes de la célula y permite obtener paneles o sistemas fotovoltaicos más ligeros.

Células solares sensibilizadas con colorante

Entre las células solares de tercera generación, las células sensibilizadas mediante colorante constituyen una de las alternativas más prometedoras a las tradicionales, tanto por su menor coste de fabricación como por las ventajas

tecnológicas (Sánchez de Armas, 2010). Este tipo de células pertenece al grupo de las células solares de película delgada.

También llamadas *DSSC* por sus siglas en inglés (*Dye Sensitized Solar Cell*) son células nanocristalinas impregnadas con pigmentos sensibles a la luz denominados fotosensibilizadores. Este modelo de célula fue propuesta por Brian O'Regan y Michael Grtzel a finales de los ochenta.

El sistema fotoelectroquímico de las *DSSC* se compone de una capa porosa de nanopartículas de dióxido de titanio (semiconductor) al que se ha adherido un colorante fotosensible. El dióxido de titanio se sumerge bajo una solución de electrolito. Al igual que en una batería alcalina convencional, se colocan un ánodo y un cátodo a cada lado de un conductor líquido. La excitación inducida por el fotón tiene lugar en el colorante que transfiere un electrón al semiconductor, iniciando así el ciclo de corriente.

El material fotosensible empleado suele ser un complejo de rutenio, aunque cada vez más, se emplean colorantes orgánicos más sencillos de sintetizar y de menor coste (Sánchez de Armas, 2010)

Las *DSSC* pueden ser fabricadas bajo condiciones normales de laboratorio y sin la necesidad de materiales semiconductores, que suelen ser caros, abaratando de esta forma los costes de producción (Jena et al., 2012). Al contar con un material fotosensible, son capaces de trabajar con poca intensidad lumínica, incluso con luz difusa. Otra ventaja es su robustez mecánica y menor espesor, lo que hace posible imprimir estas células sobre superficies flexibles o semitransparentes. La variedad de colorantes disponibles permite diseñar paneles más decorativos. Estas propiedades posibilitan el diseño de paneles ligeros y estéticamente más atractivos, facilitando su integración arquitectónica.

Las células fotoelectroquímicas alcanzan valores de eficiencia que se encuentran entre el 15 y el 17%. Sin embargo, los materiales semiconductores idóneos para su funcionamiento se degradan con gran rapidez (Carbó Vela & Rocha Rangel, 2012).

El desarrollo de la nanotecnología ha permitido abrir nuevas líneas de investigación en la mejora de las *DSSC*. Por ejemplo, se está trabajando en la introducción de puntos cuánticos cargados dentro de la célula fotoeléctrica para

captar la luz infrarroja además de la luz visible (Kouhnavard et al., 2014). Se trabaja también en la creación de células en las que se sustituyen las partículas de pigmentos fotosensibles por nanotubos, que ofrecen una mayor rapidez en el transporte de electrones (Zhang, Bao, & Tao, 2014).

Aparte de los tipos de células solares anteriormente descritos, existen las células transparentes, las células orgánicas y las células de concentración.

Propiedades de las células solares:

Independientemente del material de la célula solar y de su proceso de fabricación, todas las células solares están caracterizadas por las siguientes propiedades:

- Superficie activa: es la parte del área total de la célula que interviene en el proceso de conversión
- Material antirreflectante: constituido por una fina capa que evita que se refleje una porción de la luz incidente y que se pierda la cantidad de energía luminosa que llega al par.
- Eficiencia de conversión: indica la relación entre la energía eléctrica generada y la energía luminosa empleada para obtenerla. La eficiencia de conversión (μ) se expresa en forma de porcentaje mediante la siguiente ecuación (ecuación 2.37):

$$\mu (\%) = \frac{\text{Energía generada}}{\text{Energía incidente}} \times 100 \quad (2.39)$$

- Potencia máxima de salida: es la característica más importante de un panel fotovoltaico y varía entre los 50 Wp y los 220 Wp (Fernández Salgado, 2007).

El panel fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos están constituidos por un conjunto de células conectadas para formar una única estructura sólida. La composición en módulos proporciona resistencia mecánica a la célula, protección contra agentes externos y el aislamiento eléctrico necesario por motivos de seguridad (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2011). Las células están ensambladas entre una capa superior de cristal y un soporte de material plástico, dotando de estanqueidad y protección mecánica al sistema. Todas las células que conforman un panel deben tener los mismos parámetros eléctricos.

Los paneles se ubican en una estructura soporte, que proporciona resistencia ante las acciones tales como el viento y/o la nieve y dota al panel de la inclinación y el ángulo adecuado para maximizar la generación de energía eléctrica. El soporte del panel puede ser una estructura fija o una estructura con seguimiento solar. Las estructuras de seguimiento solar dotan al panel de movimiento para seguir el movimiento del sol, pudiendo proveer hasta un 40% más de producción eléctrica (Fernández Salgado, 2007).

Curva intensidad-tensión de un sistema fotovoltaico

Es la forma típica de representación de las características de salida de un dispositivo fotovoltaico. La corriente de salida varía según el voltaje de la carga y la temperatura de trabajo, debido a las propiedades intrínsecas de los materiales semiconductores (Fernández Salgado, 2007).

La corriente y la tensión a las que opera un dispositivo fotovoltaico están determinadas por la radiación solar incidente, la temperatura ambiente y las características de la carga (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2011).

La curva intensidad-tensión, conocida como curva V-I, representa la relación entre la corriente y el voltaje de salida para un panel fotovoltaico cuando el nivel de radiación permanece constante. A continuación se esquematiza una curva intensidad-tensión:

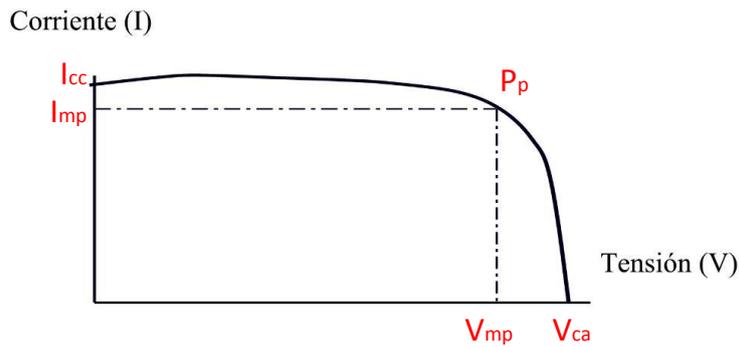


Figura 2.41. Curva intensidad-tensión. Fuente: elaboración propia.

siendo I_{cc} : corriente de cortocircuito, la máxima corriente que puede entregar una célula a tensión nula; V_{ca} : tensión de circuito abierto, la máxima tensión que puede entregar una célula a corriente nula; P_p : la máxima potencia que puede suministrar una célula, coincidente con el punto de la curva donde el producto de la tensión por la corriente es máximo; I_{mp} : corriente a máxima potencia, se emplea como la corriente nominal de la célula y es la corriente que entrega la célula a máxima potencia; V_{mp} : tensión a máxima potencia, es la tensión nominal de la célula, y es tensión que entrega la célula a potencia máxima.

2.4.4. Integración arquitectónica de los sistemas de energía solar fotovoltaica

Para conseguir la integración arquitectónica de un módulo fotovoltaico deben satisfacerse, tanto los criterios de generación fotovoltaica y la obtención del máximo rendimiento posible como, los criterios arquitectónicos. El grado de combinación entre ellos condicionará el resultado energético y funcional del sistema.

Con el objetivo de conseguir la integración arquitectónica del módulo, pueden alterarse algunas de estas características (Martín Chivelet, 2011):

- Estructura constructiva: los materiales habitualmente empleados en la estructura constructiva de la lámina fotovoltaica pueden ser reemplazados por otros que aporten diferentes prestaciones, como la sustitución del

material encapsulante por polivinilo y el cambio del material de la cubierta posterior por vidrio.

- **Transparencia:** cuando se trata de módulos fotovoltaicos tradicionales, puede aumentarse la transparencia del módulo mediante una cubierta posterior transparente o reduciendo el número de células que forman el módulo. Al adoptar este tipo de soluciones debe tenerse en cuenta, en el cálculo del equipamiento del edificio, la luz adicional que pasa a través de este tipo de módulos así como el aporte de calor asociado.
- **Aislamiento térmico:** mejorar el aislamiento térmico de los paneles de células fotovoltaicas puede ayudar a mejorar el aislamiento del edificio y su eficiencia térmica. Una de las medidas para mejorar el aislamiento del panel es dotar al módulo de un doble acristalamiento con cámara de aire.
- **Flexibilidad:** obtener módulos flexibles en láminas delgadas, permite su colocación en cubiertas y otros elementos curvos sin alterar la forma original del sistema estructural. La aparición de módulos flexibles y de diversos tamaños ha favorecido su integración en nuevos elementos que comúnmente no se consideraban como soportes potenciales de estos sistemas.
- **Color:** una solución es adaptar el color de la cubierta posterior para integrarlo en el medio. Puede modificarse también el color de la célula alterando el espesor de su capa reflexiva, en detrimento del rendimiento.



CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL MODELO, RESULTADOS Y VALIDACIÓN

El objetivo de este capítulo es describir las fases de diseño de un modelo de cálculo de la demanda de energía en edificios residenciales, mediante el estudio de la altura del edificio y la producción de energía solar fotovoltaica para abastecer parte de la demanda.

La idea de desarrollar este modelo surge como convergencia del conocimiento adquirido durante las etapas anteriores de la investigación. El modelo propuesto combina de esta manera el diseño eficiente de los edificios, mediante un estudio de la altura ideal para reducir la demanda, con la integración de sistemas de producción de energía solar fotovoltaica.

La estructura del capítulo es la siguiente: en primer lugar se realiza una breve perspectiva sobre las diferentes técnicas de modelización del consumo energético del sector residencial. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis de las tipologías edificatorias más comunes del sector residencial en España y Andalucía. Más tarde, se caracterizan estas tipologías y se obtiene la muestra de estudio.

Por último, se propone el modelo de cálculo de la demanda energética y se procede a evaluar la muestra de estudio. Esto se realiza en tres etapas. La primera, consiste en una simulación dinámica de los edificios de estudio empleando el software EnergyPlus™. En la segunda etapa, se diseñan los sistemas de producción de energía solar fotovoltaica y se estima la energía generada. Por último, se calcula el balance energético entre energía demandada y energía producida.

3.1. MODELOS TOP-DOWN, BOTTOM-UP Y METODOLOGÍA DEL ARQUETIPO

En la modelización del consumo energético del sector residencial existen dos enfoques: los modelos descendentes, también llamados modelos de arriba-abajo o top-down, y los modelos ascendentes, de abajo a arriba o bottom-up (Swan & Ugursal, 2009). En la figura 3.1 se muestra una clasificación.

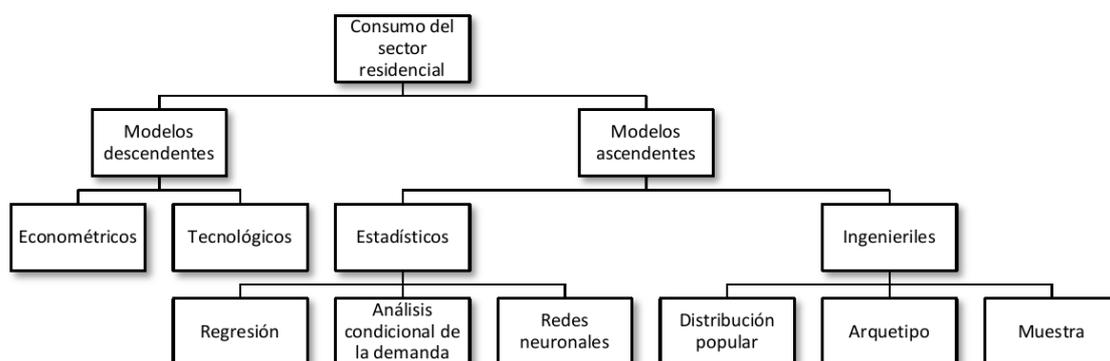


Figura 3.1. Técnicas ascendentes y descendentes para estimar el consumo del sector residencial a nivel regional o nacional. Fuente: (Swan & Ugursal, 2009)

Los modelos de arriba-abajo, o modelos descendentes, consideran el sector residencial como un disipador de la energía y no se abordan los usos finales individuales de la energía. Los modelos basados en este enfoque analizan datos globales de consumo energético para caracterizar el consumo del sector residencial a nivel global. Emplean datos macroeconómicos, como el producto interior bruto, la inflación o el precio de la energía, para realizar una regresión y obtener el gasto energético en viviendas. Este tipo de técnicas permite una posterior aproximación a micro escala para estimar el consumo individualizado.

Los modelos ascendentes, o bottom-up, estiman el consumo energético de un conjunto de viviendas de forma individual y lo extrapolan a niveles regionales o nacionales. Este tipo de modelos se basan en dos metodologías diferentes: la metodología estadística y la metodología ingenieril.

Los métodos de ingeniería estiman el consumo energético final en base a las características de los edificios y sus índices de uso, sin necesidad de contar con datos históricos de consumo. Las tres metodologías de ingeniería son: el método de distribución, el método de los arquetipos y el método de la muestra (Swan & Ugursal, 2009).

En el método de distribución se emplea la distribución del nivel de equipamiento en viviendas y el ratio de uso para calcular el consumo energético asociado a cada uso, aunque no tiene en cuenta las interacciones entre los usos finales.

En la metodología de los arquetipos, se realiza una clasificación de los edificios existentes para desarrollar unos arquetipos representativos de las tipologías posibles y emplearlos como datos de entrada para construir el modelo energético. Partiendo del consumo estimado en estos arquetipos, este método permite extrapolar los resultados a mayor escala.

Por último, la técnica de la muestra emplea, como datos de partida, el consumo en una muestra de viviendas. En comparación con el método de los arquetipos, la técnica de la muestra incluye una mayor variedad de tipologías de viviendas pero requiere de un gran volumen de datos de las viviendas representativas.

Tanto la metodología ascendente como la descendente, suponen ventajas y desventajas. Adoptar una u otra depende en gran medida de los datos de partida con los que se cuenta, del propósito del estudio y de la destreza del profesional que lo realiza. No hay duda de que el enfoque descendente permite obtener de primera mano, previsiones de consumo energético a mayor escala sin tener que entrar en detalle del uso específico que se realiza de la energía, siendo muy útil en la toma de decisiones en política energética a nivel local, nacional o internacional. Además, debido a que analiza datos históricos, permite evaluar la inercia del consumo energético del sector. Sin embargo, esta metodología requiere de suposiciones a gran escala que afectan a los resultados finales y que precisan de un alto nivel de confianza y veracidad. Al ser modelos que no analizan en detalle el consumo individual, pueden presentar dificultades al evaluar la influencia de nuevas tecnologías e identificar las áreas claves para la introducción de mejoras para reducir el consumo.

La metodología ascendente permite, por su parte, una aproximación más cercana a las fuentes de consumo y relaciona una amplitud de parámetros que influyen en la demanda energética final. En cambio, requiere de un gran nivel de detalle de los datos y puede estar sometida a una serie de dificultades a la hora de escoger una muestra suficientemente representativa del sector.

En la investigación que se expone en este documento, se adoptó un método ascendente basado en una aproximación “ingenieril” mediante el uso de arquetipos. Se adoptó por un método ingenieril ya que es el único método que puede desarrollarse sin necesidad de datos históricos previos del consumo en el sector. Además, la metodología de los arquetipos es una de las más empleadas para representar un stock de viviendas y su consumo energético. La validez del método de los arquetipos está respaldada por numerosos estudios previos. (MacGregor, Hamdullahpur, & Ugursal, 1993) (Shimoda, Fujii, Morikawa, & Mizuno, 2004) (Yao & Steemers, 2005)(Petersdorff, Boermans, & Harnisch, 2006) (Wan & Yik, 2004) (Palmer et al., 2006).

Se estudia el consumo energético final, para cada uso, basado en los índices de potencia de uso empleados en las tipologías de vivienda representativos, aplicando las técnicas de cálculo de transferencia de calor y relaciones termodinámicas de los elementos.

3.2. CONSTRUCCIÓN DE LOS ARQUETIPOS Y OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE ESTUDIO

A partir del estudio del sector residencial, se obtuvieron las tipologías edificatorias más representativas. Una vez caracterizada cada tipología en cuanto a: superficie útil, materiales, sistemas constructivos y demás propiedades, se procedió a construir un arquetipo.

En base a estos arquetipos, se diseñó la muestra de estudio en la que se adoptó como variable la altura del edificio, manteniendo constante el resto de parámetros. Por último, se procedió a completar la caracterización de las viviendas con los valores de la tasa de ocupación, las condiciones de ventilación, las propiedades del sistema de iluminación y del equipamiento y demás parámetros y datos de entrada necesarios para realizar la simulación energética.

3.2.1. Tipologías de viviendas

En esta sección se analizan los edificios de uso residencial de nueva construcción en Andalucía, con el fin de identificar las tipologías residenciales más representativas y sus características. Para ello, se han estudiado los datos estadísticos recogidos por la Dirección General de Programación Económica de la Secretaría de Estado de Infraestructuras, dependiente del Ministerio de Fomento, y publicados en el informe “Construcción de edificios 2003-2007, licencias municipales de obras” (Ministerio de Fomento, 2008a).

Se decidió tomar el año 2007, como año de referencia, por ser el último año cuyos datos de licencias nuevas no se han visto afectados por la crisis del sector de la construcción en España.

El informe sobre licencias de obra nueva se realiza a nivel de toda España (Ministerio de Fomento, 2008a). Los resultados se presentan tanto a nivel nacional como desglosados por Comunidades Autónomas, provincias y municipios. La serie estadística ofrece un conjunto de indicadores avanzados de la evolución del parque residencial en España que servirán como punto de partida para caracterizar las tipologías de viviendas en la Comunidad Autónoma Andaluza.

La fuente empleada para la realización de este informe, son los datos las licencias de obra mayor que conceden los ayuntamientos para la edificación residencial y no residencial.

A partir de una estratificación de los ayuntamientos, a nivel provincial, se calculan los coeficientes de expansión en base a la población de los municipios y al número de licencias. Los datos son recogidos con periodicidad mensual mediante un formulario cumplimentado por los organismos responsables de otorgar las licencias de obras, aportando la siguiente información:

- Datos y clase de promotor
- Emplazamiento de las obras
- Régimen legal de las obras
- Duración de la obra
- Número y destino de los edificios a construir
- Tipo de obra a realizar y presupuesto
- Superficie de las parcelas y características de los edificios a construir en ellas
- Tipología constructiva de los edificios
- Instalaciones y energía de los edificios a construir
- Características de las viviendas a construir: superficie útil, número de habitaciones
- Acabados interiores y carpintería de las viviendas
- Tipología de las obras de rehabilitación
- Características de las obras de rehabilitación
- Características de las viviendas a rehabilitar
- Demolición parcial y total de edificios
- Control administrativo y municipal de las obras

La respuesta se trata mediante estratificación de los Ayuntamientos a nivel provincial mediante el cálculo de coeficientes de expansión en base a la población de los municipios y al número de licencias, aplicando la ecuación 3.1. :

$$C_{ij} = P_{ij}/p_{ij} \cdot L_{ij}/l_{ij} \quad (3.1.)$$

donde C_{ij} es el coeficiente de elevación del estrato i en la provincia j ; P_{ij} es la población de los municipios del estrato i en la provincia j ; p_{ij} es la población de los municipios del estrato i en la provincia j que han contestado; L_{ij} es el número de licencias concedidas en el estrato i de la provincia j ; l_{ij} es el número de licencias con cuestionario del estrato i en la provincia j . El primer factor de esta fórmula P_{ij}/p_{ij} corrige la no respuesta, y el segundo L_{ij}/l_{ij} subsana la falta de cumplimentación de los cuestionarios.

Los resultados finales se obtienen como resultado de la suma de los cuestionarios de cada estrato-provincia multiplicado por el coeficiente de corrección de la no respuesta. El tamaño mínimo de la muestra para cada estrato (n) dependerá del total de municipios que lo forman y del nivel de confianza exigido (ecuación 3.2.):

$$n = N^2 K^2 S^2 / (e^2 + N K^2 S^2) \quad (3.2.)$$

siendo N es el total de municipios, K el nivel de confianza exigido, s es la variabilidad de las licencias concedidas y e representa el error absoluto. Más información sobre la metodología de formularios empleada puede encontrarse en las notas metodológicas del anuario estadístico del Ministerio de Fomento en el número 1 del Boletín Estadístico del Ministerio, en el volumen de “Notas metodológicas” (Ministerio de Fomento, 2008b).

En el informe del Ministerio de fomento se realiza la siguiente clasificación de las licencias otorgadas (figura 3.2.):



Figura 3.2. Clasificación de licencias de obra nueva otorgadas.

Fuente: (Ministerio de Fomento, 2008a)

A continuación, se presenta un análisis de los datos recogidos en este estudio, con el fin de obtener un esbozo de la situación residencial en España.

De acuerdo con los datos publicados, en el año 2007 se construyeron en España un total de 187,147 edificios de nueva planta, de los cuales más del 88% eran edificios residenciales. En Andalucía el porcentaje es similar (el 87% de los 37,693 edificios residenciales).

Los datos ofrecidos por el Ministerio realizan una distinción entre los siguientes tipos de edificios residenciales: edificios de vivienda familiar; edificios de residencia colectiva permanente y edificios de residencia colectiva eventual. Las viviendas colectivas, ya sean de ocupación permanente o eventual, son aquellas destinadas a ser habitadas por un grupo de personas sometidos a una autoridad o régimen común no basado en lazos familiares ni de convivencia, como es el caso de cuarteles, conventos, asilos, prisiones o residencias sanitarias y de estudiantes. En la investigación aquí desarrollada sólo se ha considerado los datos referentes a edificios destinados a vivienda familiar.

En el año estudiado, cerca del 80 % de la superficie nueva construida en España fue destinada a edificios residenciales de vivienda. En el año 2007 en España se

otorgaron un total de 145,555 licencias de obra, cuya distribución es la siguiente (ver figura 3.3.):

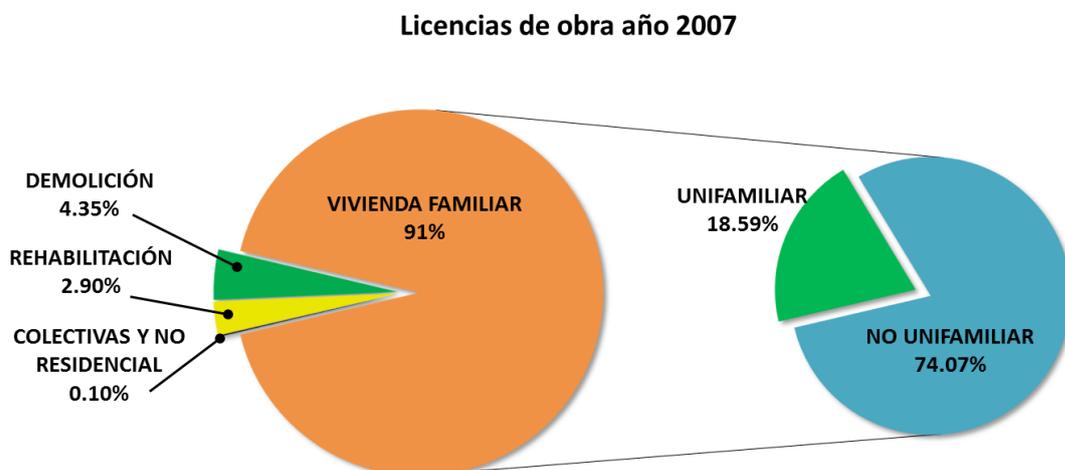


Figura 3.3. Licencias de obra otorgadas en el año 2007.

Fuente: (Ministerio de Fomento, 2008a)

La tabla 3.1 recoge la distribución de edificios según tipo de obra y destino en las ocho provincias de Andalucía:

Tabla 3.1. Edificios según tipo de obra y destino por provincias. Fuente: (Ministerio de Fomento, 2008a)

Provincia	Edificios de nueva planta						Edificios a rehabilitar	Edificios a demoler
	Total	edificios residenciales				Edificios no residenciales		
		Total	Vivienda familiar	Residencia colectiva permanente	Residencia colectiva eventual			
Almería	5,613	5,138	5,126	7	5	475	407	583
Cádiz	1,235	1,031	1,028	3	0	204	955	329
Córdoba	3,142	2,492	2,492	0	0	650	540	770
Granada	8,754	8,165	8,157	3	5	589	863	2,178
Huelva	1,701	1,561	1,555	6	0	140	257	327
Jaén	4,297	3,689	3,683	3	3	608	556	601
Málaga	6,309	5,318	5,283	24	11	991	660	537
Sevilla	6,642	5,581	5,568	12	1	1,061	1,289	872
Andalucía	37,693	32,975	32,892	58	25	4,718	5,527	6,197

En ese año, y para el caso de Andalucía, se construyeron un total de 32,892 edificios residenciales de nueva planta destinados a vivienda familiar, ocupando un total de 17,963 miles de m², lo que representa más del 84% de la superficie de nueva planta total destinada a edificios (ver tabla 3.2.)

Tabla 3.2. Superficie a construir de nueva planta según destino por provincias (miles m²). Fuente: (Ministerio de Fomento, 2008a)

Provincia	Total edificios	Edificios residenciales destinados a [miles m ²]				Edificios no residenciales total
		Total	Viviendas	Residencia colectiva permanente	Residencia colectiva eventual	
Almería	3,368	3,162	3,144	6	12	206
Cádiz	750	569	567	2	0	181
Córdoba	1,680	1,245	1,245	0	0	435
Granada	4,746	4,327	4,309	4	14	419
Huelva	949	798	783	15	0	151
Jaén	2,242	1,928	1,924	2	2	314
Málaga	4,910	4,504	4,215	117	172	406
Sevilla	2,771	1,837	1,776	56	5	934
Andalucía	21,416	18,370	17,963	202	205	3,046

Aparte de conocer el número de edificios residenciales destinados a vivienda familiar, y los metros cuadrados construidos que éstos representan (tablas 3.1. y 3.2.), se examina el número de viviendas que se corresponden con estos edificios. En la tabla 3.3 se muestra que más del 77% de las viviendas de nueva planta están ubicadas en edificios no unifamiliares, mientras que tan sólo el 22% se corresponden con viviendas unifamiliares.

Tabla 3.3. Número de viviendas de nueva planta según tipo y provincia. Fuente: (Ministerio de Fomento, 2008a)

Provincia	Viviendas según tipo de obra		
	Unifamiliar	No unifamiliar	Total
Almería	3,760	18,698	22,458
Cádiz	681	3,829	4,510
Córdoba	1,662	5,139	6,801
Granada	6,483	18,940	25,423
Huelva	1,001	5,241	6,242
Jaén	2,943	6,864	9,807
Málaga	3,849	20,094	23,943
Sevilla	4,632	7,780	12,412
Andalucía	25,011	86,585	111,596

Según la serie estadística analizada, en Andalucía se construyeron en el año 2007 111,596 viviendas de nueva planta. Estas viviendas están distribuidas siguiendo diversas configuraciones, desde una vivienda en un solo edificio (vivienda aislada) hasta un edificio que contiene varias viviendas, pasando por casos intermedios como son las viviendas adosadas y las viviendas pareadas. En los datos del Ministerio se realiza una distinción entre viviendas aisladas, pareadas y adosadas. Sin embargo, dado que el número de viviendas pareadas no es significativo y sus propiedades constructivas son similares a las de las viviendas aisladas, en nuestra investigación agrupamos ambas tipologías.

En la tabla 3.4 se muestra el número de viviendas que se corresponde con cada tipo y la superficie media útil para las distintas provincias de Andalucía. La última fila muestra el promedio, para toda Andalucía, calculado como la media ponderada del número de viviendas y la superficie media por tipología y provincia.

Tabla 3.4. Número de viviendas y superficie media útil por tipología de vivienda y provincia (m²).
Fuente: (Ministerio de Fomento, 2008a)

Provincia	Número de viviendas en edificios			Superficie media útil por vivienda [m ²]		
	Aislados	Adosados	Dos o más viviendas	Aislados	Adosados	Dos o más viviendas
Almería	1,159	2,601	18,698	117.8	112.6	69.3
Cádiz	218	463	3,829	175.2	115.1	67.3
Córdoba	417	1,245	5,139	192.1	133.7	84.4
Granada	1,353	5,130	18,940	176.3	124.2	74.1
Huelva	168	833	5,241	144.0	135.8	77.1
Jaén	541	2,402	6,864	170.4	144.7	83.6
Málaga	1,590	2,259	20,094	152.4	125.1	70.4
Sevilla	1,391	3,241	7,780	132.4	113.9	72.3
<i>Promedio [m²]</i>				<i>151.5</i>	<i>124.5</i>	<i>73.3</i>

Analizados estos datos, las tres tipologías de edificios residenciales que se van a considerar en nuestra investigación son:

- Edificio unifamiliar de vivienda aislada
- Edificio unifamiliar de vivienda adosada
- Edificio plurifamiliar de dos o más viviendas

Los arquetipos se definen en base a tres criterios básicos: las características geométricas, las propiedades térmicas y los parámetros de uso (Swan & Ugursal, 2009). En las secciones siguientes se procede a dar una descripción de los valores de estos parámetros empleados para caracterizar los arquetipos de vivienda definidos.

3.2.2. Modelo de zonas térmicas

Calculados los metros cuadrados por tipología de vivienda (tabla 3.4), se obtiene más información acerca de la distribución interior de los espacios. De acuerdo con la referencia consultada, el número medio de estancias en las viviendas

unifamiliares aisladas es de 6 habitaciones y 3 baños. Para el caso de viviendas adosadas, es de 6 habitaciones y 2 baños y en las viviendas plurifamiliares es de 4 habitaciones y 2 baños.

El informe de los datos indica que la altura sobre rasante de las viviendas unifamiliares y aisladas es de dos plantas. Respecto a la tipología de edificio de viviendas plurifamiliares, la altura será el factor de estudio y por tanto su valor será considerado como variable tal y como se explica en el apartado de diseño de la muestra (sección 3.2.4)

Conocidas las superficies que caracterizan las tres tipologías de viviendas estudiadas (tabla 3.4.) y el número medio de estancias, se propone un modelo arquitectónico de distribución para cada vivienda. Los planos de distribución que definen este modelo han sido confeccionados siguiendo las pautas de distribución comúnmente empleadas y comprobando el cumplimiento del Código Técnico de la Edificación (Minsiterio de Fomento, 2006). Como apoyo para el diseño, se consultaron diversos proyectos constructivos de viviendas reales.

Los planos de distribución propuestos pueden observarse a la izquierda de la figura 3.4. Las estancias principales son: salón, comedor, dormitorio, cocina, baño, despacho y zonas de paso. En el caso de viviendas unifamiliares, la superficie de vivienda se distribuye en dos plantas en altura. Las viviendas plurifamiliares se distribuyen en una sola planta en altura.

Con el objetivo de reducir el tiempo de cálculo y siguiendo el criterio de Ordenes et al., el modelo arquitectónico de cada prototipo de vivienda ha sido traducido a un modelo de zonas térmicas (Ordenes, Marinoski, Braun, & Rütther, 2007). Cada zona térmica engloba la superficie de aquellos espacios que tienen un mismo uso y similar nivel de ocupación, equipamiento y tipo y potencia de iluminación. De esta manera, la distribución inicial se simplifica en cuatro zonas térmicas: salón, dormitorio, cocina y baño.

La superficie total útil de cada modelo de zonas térmicas es la misma que en el modelo arquitectónico.

La superficie total útil de cada modelo de zonas térmicas es la misma que en el modelo arquitectónico. Se ha escogido una planta rectangular para que los edificios

resultantes conserven una forma de paralelepípedo, ya que la mayoría de los edificios de viviendas convencionales existentes pueden ser comparados en gran medida con un paralelepípedo (Depecker et al., 2001)

Los modelos de zonas térmicas se representan a la derecha de la figura 3.4. Se indica también la orientación y las principales dimensiones. Los huecos de ventanas han sido destacados en color azul.

Debe clarificarse que la zona térmica definida como salón comprende a su vez la superficie de las demás estancias vivideras de uso común, como son las zonas de paso, el comedor y el estudio.

En esta adaptación se han mantenido los mismos parámetros de temperatura interior, nivel de ocupación, potencia del equipamiento, nivel de ganancias internas, horarios de ocupación y uso que en el modelo arquitectónico.

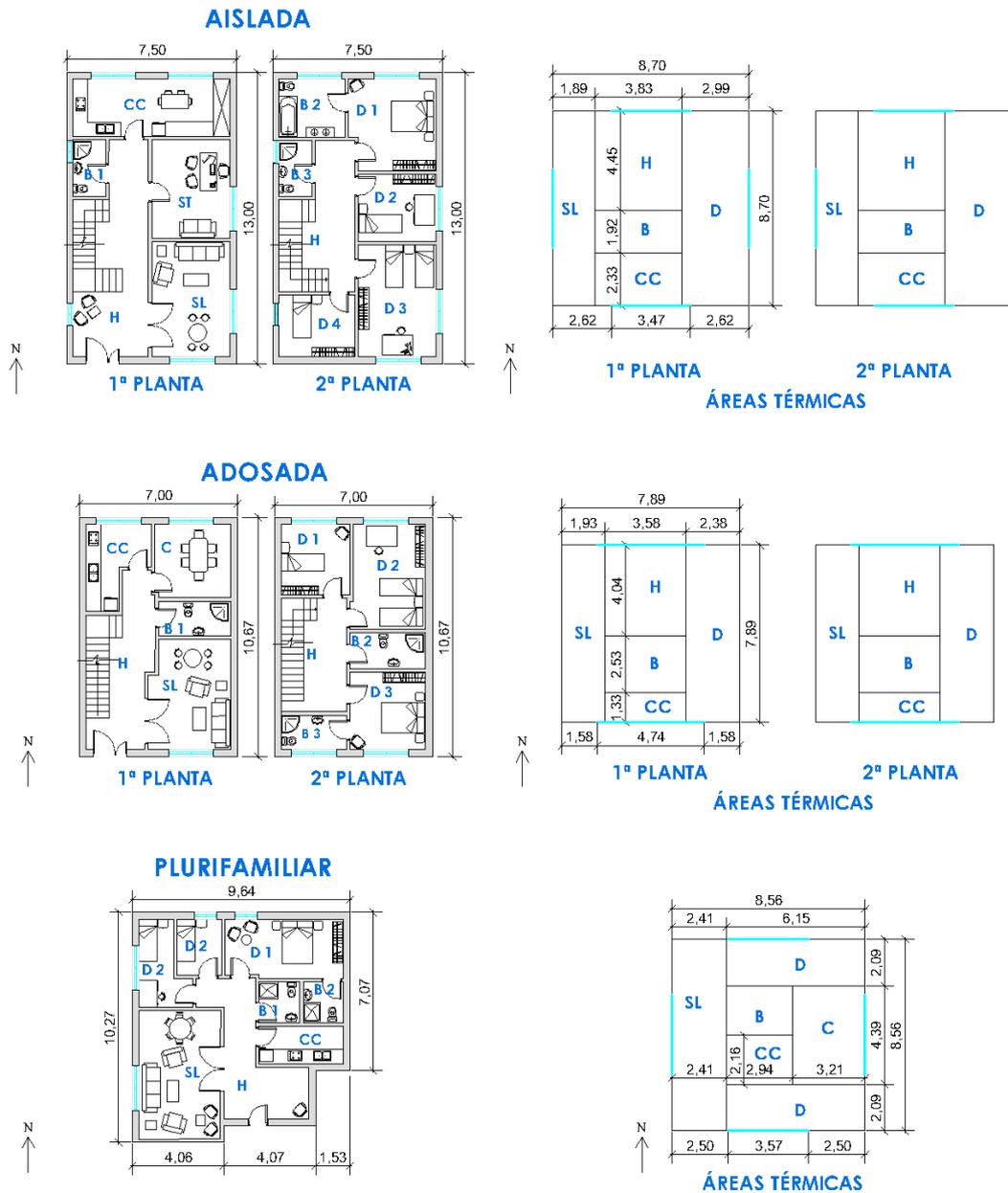


Figura 3.4. Planos de distribución de los arquetipos de viviendas (izda.) y equivalentes en zonas térmicas (dcha.) Nota: D: dormitorio, SL: salón, B: baño, CC: cocina, H: hall, ST: estudio, C: comedor.

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3.5 se detalla el área de cada zona térmica para las tres tipologías de vivienda estudiadas. La superficie total útil de cada vivienda se corresponde con la obtenida en la tabla 3.4.

Tabla 3.5. Características geométricas de zonas térmicas por tipología de vivienda. Fuente: elaboración propia.

Tipología de vivienda	Zona térmica	Superficie útil [m ²]	Volumen [m ³]
Aislada	Salón	32.88	98.64
	Zona de paso	34.00	102.00
	Cocina	17.86	53.58
	Dormitorio	51.98	155.94
	Baño	14.78	44.34
	<i>Total</i>	<i>151.50</i>	<i>454.50</i>
Adosada	Salón	30.44	91.32
	Zona de paso	28.92	86.76
	Cocina	9.52	28.54
	Dormitorio	37.52	112.56
	Baño	18.12	54.34
	<i>Total</i>	<i>124.52</i>	<i>373.52</i>
Bloque plurifamiliar	Salón	20.67	62.01
	Zona de paso	14.67	44.01
	Cocina	6.36	19.08
	Dormitorio	25.07	75.21
	Baño	6.53	19.59
	<i>Total</i>	<i>73.30</i>	<i>219.90</i>

La proporción de ventanas con respecto a la fachada, más conocido por su término en inglés *Window to Wall Ratio (WWR)*, se resume en la tabla 3.6. El valor del WWR es diferente en las distintas tipologías y es el resultado de la distribución realizada en los planos de la figura 3.4.

Es preciso aclarar que el valor más alto de WWR se corresponde con la tipología adosada, a pesar de que la superficie de ventanas es menor que la aislada. Sin embargo, debido a la disposición de viviendas en hilera, la superficie de fachada expuesta al exterior es menor.

Tabla 3.6. Valores dimensionales de las tipologías de viviendas consideradas. Fuente: elaboración propia.

Tipología de vivienda	Superficie útil [m ²]	Volumen [m ³]	Fachada [m ²]	Ventanas [m ²]	Ventana/Fachada (WWR) [%]
Aislada	151.50	454.50	208.88	30.56	14.63
Adosada	124.52	373.52	94.68	20.85	22.00
Bloque plurifamiliar	73.30	219.90	102.74	15.71	15.30

Las tres tipologías edificatorias estudiadas en esta investigación son: edificio de vivienda unifamiliar aislada, edificio de viviendas unifamiliares adosadas y edificio de viviendas plurifamiliares. Estas tipologías se corresponden con las tipologías de viviendas obtenidas de los datos estadísticos analizados.

3.2.3. Sistemas constructivos, acabados, materiales y valores de transmisión térmica

Una vez identificadas las tipologías de edificios residenciales representativos se procedió a definir el resto de propiedades que caracterizarán los arquetipos.

Con el objetivo de desarrollar unos modelos acordes con las viviendas existentes en el parque residencial, se escogieron los acabados constructivos más comunes en las obras de edificación de planta nueva. El informe de los datos estadísticos analizado en las secciones previas confirma que en más del 95% de los edificios de uso residencial de nueva planta construidos en Andalucía se realiza una estructura vertical de hormigón armado.

En tan sólo en el 3.38% de los casos la estructura está compuesta por muros de carga, mientras que las estructuras verticales metálicas o mixtas tan solo alcanzan el 1.53%. La estructura horizontal la conforma un forjado unidireccional en la mayoría de los casos (el 81%). Los arquetipos diseñados en esta fase de la

investigación estarán compuestos de una estructura de hormigón armado y un forjado unidireccional, por ser los sistemas estructurales más comunes.

Respecto a la solución estructural dada a la cubierta, los datos confirman que en prácticamente la mitad de los casos se utiliza una cubierta horizontal y en la otra mitad una cubierta inclinada. Puesto que el modelo de cálculo de la demanda que se pretende desarrollar, incluye la producción de energía solar fotovoltaica en el balance final, los arquetipos diseñados de las diferentes tipologías constructivas contarán con cubierta horizontal.

En cuanto a los materiales, el cerramiento cerámico es el más común y la carpintería de aluminio la más habitual (tabla 3.7.). Respecto al solado, más del 58% de las viviendas fueron construidas con un solado de tipo cerámico.

Tabla 3.7. Porcentaje de edificios residenciales por tipo de cerramientos y carpintería.

Fuente: (Ministerio de Fomento, 2008a)

Cerramiento exterior			
Cerámico	Pétreo	Revestimiento o continuo	Otros
58.90%	4.74%	34.72%	1.64%
Carpintería exterior			
Madera	Aluminio	Plástico	Chapa de acero y otros
6.89%	90.18%	1.98%	0.95%
Solado			
Cerámico	Pétreo	Madera	Otros
58.97%	35.57%	4.89%	0.57%

En base a estos datos, se definieron los sistemas constructivos y los materiales que caracterizan los arquetipos (tabla 3.8)

Se comprobó el cumplimiento de la normativa estatal respecto a la limitación del coeficiente U (W/m^2K) de transferencia de calor. El DB-HE del Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2009a) limita la demanda energética de los edificios en función del clima, de la localidad en la que se ubican, mediante la

aplicación de unos valores límite para los parámetros característicos de los cerramientos y de las particiones interiores que componen su envolvente térmica.

El modelo de cálculo propuesto en esta investigación se diseñó para las condiciones climáticas y ambientales de la ciudad de Granada. De acuerdo con los criterios de clasificación del Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación, la ciudad de Granada se corresponde con la zona climática C3 (Ministerio de Fomento, 2009a). Más información acerca de la localización de la ciudad, altura y datos meteorológicos pueden hallarse en el apartado 3.3.1 del presente capítulo.

Para esta zona climática, el valor de transmitancia límite en fachada y cerramientos en contacto con el terreno U_{Mlim} , es de $0.73 \text{ W/m}^2\text{K}$, el valor de transmitancia límite de suelos U_{Slim} es $0.50 \text{ W/m}^2\text{K}$. La transmitancia límite para las cubiertas U_{Clim} es $0.41 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tabla 3.8. Propiedades térmicas de los sistemas constructivos y materiales empleados.

Fuente: elaboración propia.

Elemento	U [W/m²K]	Capa	Espesor [cm]
Losas de cimentación	0.21	Baldosa cerámica	3.0
		Mortero de cemento	2.0
		Lana mineral	5.0
		Hormigón armado	50.0
		Hormigón en masa	5.0
		Arena y grava	10.0
Forjado intermedio	2.30	Baldosa cerámica	3.0
		Mortero de cemento	2.0
		Forjado unidireccional de hormigón armado	30.0
		Enlucido de yeso	1.5
Cubierta	0.37	Plaqueta cerámica	1.0
		Mortero de cemento	4.0
		Lámina asfáltica	1.0
		Lana mineral	8.0
		Lámina asfáltica	1.0
		Hormigón de arcilla expandida	10.0
		Forjado unidireccional	30.0
		Enlucido de yeso	1.5
Fachada	0.68	Mortero de cemento	1.5
		½ pie ladrillo perforado	11.5
		Poliestireno expandido	3.0
		Cámara de aire	2.0
		Tabicón de LH doble	7.0
		Enlucido de yeso	1.5
Partición interior	2.60	Enlucido de yeso	1.5
		Tabicón de LH doble	7.0
		Enlucido de yeso	1.5
Ventana	3.43	Acristalamiento doble con cámara de aire	0.6 + 0.6 + 0.4
		Carpintería de aluminio	-

3.2.4. Obtención de la muestra de estudio

Una vez caracterizados los arquetipos más representativos del sector residencial, se diseñó la muestra de estudio. Para ello, se definió la variable de estudio.

En la sección 2.2 del presente documento de Tesis, se citaba la influencia de la forma del edificio con respecto a la demanda de climatización. Son diversos los estudios que ponen de manifiesto esta relación (Depecker et al., 2001), (Ordóñez & Modi, 2011).

La presente investigación profundiza en el estudio de la relación entre la compacidad del edificio y la demanda energética del mismo para climas cálidos. El índice de compacidad C_{index} se define como el ratio entre el volumen, V (m^3), con respecto a la superficie total de envolvente, A_{ext} (m^2) de todas aquellas superficies expuestas a condiciones externas, como son: la superficie de la fachada, la superficie de la cubierta y la superficie en contacto con el terreno (Ourghi et al., 2007):

$$C_{index} = V/A_{ext} \quad (3.3.)$$

Partiendo de las tres tipologías edificatorias se diseñó una muestra de estudio formada por un total de 85 elementos en los que la compacidad es la variable de estudio.

Tipología edificio de vivienda unifamiliar aislada

En este caso, la muestra está compuesta por un solo elemento formado por un edificio que alberga una sola vivienda. Según los datos analizados de construcción de viviendas, en los edificios de viviendas unifamiliares aisladas la altura media es de dos plantas. Se diseña un edificio aislado de dos plantas de altura y cuya superficie útil y distribución de las zonas térmicas se corresponde con las de la figura 3.4. En la tabla 3.9 se indica la superficie útil en planta, el índice de compacidad y el ratio fachada/suelo del caso de estudio de edificio de vivienda unifamiliar aislado.

Tabla 3.9. Parámetros dimensionales de la tipología de edificio de vivienda unifamiliar aislada.

Fuente: elaboración propia.

Caso de estudio	Nº de viviendas	Altura [nº plantas]	Total área útil [m ²]	Superficie en planta [m ²]	Compacidad (vol. /envolvente)	Fachada/Suelo [%]
Aislada	1	2	151.50	75.75	1.26	137.88

Tipología edificio de viviendas unifamiliares adosadas

La muestra diseñada para esta tipología edificatoria alberga desde un caso formado por dos viviendas adosadas hasta un caso formado por diez viviendas dispuestas en hilera. La superficie útil de cada caso de estudio se corresponde con el resultado de multiplicar la superficie útil de la tipología de vivienda de la tabla 3.5 con el número de elementos considerados, que va desde dos hasta diez. La altura es de dos plantas y permanece constante en todos los casos de estudio.

La figura 3.5 reproduce esquemáticamente los edificios de viviendas adosadas estudiados:

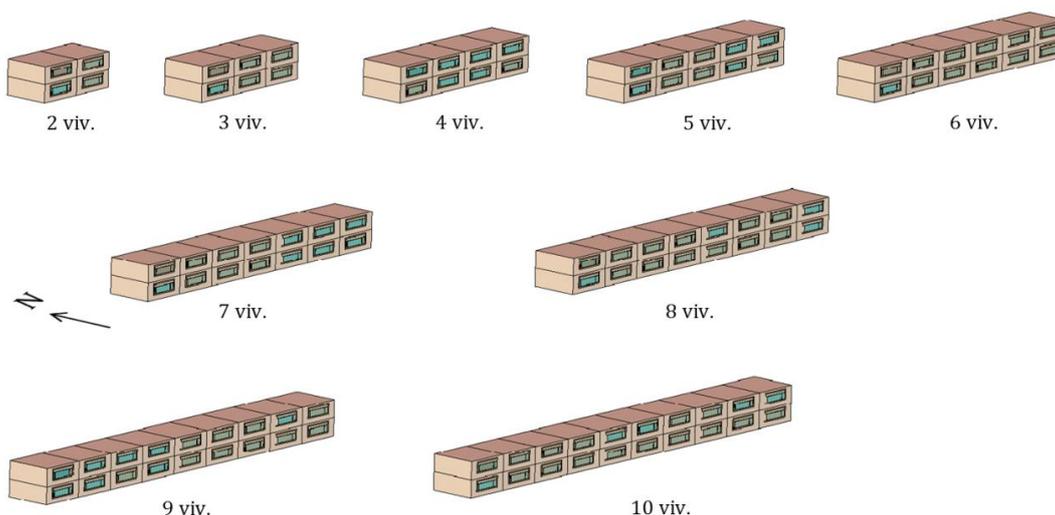


Figura 3.5. Definición de los grupos de viviendas adosadas estudiadas, desde 2 hasta 10 viviendas.

Fuente: elaboración propia.

La superficie total de ventanas por vivienda es constante en todos los elementos de la muestra y se corresponde con la descrita en la tabla 3.6., multiplicándose en cada caso por el número de viviendas del caso de estudio.

En la tabla 3.10 se resumen los parámetros dimensionales para cada caso de la tipología de edificio de viviendas unifamiliares adosadas.

Tabla 3.10. *Parámetros dimensionales de la tipología de edificio de viviendas unifamiliares adosadas.*

Fuente: elaboración propia.

Caso de estudio	Nº de viviendas	Altura [nº plantas]	Total área útil [m ²]	Superficie en planta [m ²]	Compacidad (vol./envolvente)	Fachada/Suelo [%]
	2	2	249.00	124.50	1.40	114.07
	3	2	373.50	186.75	1.49	101.40
	4	2	498.00	249.00	1.54	95.06
	5	2	622.50	311.25	1.57	91.26
Adosada	6	2	747.00	373.50	1.59	88.72
	7	2	871.50	435.75	1.61	86.91
	8	2	996.00	498.00	1.62	85.55
	9	2	1,120.50	560.25	1.63	84.50
	10	2	1,245.00	622.50	1.64	83.65

Los sistemas constructivos y las propiedades de los materiales empleados permanecen fijos en todos los elementos de la muestra.

Tipología de edificio de viviendas plurifamiliar

Con el fin de obtener unos resultados extrapolables a edificios de diferentes dimensiones, se estudiaron diferentes superficies totales de edificios distribuidas en bloques de altura variable.

Se definieron 5 casos de estudio en los que la superficie total útil se corresponde a la de 5, 10, 15, 20 y 25 viviendas. Cada caso de estudio está formado a su vez por

un conjunto de edificios cuya altura va desde una planta hasta un número de plantas igual al número de viviendas que representa. De esta forma, cada edificio tiene un índice de compacidad diferente.

A modo de ejemplo, en el caso de estudio de 5 viviendas en bloque, la superficie total útil es de 366.50 m². Esta superficie se puede distribuir en edificios de 1, 2, 3, 4 y 5 plantas, el máximo posible. Este ejemplo está ilustrado en la figura 3.6. Nótese que en cada edificio, la superficie total útil es la misma pero la altura varía. La superficie en planta del edificio también varía. La figura muestra los planos en alzado, planta y una perspectiva, incluyendo también las principales dimensiones y la orientación.

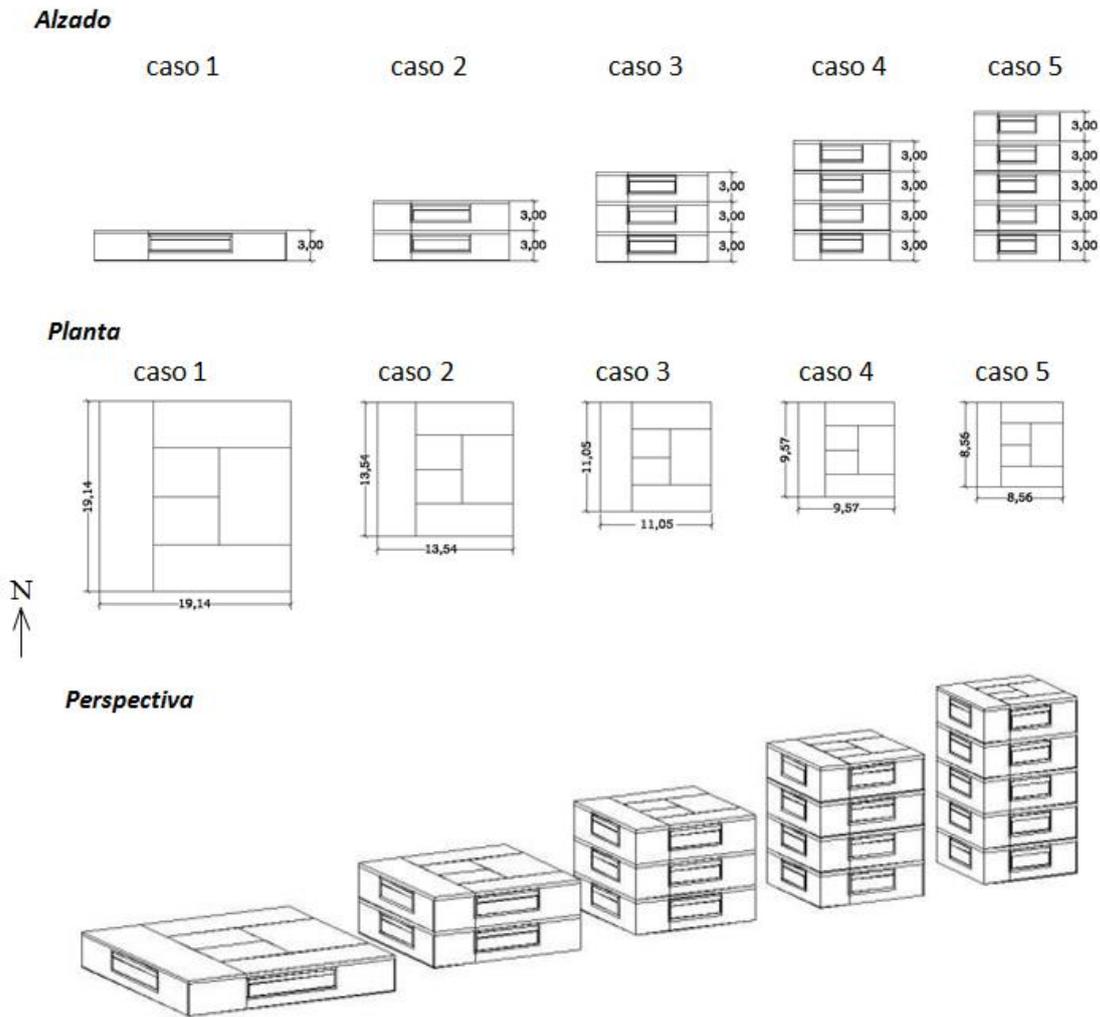


Figura 3.6. Casos de estudio de un edificio que alberga un total de cinco viviendas. El caso 1 tiene una planta de altura, el caso 2 tiene dos plantas de altura, el caso 3 tiene tres plantas de altura, el caso 4 tiene cuatro plantas de altura y finalmente el caso 5 tiene cinco plantas de altura, correspondiente a las cinco viviendas contendías en el bloque. Fuente: elaboración propia.

En cada edificio se conserva la distribución en zonas térmicas de la figura 3.4. La superficie de cada zona térmica es el resultado de multiplicar por el número de viviendas correspondientes.

Así, y para el caso de estudio de un bloque de 5 viviendas, la superficie total útil de salón es el resultado de multiplicar la superficie del salón de una vivienda plurifamiliar de la tabla 3.5. (20.67 m²) por 5 (103.35 m²). En un mismo edificio, todas las plantas conservan la misma distribución.

Adoptando el mismo criterio, la superficie total de ventanas obtenidas de los planos de distribución de la figura 3.4 se reparte de forma equitativa entre las fachadas del edificio.

El WWR permanece constante y es el mismo que el obtenido en la distribución inicial. Los materiales y demás parámetros de diseño y cargas internas se mantienen constantes por vivienda.

En la tabla 3.11 se resumen los parámetros dimensionales de los casos de estudio de bloques de edificios que se corresponden con 5, 10, 15, 20 y 25 viviendas, en función de la altura. Puede observarse que la superficie útil total se corresponde, en cada caso, con el número de viviendas consideradas, mientras que la superficie en planta varía según la altura. Se indica también el valor del índice de compacidad y el ratio fachada/suelo.

Tablas 3.11a y 3.11b. Parámetros dimensionales de los casos de estudio de la tipología de edificios de viviendas plurifamiliares. Fuente: elaboración propia.

Caso de estudio	Altura del edificio [nº plantas]	Total area útil [m ²]	Superficie en planta [m ²]	Compacidad (vol. /envolvente)	Fachada/Suelo [%]
Edificio de 5 viviendas	1	366.50	366.50	1.14	62.8
	2	366.50	183.25	1.59	88.65
	3	366.50	122.17	1.71	108.57
	4	366.50	91.63	1.71	125.36
	5	366.50	73.3	1.67	140.16
Edificio de 10 viviendas	1	733.00	733.00	1.23	44.32
	2	733.00	366.50	1.84	62.68
	3	733.00	244.33	2.09	76.77
	4	733.00	183.25	2.16	88.65
	5	733.00	146.60	2.16	99.11
	6	733.00	122.17	2.11	108.57
	7	733.00	104.71	2.06	117.27
	8	733.00	91.63	2.00	125.36
	9	733.00	81.44	1.93	132.97
	10	733.00	73.30	1.87	140.16
Edificio de 15 viviendas	1	1,099.50	1,099.50	1.27	36.19
	2	1,099.50	549.75	1.98	51.18
	3	1,099.50	366.50	2.32	62.68
	4	1,099.50	274.88	2.45	72.38
	5	1,099.50	219.90	2.48	80.92
	6	1,099.50	183.25	2.46	88.65
	7	1,099.50	157.07	2.41	95.75
	8	1,099.50	137.44	2.36	102.36
	9	1,099.50	122.17	2.29	108.57
	10	1,099.50	109.95	2.23	114.44
	11	1,099.50	99.95	2.17	120.03
	12	1,099.50	91.63	2.11	125.36
	13	1,099.50	84.58	2.06	130.48
	14	1,099.50	78.54	2.00	135.41
	15	1,099.50	73.30	1.95	140.16

Caso de estudio	Altura del edificio [nº plantas]	Total area útil [m ²]	Superficie en planta [m ²]	Compacidad (vol. /envolvente)	Fachada/Suelo [%]
Edificio de 20 viviendas	1	1,466.50	1,466.50	1.30	31.34
	2	1,466.50	733.00	2.08	44.32
	3	1,466.50	488.67	2.48	54.28
	4	1,466.50	366.50	2.66	62.68
	5	1,466.50	293.20	2.73	70.08
	6	1,466.50	244.33	2.72	76.77
	7	1,466.50	209.43	2.69	82.92
	8	1,466.50	183.25	2.64	88.65
	9	1,466.50	162.89	2.58	94.02
	10	1,466.50	146.60	2.52	99.11
	11	1,466.50	133.27	2.46	103.95
	12	1,466.50	122.17	2.40	108.57
	13	1,466.50	112.77	2.34	113.00
	14	1,466.50	104.71	2.28	117.27
	15	1,466.50	97.73	2.23	121.38
	16	1,466.50	91.63	2.18	125.36
	17	1,466.50	86.24	2.13	129.22
	18	1,466.50	81.44	2.08	132.97
	19	1,466.50	77.16	2.04	136.61
	20	1,466.50	73.30	2.00	140.16
Edificio de 25 viviendas	1	1,832.50	1,832.52	1.32	28.03
	2	1,832.50	916.26	2.15	39.64
	3	1,832.50	610.84	2.60	48.55
	4	1,832.50	458.13	2.83	56.06
	5	1,832.50	366.50	2.92	62.68
	6	1,832.50	305.42	2.94	68.66
	7	1,832.50	261.79	2.92	74.17
	8	1,832.50	229.07	2.88	79.29
	9	1,832.50	203.61	2.82	84.10
	10	1,832.50	183.25	2.76	88.65
	11	1,832.50	166.59	2.70	92.97
	12	1,832.50	152.71	2.64	97.11
	13	1,832.50	140.96	2.58	101.07
	14	1,832.50	130.89	2.52	104.89
	15	1,832.50	122.17	2.46	108.57
	16	1,832.50	114.53	2.41	112.13
	17	1,832.50	107.80	2.36	115.58
	18	1,832.50	101.81	2.31	118.93
	19	1,832.50	96.45	2.26	122.19
	20	1,832.50	91.63	2.22	125.36
	21	1,832.50	87.26	2.17	128.46
	22	1,832.50	83.30	2.13	131.48
	23	1,832.50	79.67	2.10	134.44
	24	1,832.50	76.36	2.06	137.33
	25	1,832.50	73.30	2.02	140.16

Todos los elementos de las tablas 3.9, 3.10 y 3.11 conforman la muestra de estudio, formada por un total de 85 arquetipos de edificios, de los cuales 1 corresponde a la tipología de edificio de vivienda unifamiliar aislada, 9 al edificio de vivienda unifamiliar adosada y 75 se corresponden con la tipología edificatoria de bloque de viviendas plurifamiliar.

Orientación de los elementos de la muestra

La superficie y orientación de los huecos en fachada influyen en la demanda energética del edificio (Lollini et al., 2006) (Manioğlu & Yılmaz, 2006). Aquellos edificios de la muestra con planta rectangular – edificios de viviendas aisladas y adosadas – se orientaron con la fachada de mayor superficie orientada al sur, de acuerdo con las reglas habituales de diseño eficiente de edificios en localizaciones en las que predomina la demanda de calefacción.

En el caso de bloques de viviendas, en los que la planta es cuadrada, todas las fachadas son iguales y están orientadas directamente a cada punto cardinal.

3.3. DISEÑO DEL MODELO

Una vez conocida la muestra de estudio y las propiedades constructivas que caracterizan a cada elemento, se procede a diseñar el modelo de cálculo de la demanda energética. Este modelo se compone de dos fases diferenciadas. En la primera fase, se estima la demanda inicial mediante simulación dinámica. En la segunda fase, se precede al cálculo de la capacidad de autogeneración de energía mediante sistemas fotovoltaicos. Los resultados del balance entre ambos se presentan en el capítulo 4 de este documento.

3.3.1. Simulación energética de los casos de estudio

Como se dijo en la sección 2.3 de este documento, el procedimiento estandarizado de cálculo de demanda energética de edificios de la norma ISO 13790, permite el cálculo mediante dos metodologías simplificadas o mediante el empleo de programas de simulación dinámica.

Para el cálculo de la demanda energética de los edificios que componen la muestra de estudio, se empleó el software de simulación energética de edificios EnergyPlus™ (U.S. Department of Energy, 2012).

A continuación se describe el procedimiento de simulación energética con un programa de simulación dinámico y se da información básica acerca del software empleado para ello. Posteriormente se detalla el valor de los datos de entrada requeridos por el software para completar la simulación.

Simulación energética dinámica con EnergyPlus™

Se trata de un programa de análisis de la energía térmica y de simulación de carga, que nació en Estados Unidos a mediados de los 90 como fruto de una iniciativa gubernamental para profundizar en el conocimiento del análisis energético del edificio. Este software, desarrollado por el Departamento de Energía (DOE) y de difusión gratuita, combina las mejores características de otros dos programas previos, BLAST y DOE-2, programas que nacieron como consecuencia de la crisis

energética de los 70. Sin embargo, al contrario que los programas que lo anteceden, EnergyPlus™ no emplea un método de simulación secuencial, sino que realiza la simulación integrada de cargas, sistemas e instalaciones (Crawley et al., 2001).

Este software es a su vez una colección de otros módulos que trabajan de forma conjunta para calcular la demanda energética simulando un edificio y los sistemas energéticos asociados a él. La simulación se fundamenta en un modelo del edificio que, aunque se basa en los principios de transmisión de calor básicos, requiere de un alto nivel de detalle de los datos de entrada para evitar obtener errores o datos falseados.

Al ser un programa de simulación integrada se resuelven de forma simultánea los cálculos con respecto al edificio y los materiales y sistemas que lo componen, en vez de realizar un cálculo secuencial como lo hacían los programas antecesores. La figura 3.7 muestra los diversos módulos que trabajan de forma simultánea durante el cálculo:

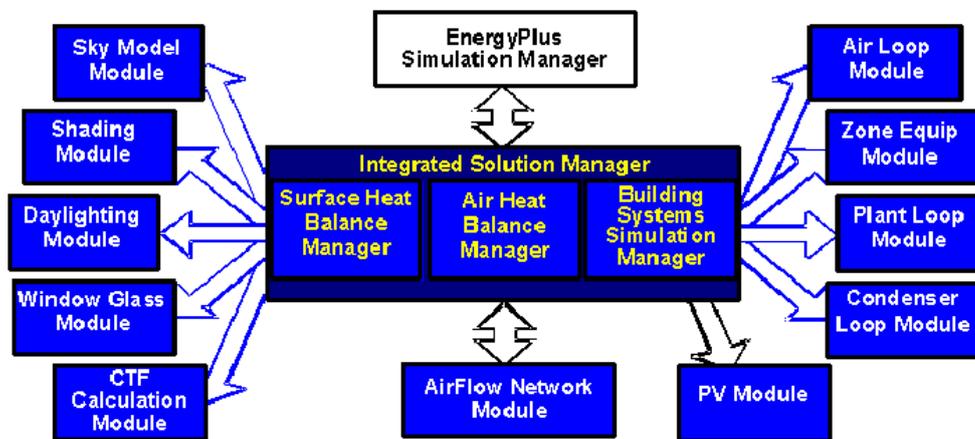


Figura 3.7. Esquema de los módulos de cálculo que componen EnergyPlus™.

Fuente: (EnergyPlus™, 2013)

EnergyPlus™ emplea datos climáticos horarios para el cálculo de las cargas térmicas y permite obtener el consumo debido a la calefacción y la refrigeración,

así como la respuesta eléctrica del sistema. La integración de todos los aspectos involucrados en la simulación permite a los diseñadores evaluar directamente la respuesta dinámica del edificio, en lugar de calcular las cargas y la respuesta paso a paso (E.O.L. Berkeley National Laboratory, 2010). Más información respecto a este software puede consultarse en Crawley et al. (Crawley et al., 2001).

La validez de esta herramienta ha sido probada por numerosas investigaciones científicas (Cardinale, Rospi, & Stazi, 2010a) (A. L. S. Chan, 2011) (Cook & Sproul, 2011) (Lollini, Danza, & Meroni, 2010) (Cardinale, Rospi, & Stazi, 2010b) (Albatici, 2009) (L. Wang, Gwilliam, & Jones, 2009).

Otras ventajas del uso de EnergyPlus™ son:

- En comparación con los programas antecesores, las capacidades de introducción de datos, salida de datos y simulación son más flexibles (Crawley et al., 2001).
- La simulación integrada permite evaluar un mayor número de procesos, tales como control realista de los sistemas, absorción y desorción en los elementos constructivos, sistemas radiantes, flujo de aire entre zonas (Strand et al., 2000).
- Permite definir intervalos de tiempo para la interacción en las zonas térmicas
- Realiza un balance térmico en el que se calcula de forma simultánea los efectos de la radiación y convección.
- Incorpora modelos de confort térmico.
- Incluye modelos de cielo anisotrópico para cálculo de la radiación difusa en superficies inclinadas.
- Ofrece resultados acerca de la contaminación atmosférica provocada por el edificio y su funcionamiento (partículas de CO₂, SO_x, NO_x y CO)

Los resultados se pueden obtener en diversos formatos (*eso, rdd, mdd, err, bnd, mtr, svg, dxf, csv*). Aunque es posible visualizar los resultados en Excel, a medida que se aumenta el periodo de cálculo y se quiere ampliar los datos de salida, la visualización se convierte en más compleja. Para ello, se han desarrollado una serie de softwares o plug-in que permiten una visualización más fácil y práctica. Algunos de estos programas son xEsoView y Dview.

Entrada de datos

EnergyPlus™ está concebido como un motor de simulación o motor de cálculo. De ahí el que permita obtener gran amplitud de datos como resultado. Sin embargo, al ser su principal objetivo el cálculo de multitud de variables, precisa de una interfaz tanto para la entrada como para la lectura de resultados.

En esta investigación se utiliza el software CYPE Instalaciones como interfaz para la definición de la geometría y los materiales del edificio (CYPE Ingenieros, 2012) como interfaz para la definición de la geometría y los materiales del edificio. Este programa está oficialmente reconocido por los creadores de EnergyPlus™ y se combina con él mediante un módulo de exportación. Pueden obtenerse los ficheros *idf* para ser editados o bien emplear EnergyPlus™ directamente como motor de cálculo dentro de CYPE Instalaciones, obteniéndose los informes con los resultados.

Datos meteorológicos

Los datos geográficos y meteorológicos empleados en la simulación corresponden a la ciudad de Granada. Esta ciudad está situada a una altura de 687 m.s.n.m. y su ubicación geográfica es 37°8'13"N de latitud y 3°37'53"O de longitud (Agencia Estatal de Meteorología Ministerio de Medio Ambiente. Medio Rural y Urbano, 2012). Se ha escogido este emplazamiento por presentar un clima mediterráneo continental con importantes diferencias de temperatura entre verano e invierno (ver tabla 3.12.)

Tabla 3.12. Valores climáticos medios mensuales/anuales en Granada, España. Fuente: (Agencia Estatal de Meteorología Ministerio de Medio Ambiente. Medio Rural y Urbano, 2012).

Mes	Tª media [°C]	Tª máxima diaria [°C]	Tª mínima diaria [°C]	Promedio precipitaciones [mm]	Humedad relativa [%]	Número de días con heladas	Promedio de horas de sol [h]
Enero	6.8	12.2	1.3	44	74	13	161
Febrero	8.4	14.1	2.6	36	69	6	161
Marzo	10.7	17.0	4.3	37	62	2	207
Mayo	12.6	18.8	6.4	40	59	0	215
Abril	16.5	23.1	9.8	30	55	0	268
Junio	21.3	28.8	13.9	16	48	0	314
Julio	25.3	33.5	17.1	3	41	0	348
Agosto	25.1	33.2	17.1	3	42	0	320
Septiembre	21.2	28.5	14.0	17	52	0	243
Octubre	15.7	21.9	9.5	40	64	0	203
Noviembre	10.6	16.2	5.1	46	73	3	164
Diciembre	7.9	13.1	2.8	49	76	8	147
<i>Anual</i>	<i>15.2</i>	<i>21.7</i>	<i>8.7</i>	<i>361</i>	<i>60</i>	<i>13</i>	<i>2,751</i>

Datos de ocupación y ganancias internas

El procedimiento dinámico empleado por EnergyPlus™ tiene en consideración las ganancias de calor ocasionadas por las personas que habitan el edificio y el uso del equipamiento del mismo, tales como: iluminación, instalación de gas y equipamiento eléctrico. Para cada una de estas fuentes internas se asocia un índice de ganancia de calor. La ganancia total de calor está compuesta por las ganancias de calor convectivo, radiante y latente de estas fuentes.

El software aplica horarios de ocupación, iluminación y uso de las instalaciones en cada zona térmica. Estos horarios se emplean para estimar no sólo el consumo eléctrico derivado de su uso, sino también, el calor desprendido por estos sistemas para poder integrarlo en el balance térmico.

La figura 3.8 muestra los horarios de uso para las distintas zonas térmicas, identificando personas, iluminación y equipamiento como fuentes térmicas. Las diferencias que se observan en los perfiles de uso de las estancias son apreciables. Estas ganancias internas tienen efecto en el balance energético entre las fuentes de

calor internas y externas y, consecuentemente, en la demanda de calefacción, refrigeración y ventilación, además de la demanda energética debida a la iluminación artificial y el uso de los equipamientos eléctricos.

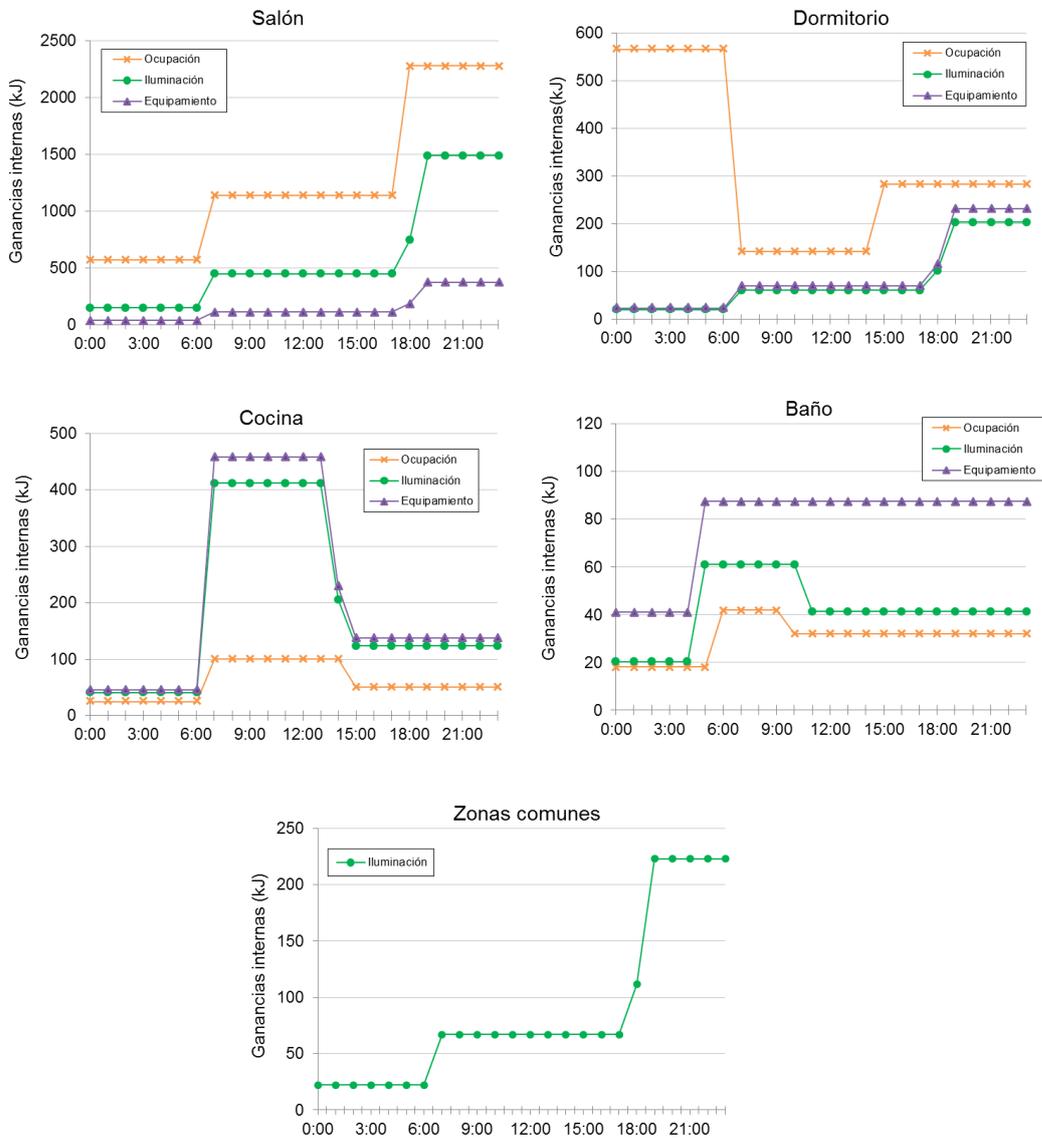


Figura 3.8. Cargas internas en kJ debido a la ocupación, iluminación artificial y uso del equipamiento en cada zona térmica. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3.13 se detallan los valores empleados para el índice de ocupación, potencia de la instalación de iluminación, fuente de iluminación artificial y

potencia del equipamiento de cada zona térmica. Se han empleado unidades por m^2 para que el nivel de ganancias en cada edificio sea proporcional a la superficie.

Tabla 3.13. Ratios de ocupación, fuentes de iluminación artificial y potencias de las instalaciones de iluminación y del equipamiento. Fuente: elaboración propia.

	Ocupación <i>Pers/ m²</i>	<i>W/ m²</i>	Iluminación <i>Fuente</i>	Equipamiento <i>W/m²</i>
Salón	0.30	20.0	lámparas fluorescentes con balasto	5.0
Dormitorio	0.16	4.4	lámpara incandescente estándar	5.0
Cocina	0.03	18.0	lámparas fluorescentes con balasto	20.0
Baño	0.03	4.4	lámpara incandescente estándar	3.0
Zonas comunes	-	4.4	lámpara incandescente estándar	-

Los valores de consigna para el sistema de climatización son 20°C en invierno y 24 °C en verano.

En cuanto al régimen de ventilación, se han seguido las indicaciones establecidas en el Código Técnico de la Edificación (Documento Básico HS-3. Calidad del aire (Ministerio de Fomento, 2009b) para estancias en viviendas. El caudal mínimo de ventilación para el salón será de 3 l/s·persona, para un dormitorio 5 l/s·persona, en las cocinas 2 l/s·m² más 15 l/s por local y en los baños de 15 l/s por local. El número de ocupantes de cada estancia es igual a uno en los dormitorios individuales, dos en los dormitorios dobles y para el caso del salón se consideró una ocupación equivalente a la suma de lo contabilizado para los dormitorios. Estas unidades fueron traducidas a unidades por superficie para mantener los mismos requerimientos de ventilación en todos los edificios.

El nivel de fugas por infiltración de cada tipología, se corresponde con los valores medios recogidos en la norma *UNE-EN 15242:2007, Ventilación de los edificios. Métodos de cálculo para la determinación de las tasas de los caudales de aire en edificios, incluyendo la infiltración* (Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2007), tomando un valor de 1.5 renovaciones por hora a 10Pa en viviendas unifamiliares y 0.8 renovaciones por hora a 10Pa en viviendas en edificios plurifamiliares.

En el proceso de simulación que se ha explicado en esta sección se han adoptado los valores reglamentados por la normativa española, el Código Técnico de la Edificación y otras instrucciones. Cuando no ha sido posible usar valores reglados por estos documentos se ha empleado, como valores de referencia, los presentes en literatura científica publicada y que trata sobre simulación de edificios, como sería el caso del estudio de Tavares and Martins, la simulación desarrollada por Ordenes et al., y la investigación de Albatici (Tavares & Martins, 2007), (Ordenes et al., 2007), (Albatici, 2009)

3.3.2. Diseño del sistema fotovoltaico

Una vez realizada la simulación energética de los edificios, se procedió al cálculo de la contribución de los sistemas de energía solar fotovoltaica. Estos sistemas ocupan el total de la superficie de cubierta y el 50% de la fachada sur de cada edificio estudiado.

En primer lugar se diseñó la instalación. El panel escogido es un panel fotovoltaico monocristalino común, cuyas propiedades bajo condiciones estándar de prueba se resumen en la tabla 3.14.

Tabla 3.14. Propiedades del panel fotovoltaico. Fuente: elaboración propia.

Tipo de célula	Dimensiones (m)			Potencia máxima (W)	Tensión en circuito abierto (V)	TONC ^b (°C)
	ancho	largo	espesor			
Monocristalino con capa antirreflexiva (nitruro de silicio)	1.047	1.600	0.04	220 ±3%	47.9	47

El método de diseño empleado para el cálculo de la energía generada en el sistema, se basa en la siguiente ecuación (ec. 3.4.) (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2011):

$$E_p = G_{dm}(\alpha, \beta) \times P_{mp} \times \frac{PR}{G_{CEM}} \quad (3.4)$$

donde E_p es la energía generada por el sistema en kWh/día; $G_{dm}(\alpha, \beta)$ es el valor medio de irradiación sobre el generador solar expresado en kWh/m²día; P_{mp} es la potencia pico del generador en condiciones estándar (*Standard Test Conditions, STC*), expresada en kWh; PR es el ratio de rendimiento; G_{CEM} es 1 kWh/m². El coeficiente G_{CEM} es un coeficiente de paso que permite obtener la energía por m² teniendo en cuenta que el valor de P_{mp} . Se obtiene para las placas fotovoltaicas en condiciones estándar, a 25°C de temperatura de la célula, irradiancia de 1.000 W/m² y distribución espectral de la radiación incidente AM 1.5 (masa de aire).

Establecida la ecuación de cálculo de la producción energética, se definen los parámetros de inclinación y orientación junto con el porcentaje de pérdidas de radiación.

El ángulo de inclinación β corresponde al ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal y su valor está entre 0° y 90°. En este caso se ha escogido la inclinación óptima para un periodo de diseño anual $\beta_{opt} = \Phi - 10$,

^b TONC: Temperatura de Operación Nominal de la Célula, conocida como NOCT por sus siglas en inglés (*Nominal Operating Cell Temperature*), es un parámetro que se define como la temperatura que alcanzan las células solares bajo las siguientes condiciones de operación: irradiancia de 800 W/m², temperatura ambiente 20°C, AM1.5 (masa de aire), y velocidad del viento: 1m/s

siendo Φ la latitud del lugar de diseño (Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), 2009). Un ángulo de inclinación menor no es aconsejable ya que favorece la acumulación de polvo en el panel (Leloux, Narvarte, & Trebosc, 2012).

El ángulo de azimut α define el ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar y sus valores se encuentra en el intervalo $[-90^\circ, 90^\circ]$. Se ha empleado un valor de $\alpha = 0$ para los cálculos.

El porcentaje de pérdidas considerado es del 12%, que corresponde a la dispersión en los módulos (3%), al ensuciamiento e incidencia no perpendicular (4%) y al sombreado (5%).

Se calcula el número total de módulos según la superficie de cubierta y fachada disponible para cada uno de los casos. La distancia d entre paneles cumple la ecuación 3.5 (Ordóñez, Jadraque, Alegre, & Martínez, 2010):

$$d = \frac{h}{\tan(61^\circ - \Phi)} \quad (3.5)$$

siendo h el valor de la altura del panel con la inclinación óptima y Φ la latitud.

3.4. RESULTADOS

Una vez conocidas las demandas energéticas y la energía fotovoltaica potencial para las configuraciones edificatorias, es necesario calcular el balance global de energía y las posibilidades reales de reducir y/o eliminar la dependencia energética de fuentes no renovables en edificios residenciales.

En esta sección, se presentan en primer lugar, los resultados de la demanda energética de las tres tipologías residenciales estudiadas, obtenidas mediante la simulación dinámica con el software EnergyPlus™. Se analizan los perfiles de demanda de climatización para cada caso estudiado y las diferencias obtenidas según la altura del edificio.

Posteriormente, se muestran los resultados del balance energético entre la demanda y la producción de energía para cada tipología y se proponen las funciones matemáticas que se ajustan a los resultados obtenidos.

Finalmente, se procede a la validación del modelo mediante el test de análisis de la varianza (ANOVA) realizado bajo diferentes supuestos y se explica la consolidación de las hipótesis.

3.4.1. Resultados de la simulación con EnergyPlus™

A continuación se presenta un análisis detallado de los resultados de la demanda de climatización que se obtuvieron para cada caso de estudio descrito tras la simulación con EnergyPlus™.

Demanda de climatización de los edificios de viviendas unifamiliares:

Los resultados de la simulación energética muestran que, de las dos tipologías edificatorias de vivienda unifamiliares que se estudiaron, la demanda de la vivienda aislada es mayor que cualquiera de las configuraciones de viviendas adosadas.

En la figura 3.9 se realiza una comparación de la demanda de calefacción y refrigeración por superficie, para las tipologías aislada y adosada. Se han indicado los porcentajes de reducción de la demanda con respecto a la vivienda aislada.

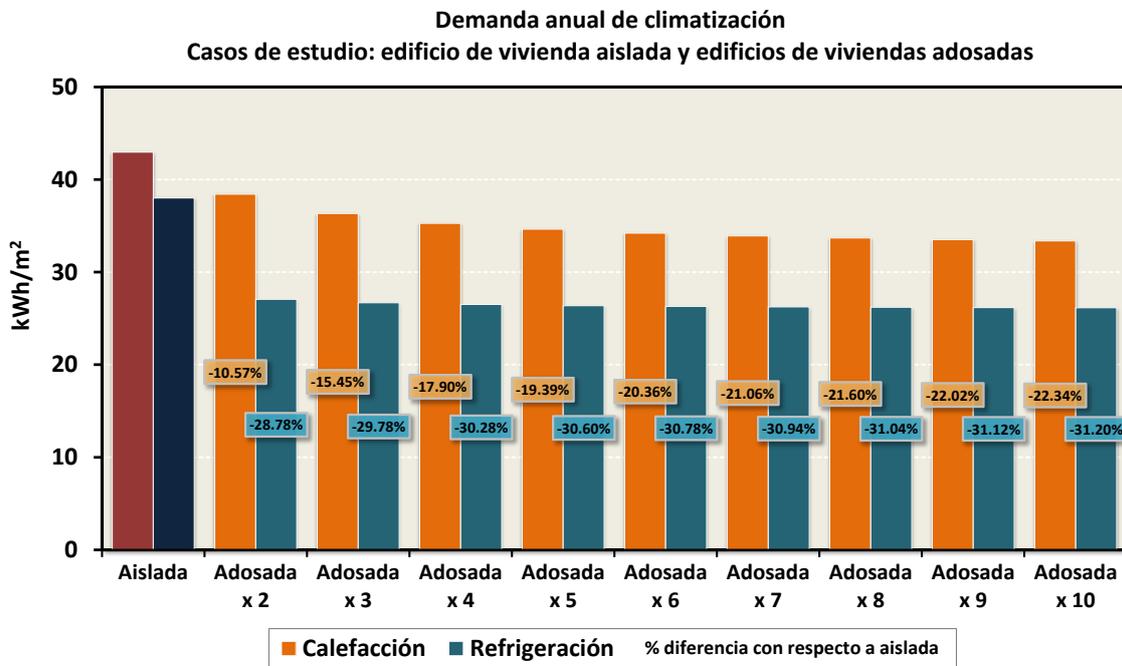


Figura 3.9. Demanda de climatización y diferencia con respecto al edificio de vivienda aislada.

Fuente: elaboración propia.

En la tipología adosada, la demanda de climatización disminuye según aumenta el número de viviendas dispuestas en hilera. Las mayores reducciones de demanda de calefacción, con respecto a la tipología aislada, se obtienen en los casos para 2, 3, 4 y 5 viviendas adosadas. Para refrigeración, las mayores reducciones de demanda se dan en los supuestos de 2 y 3 viviendas adosadas. Después de estos supuestos, la demanda por m² prácticamente se estabiliza.

Según se observa en este gráfico, situar las viviendas unifamiliares en edificios de viviendas adosadas, permite reducir la demanda de calefacción hasta en un 22% y la de refrigeración en más del 31% para el caso más favorable.

A continuación se expone una comparación sobre los resultados de la demanda diaria de calefacción para estos casos de estudio (Ver figuras 3.10 y 3.11).

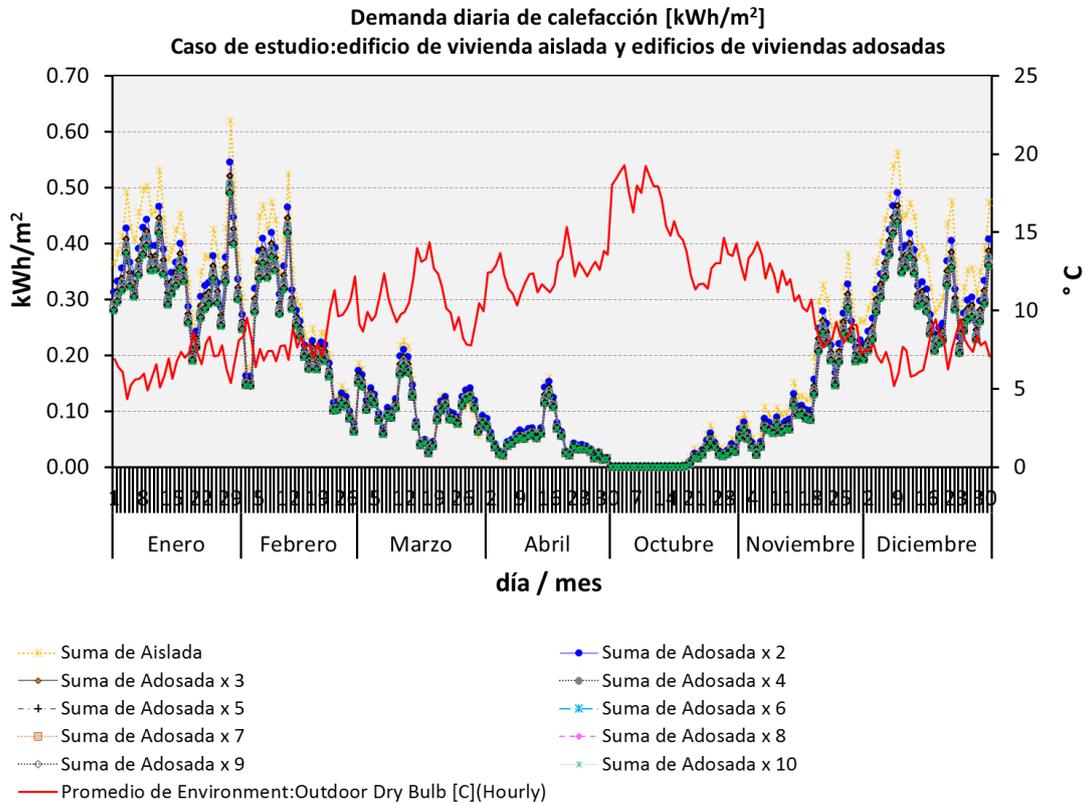


Figura 3.10. Demanda diaria de calefacción del edificio de vivienda aislada y los edificios de viviendas adosadas según la variación de la temperatura exterior. Fuente: elaboración propia.

Se aprecia que el perfil de la demanda del edificio de vivienda aislada es generalmente más elevado. De entre los edificios de viviendas adosadas, los casos de 2 y 3 viviendas muestran unos picos de demanda más elevados que el resto, especialmente frente a bajas temperaturas.

Con respecto a la demanda de refrigeración, la diferencia de demanda entre el edificio de vivienda aislada y el resto es mucho mayor que la que existía en la calefacción. En gran parte de los días refrigerados, la demanda del edificio de vivienda aislada supera al resto, excepto cuando se producen grandes descensos de la temperatura exterior.

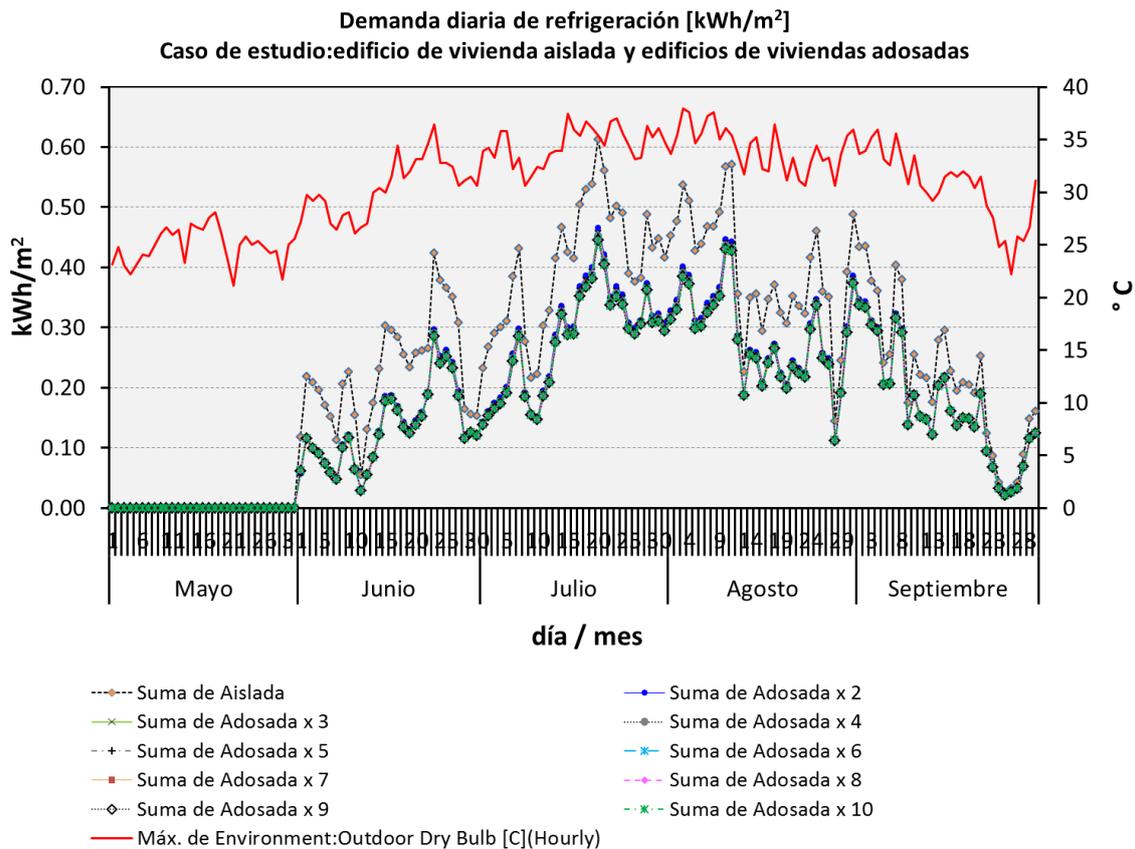


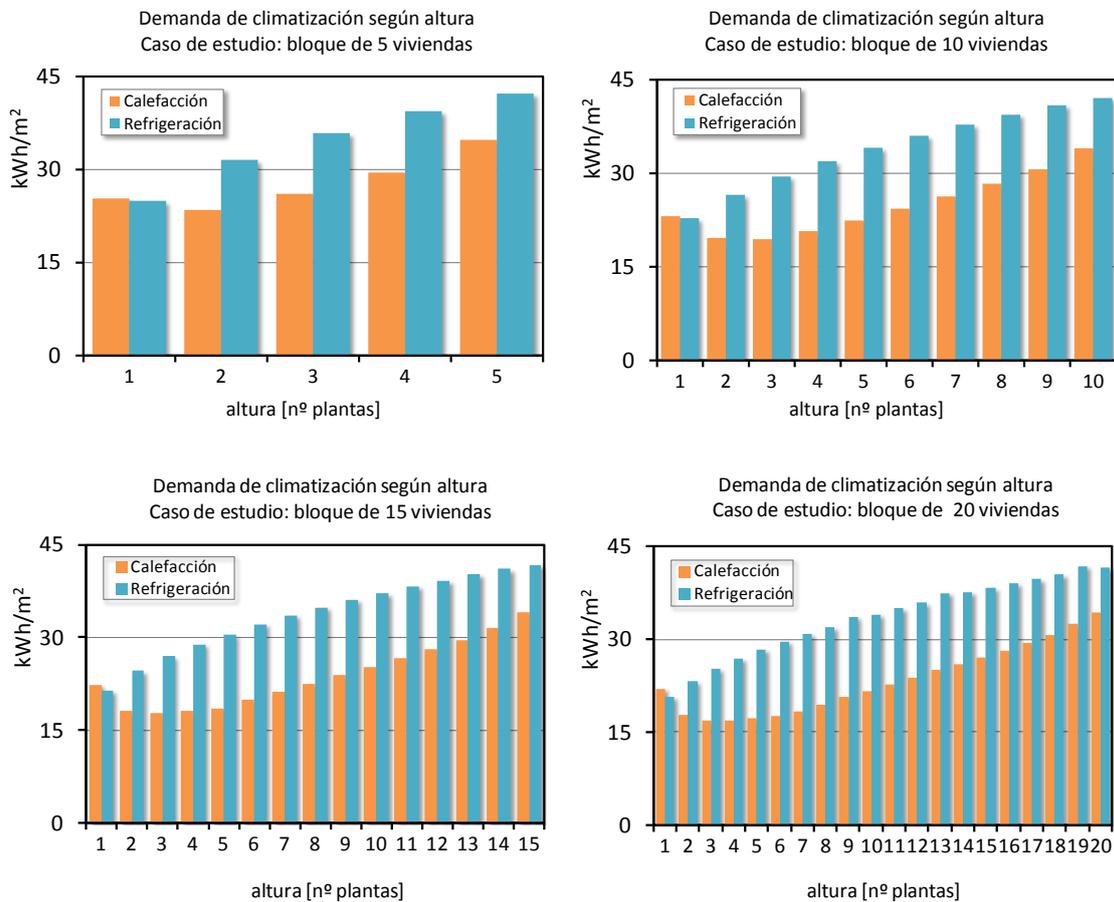
Figura 3.11. Demanda diaria de refrigeración del edificio de vivienda aislada y los edificios de viviendas adosadas según la variación de la temperatura exterior. Fuente: elaboración propia.

Los resultados confirman que el edificio de vivienda aislada es la tipología de vivienda unifamiliar que consume más energía debido a la climatización. En relación con la tipología adosada, la demanda de calefacción es sensible al número de viviendas y disminuye según se añaden más viviendas. El consumo energético se puede reducir hasta en 5 kWh/m². Esto es debido a una disminución de las pérdidas por calor. Por otra parte, la demanda de refrigeración varía muy poco entre los edificios de viviendas adosadas. Esto es consecuencia de que la demanda de refrigeración de viviendas dispuestas en hilera no depende tanto del número de viviendas y la superficie del edificio, tal y como sucedía con la calefacción (ver figura 3.10).

Se realiza la apreciación de que los edificios de 2 y 3 viviendas adosadas muestran picos de demanda de calefacción mayores que el resto.

Demanda de climatización de los edificios plurifamiliares:

En las gráficas de la figura 3.12 se muestran los resultados de la demanda de climatización obtenidos en la simulación con EnergyPlus™, para cada uno de los casos de estudio de edificios plurifamiliares de viviendas en bloque. El eje horizontal representa el número de plantas en altura del edificio y el eje vertical la demanda en kWh/m² de superficie útil.



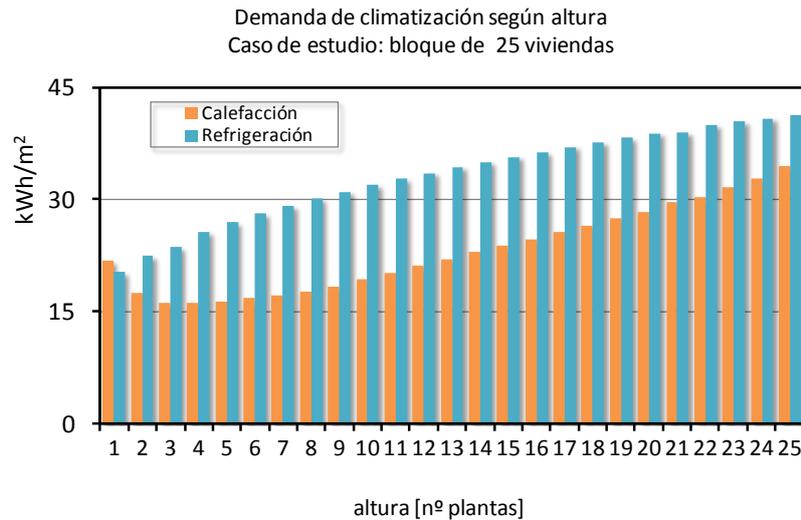


Figura 3.12. Demanda de calefacción y refrigeración según el número de plantas en altura para cada caso de estudio de bloque de viviendas plurifamiliar. Fuente: elaboración propia.

Tal y como puede observarse, ambas demandas presentan diferentes tendencias. A continuación se realiza un análisis por separado de cada una.

Demanda de calefacción

La energía demandada por un edificio para mantener las condiciones de temperatura interior requeridas, está fuertemente condicionada con el nivel de transmisión térmica de la superficie que compone su envolvente, principalmente cubierta y fachada.

Parte del modelo desarrollado en esta investigación se basa en el estudio de la altura del edificio. Para poder analizar la evolución de la demanda entre los edificios de la muestra diseñada, se va a comparar en base al ratio fachada/suelo de cada uno. El uso de este parámetro permite que las conclusiones puedan ser extrapolables a otros edificios cuya superficie y altura no sean los de nuestra muestra pero cuyo ratio fachada/suelo sea cercano a los del estudio

En los grupos de edificios en bloque estudiados, la proporción de fachada con respecto al suelo aumenta conforme lo hace la altura del edificio (ver tabla 3.11)

Los resultados de la simulación dinámica revelan que, para cada grupo de edificios, la función que representa la demanda de calefacción sigue una determinada función según aumenta el valor del ratio fachada/suelo (ver figura 3.13). Entiéndase por suelo el total de superficie útil.

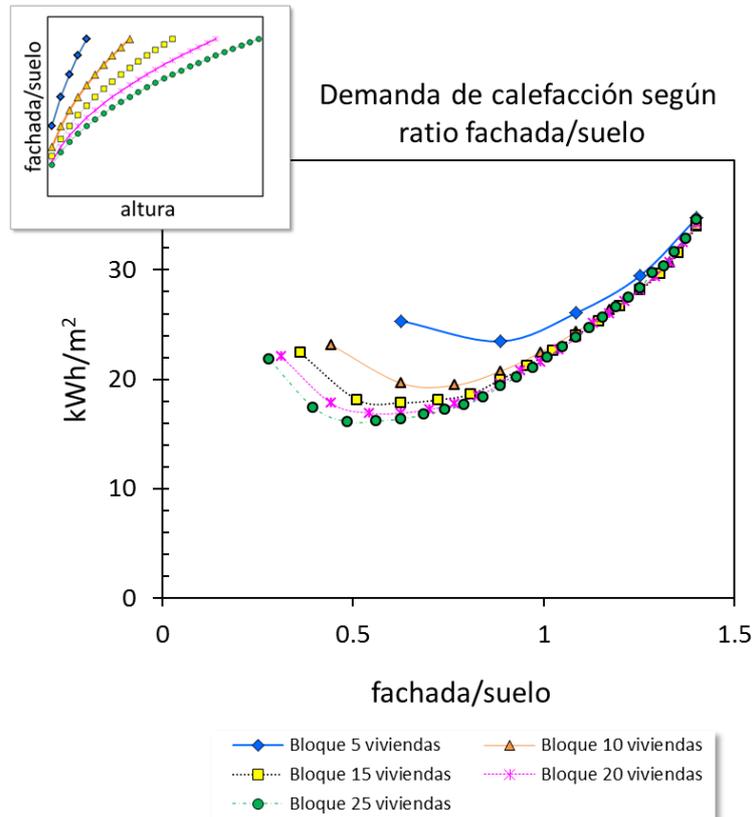


Figura 3.13. Demanda de calefacción según el ratio fachada/suelo.

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados muestran que, para una superficie útil dada, existe un ratio fachada/suelo (y por tanto una altura del edificio) en la que la demanda de calefacción alcanza su mínimo.

Siendo x el ratio fachada/suelo de cada edificio, pueden obtenerse las funciones polinómicas para la demanda de calefacción (y) esperada. En la tabla 3.15 se recogen estas funciones y el coeficiente de determinación R^2 para cada bloque de viviendas estudiado.

Tabla 3.15. Funciones polinómicas ajustadas de demanda de calefacción.

Fuente: elaboración propia.

Caso de estudio	Ecuación polinómica ajustada de demanda de calefacción (y) [kWh/m ²]	Valor R ²
Bloque 5 viviendas	$y = 35.446x^2 - 59.688x + 48.768$	0.9976
Bloque 10 viviendas	$y = 31.454x^2 - 46.155x + 36.884$	0.9918
Bloque 15 viviendas	$y = 29.318x^2 - 39.495x + 31.738$	0.9876
Bloque 20 viviendas	$y = 28.606x^2 - 36.478x + 29.188$	0.9883
Bloque 25 viviendas	$y = 27.889x^2 - 33.875x + 27.203$	0.9881

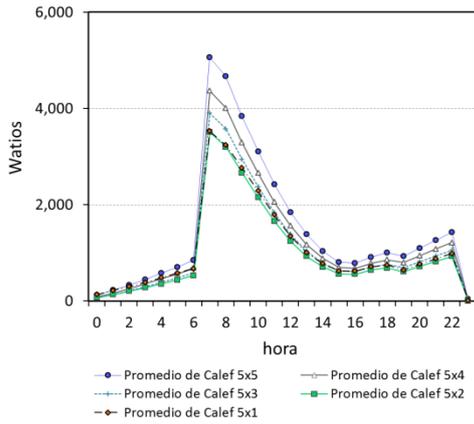
Este conjunto de funciones permite, a partir del valor del ratio fachada/suelo, estimar la demanda de calefacción.

A continuación se expone una discusión sobre los resultados horarios y diarios de la demanda de calefacción expuestos en las gráficas de las figuras 3.14 y 3.15. Debe clarificarse en este punto que sólo se muestran los datos con respecto a los meses de octubre a marzo que coinciden con el periodo calefactado. En los gráficos de la figura 3.14 se muestra el valor promedio de la demanda horaria.

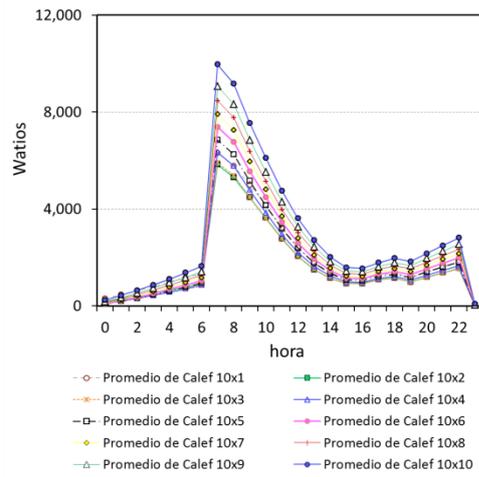
Todos los edificios conservan el mismo patrón de demanda. El pico de máxima demanda se produce a las 7 h y coincide con el inicio de actividad en la vivienda. La demanda cae progresivamente hasta las 19 h, momento en el que se reinicia la ocupación del hogar y vuelve a crecer la demanda interior.

Sin embargo, puede apreciarse que el valor de la demanda pico siempre es más elevado en los edificios más altos de su serie (serie de datos marcada en azul en los gráficos). Por otra parte, en los edificios de 2 y 3 alturas, la curva de demanda se suaviza y los picos alcanzan el mínimo valor (color verde en el gráfico).

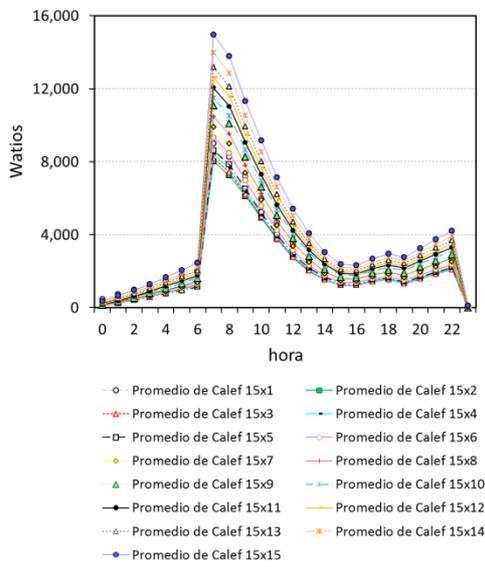
Promedio horario demanda de calefacción [W]
Caso de estudio: bloque de 5 viviendas



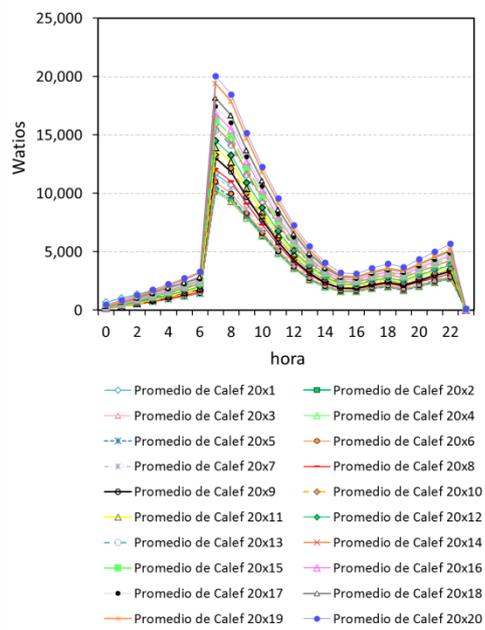
Promedio horario demanda de calefacción [W]
Caso de estudio: bloque de 10 viviendas



Promedio horario demanda de calefacción [W]
Caso de estudio: bloque de 15 viviendas



Promedio horario de demanda de calefacción [W]
Caso de estudio: bloque de 20 viviendas



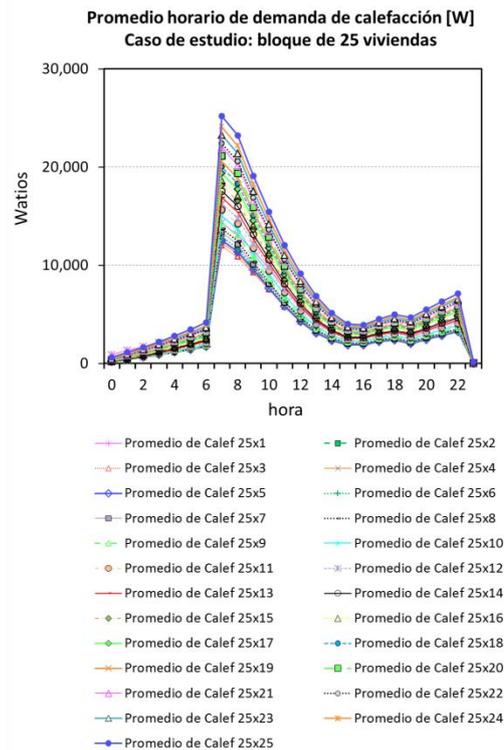
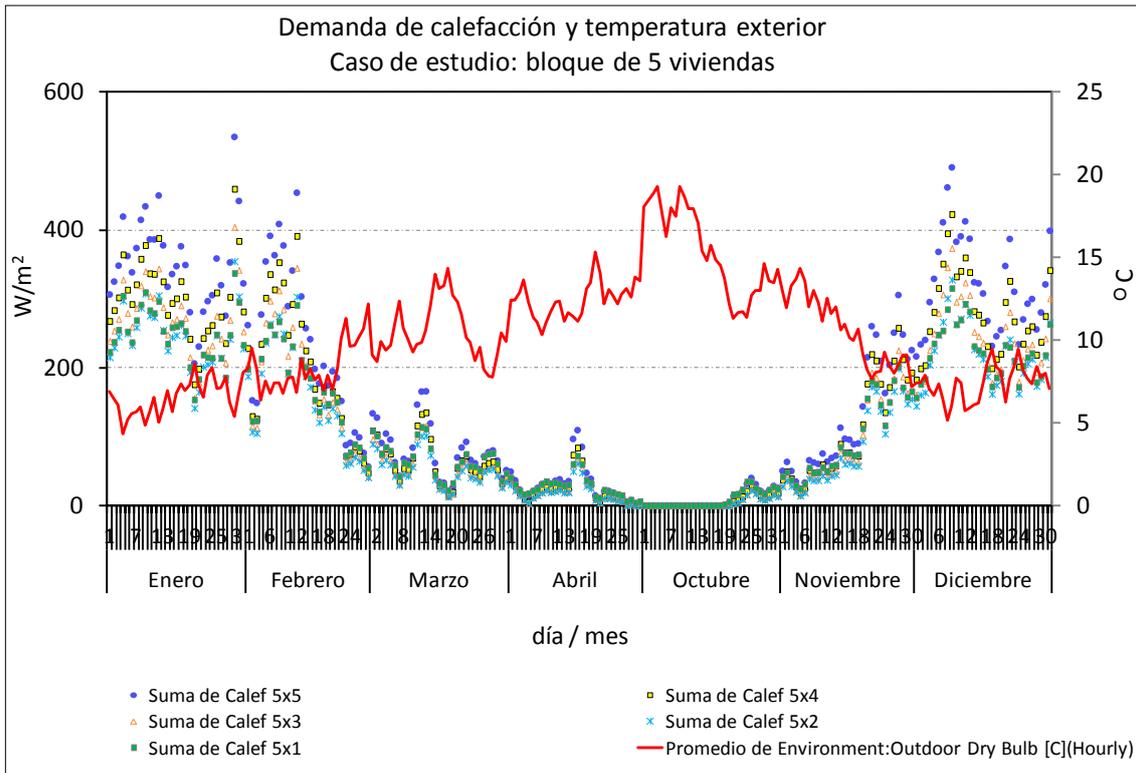


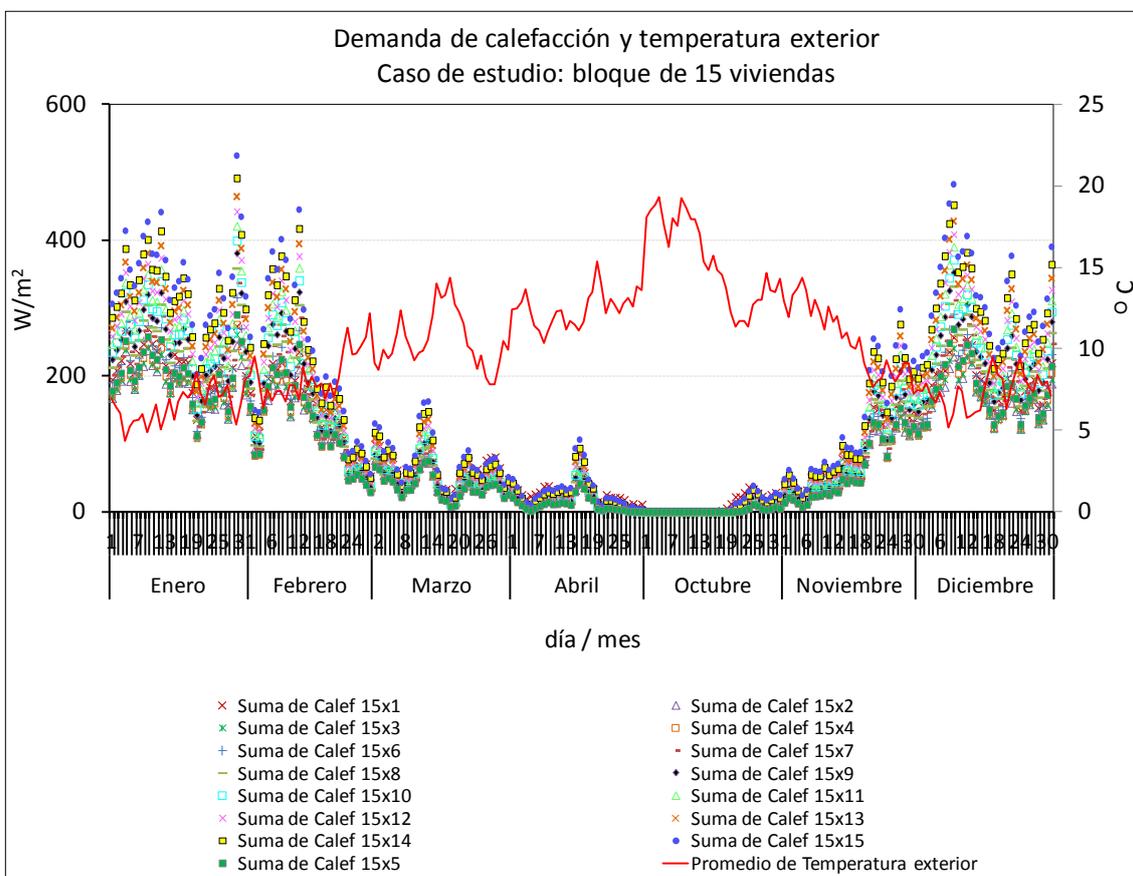
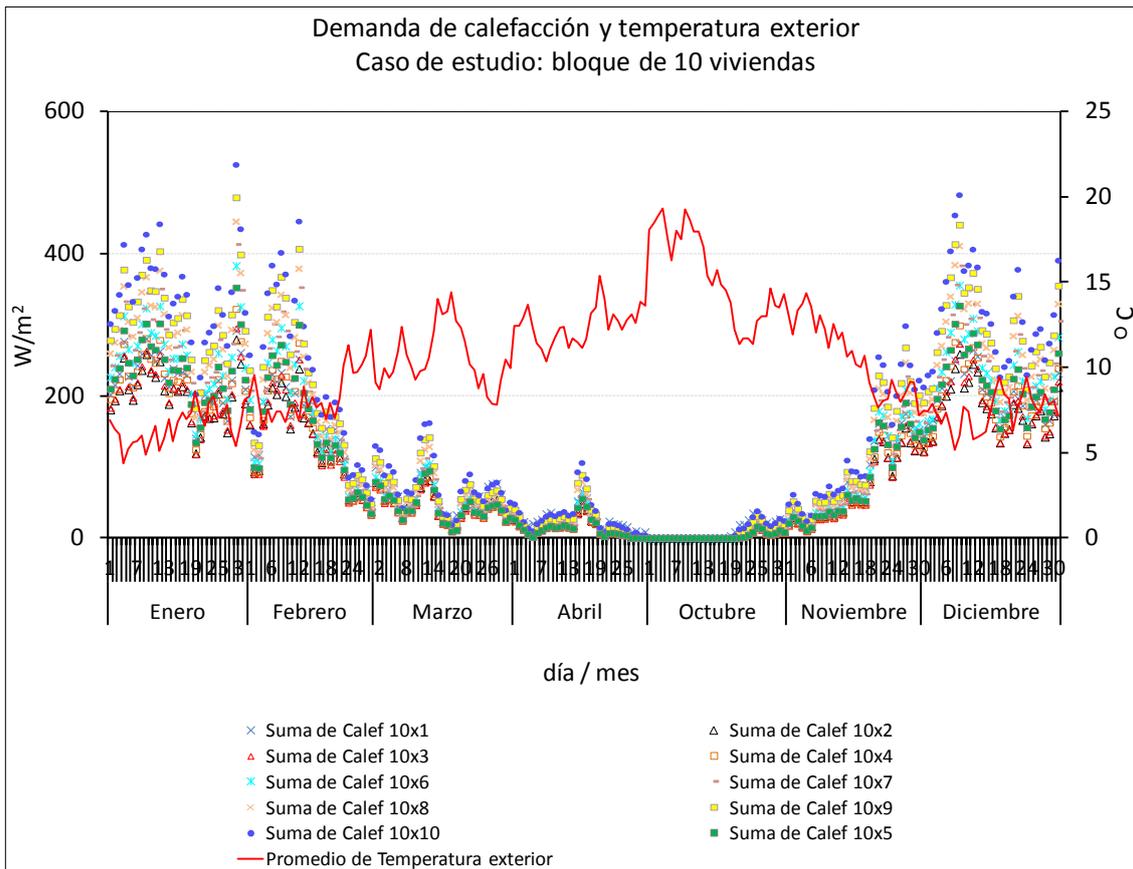
Figura 3.14. Promedio horario de demanda de calefacción para todos los casos de estudio según el número de viviendas y altura. Fuente: elaboración propia.

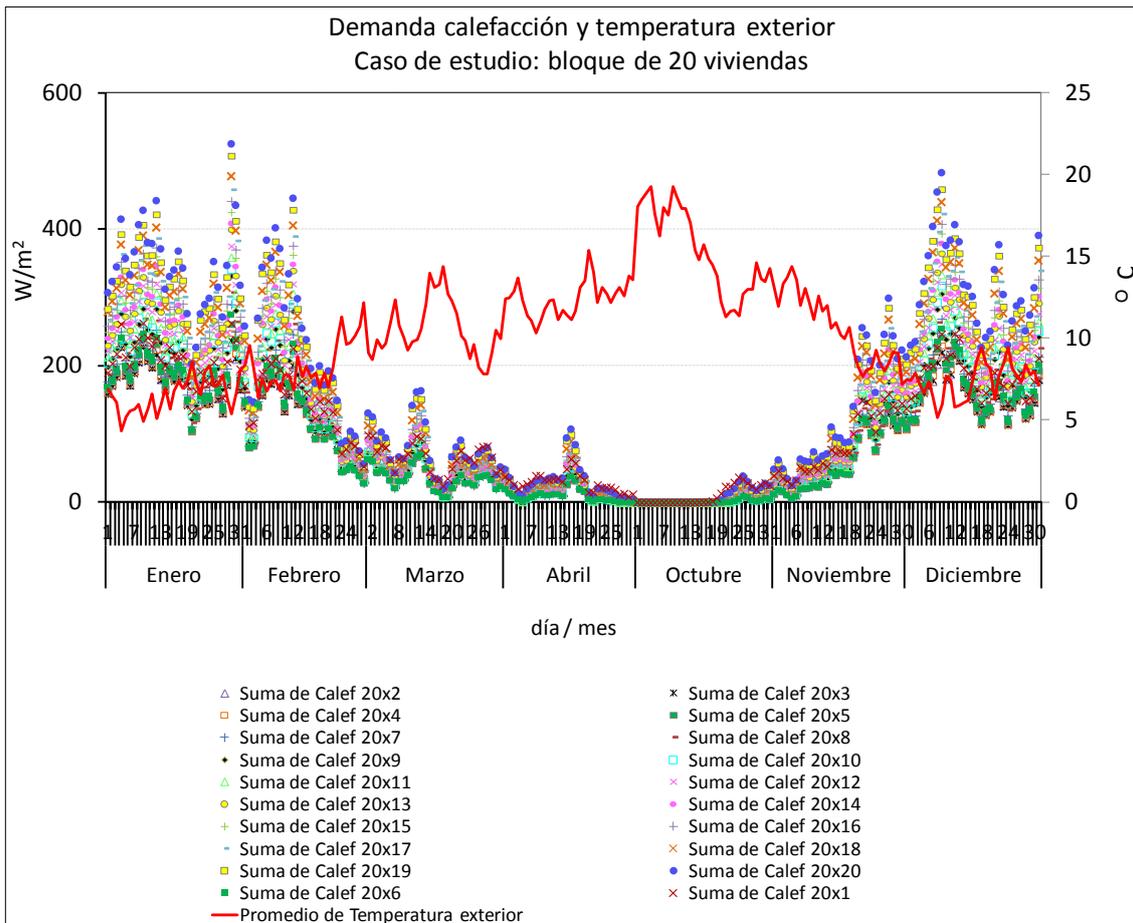
En base a estos datos, puede afirmarse que, los edificios de más altura son más sensibles a las pérdidas de calor, especialmente durante la noche. Por ello, el valor de la demanda al inicio del periodo de calefacción es más elevado que el resto. En contraposición a este hecho, podría afirmarse que el edificio más bajo tendría que presentar los picos de demanda mínimos. Sin embargo, esto no es así debido a que, aunque la superficie de fachada es la mínima posible, la superficie de cubierta es elevada, produciéndose un aumento de las pérdidas a través de la misma. Todo ello referido a valores relativos de demanda por vivienda.

Es en los edificios de entre 2 y 4 plantas de altura donde se observan los menores picos de demanda, como resultado de un equilibrio entre el volumen interior y la superficie de fachada y cubierta expuesta al exterior.

A continuación se muestra la variación de la demanda mensual de calefacción. En cada gráfica se representa la demanda diaria, en W/m^2 , a lo largo del periodo de tiempo en el cual se usa la calefacción (figura 3.15). La línea roja representa el promedio de la temperatura exterior.







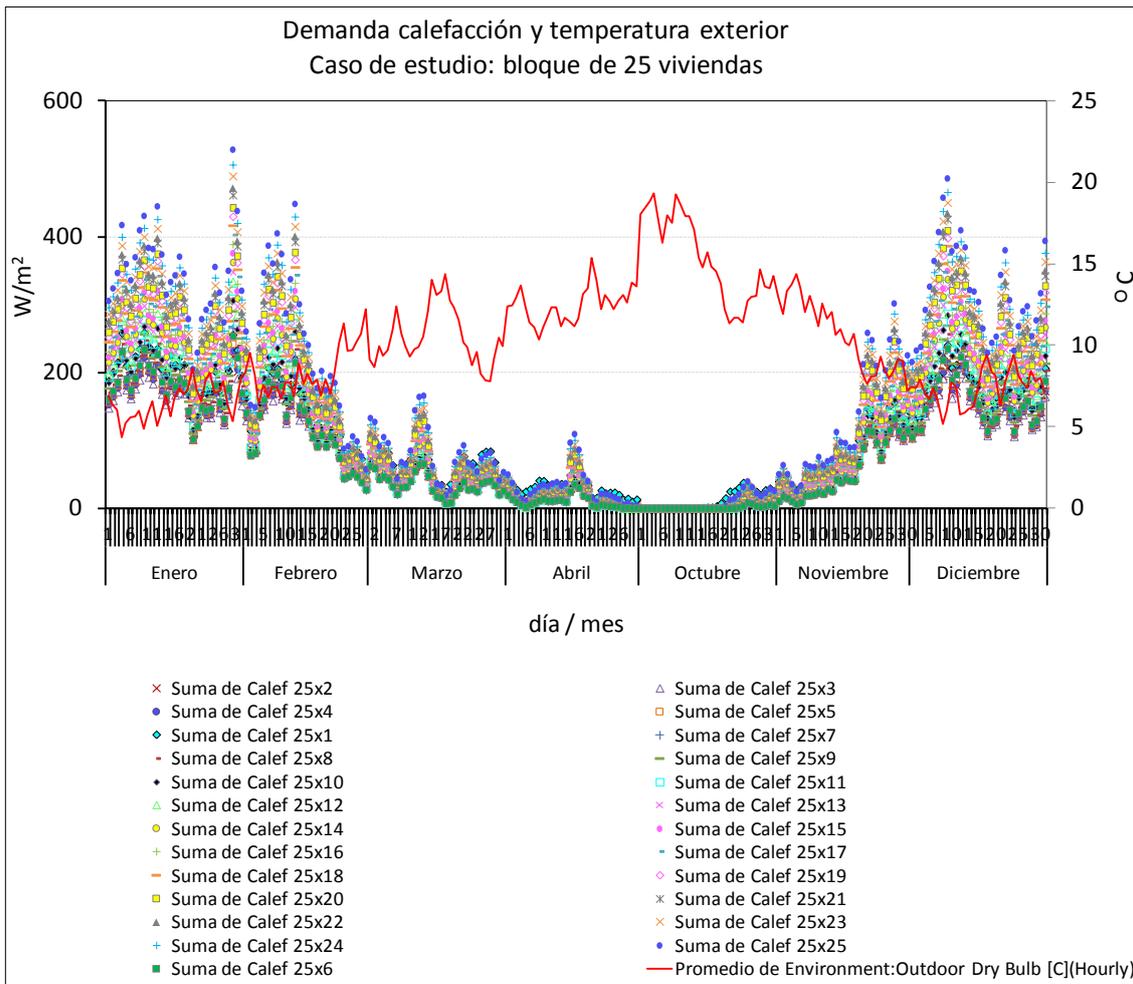


Figura 3.15. Demanda diaria de calefacción y promedio de temperatura exterior para todos los casos de estudio según el número de viviendas y altura. Fuente: elaboración propia.

Los datos de estas gráficas indican que los edificios de más altura son más sensibles a los descensos bruscos de la temperatura exterior. Esto es consecuencia de que los edificios altos, con mayor superficie de fachada expuesta al exterior, tienen menor inercia térmica y son más sensibles a los cambios de temperatura.

Aquellos edificios de altura intermedia, en torno a las 5 o 6 plantas, son los que muestran los valores de demanda más reducidos.

Es apreciable en estas gráficas, que la dispersión de datos es mayor en los casos de edificios más altos. Se lleva a cabo un análisis de la dispersión de los datos de la demanda de calefacción con respecto a un valor promedio. Para ello se calcula el valor de la desviación típica, que es una medida de la dispersión y que permite

determinar el promedio aritmético de la fluctuación de los datos respecto a su punto central o media.

A continuación se muestran los valores de la desviación típica según el ratio fachada/suelo del edificio (ver figura 3.16). Estos resultados confirman que el valor de la dispersión entre los datos de la demanda de calefacción, es mayor significativa en los edificios con mayor valor del ratio fachada/suelo.

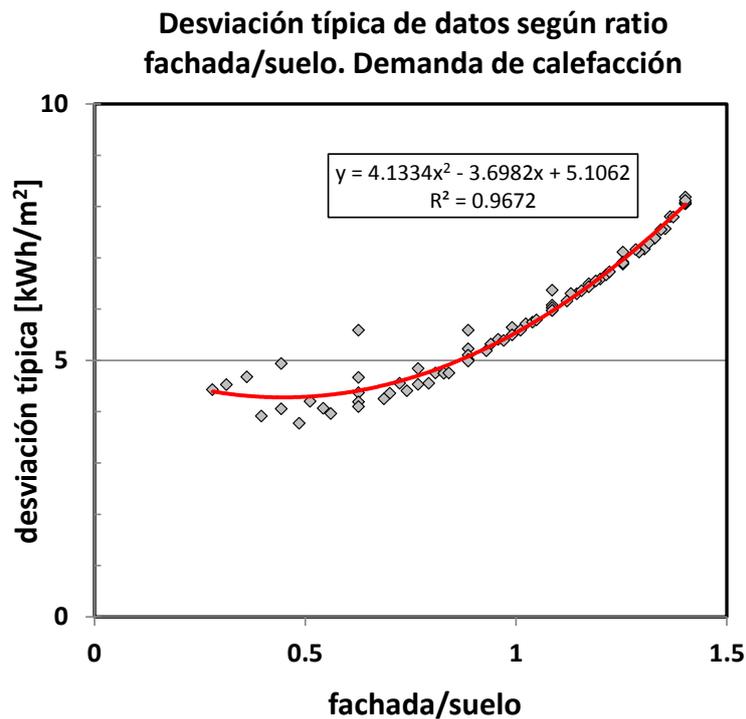


Figura 3.16. Valor de desviación típica según el ratio fachada/suelo.

Fuente: elaboración propia.

Los datos del gráfico anterior indican que existe una relación entre la proporción fachada/suelo y el valor de desviación típica de los datos de demanda calculada. Para obtener unas conclusiones más detalladas al respecto, se estudió el valor de desviación típica para cada superficie total útil (figura 3.17)

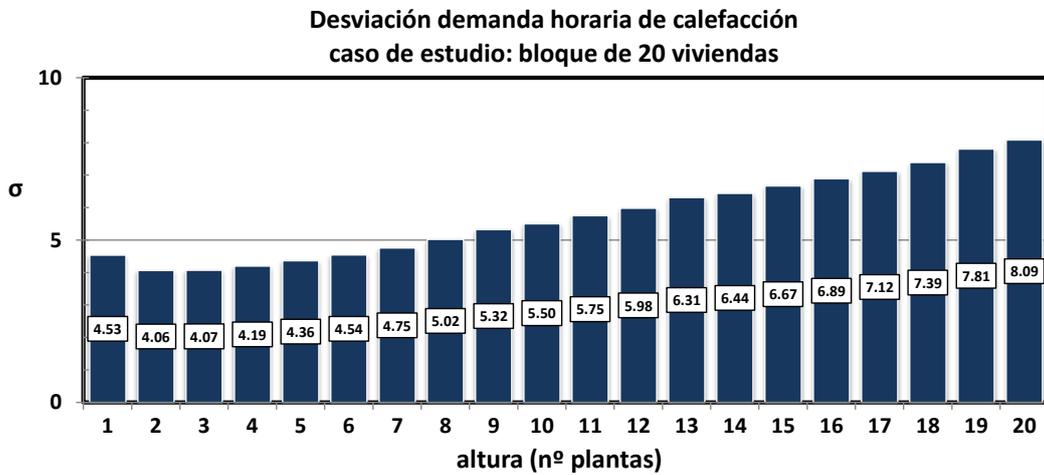
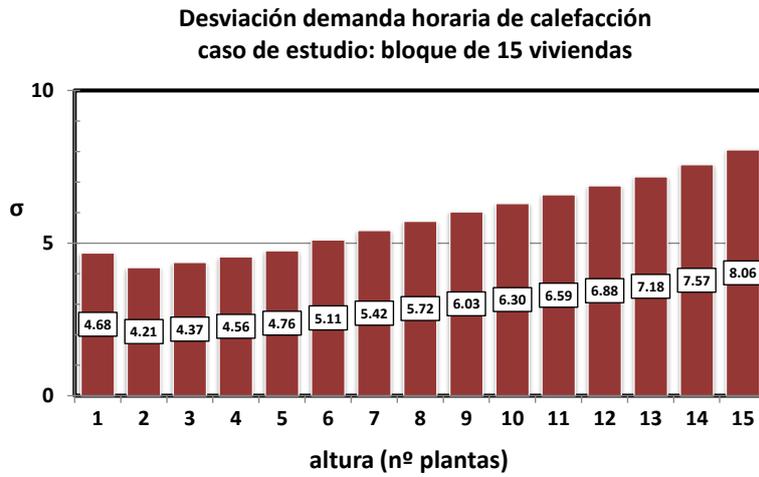
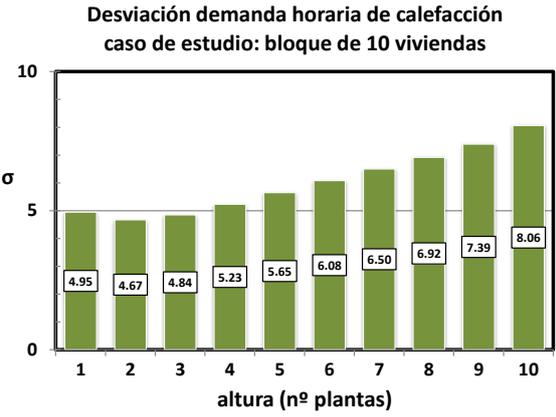
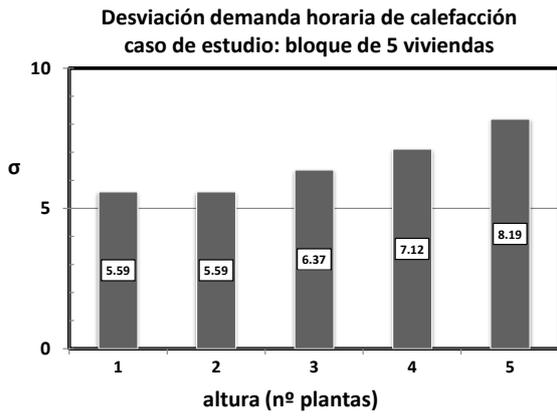




Figura 3.17. Valor de la desviación típica de datos según caso de estudio y altura del edificio.

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados nos indican que los edificios de mayor superficie útil, que tienen entre 2 y 4 plantas de altura, sufren una menor dispersión de los datos y la demanda de calefacción es más constante a lo largo del día.

Se decidió realizar un análisis mensual de la variación de desviación típica de datos. Este análisis revela que la dispersión de datos está condicionada por el mes de estudio.

La figura 3.18 muestra el valor mensual de desviación típica de los datos para el caso de estudio del bloque de 15 viviendas. Sólo se muestra este caso de estudio, a modo de ejemplo, dado que las gráficas para el resto de casos son similares.

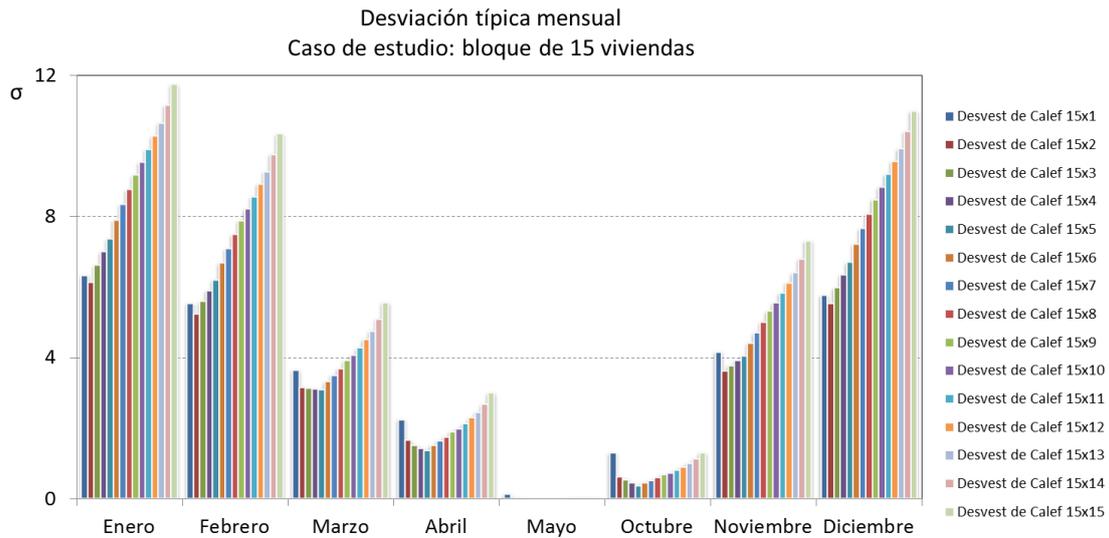


Figura 3.18. Valor de la desviación típica mensual para el caso de estudio de bloque de 15 viviendas.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados nos indican, que si bien las conclusiones obtenidas de la figura 3.17 son consistentes para los meses más fríos (enero, febrero, noviembre y diciembre), en el resto de meses (marzo, abril y octubre) se produce un cambio de tendencia.

Los resultados mostrados en la figura 3.15, así como los de la figura 3.16, muestran que en los edificios de mayor altura no sólo la demanda de calefacción es mayor, sino que además se producen picos de demanda más elevados que en el resto y la fluctuación de datos es más significativa.

De la figura 3.18 se deduce que los edificios más altos son más sensibles a las variaciones de temperatura en los meses fríos, pero que esta sensibilidad se reduce en los meses menos fríos.

Demanda de refrigeración

La demanda de refrigeración de los edificios de viviendas plurifamiliares guarda una proporción lineal con el factor fachada/suelo, tal y como se muestra en el gráfico siguiente (figura 3.19)

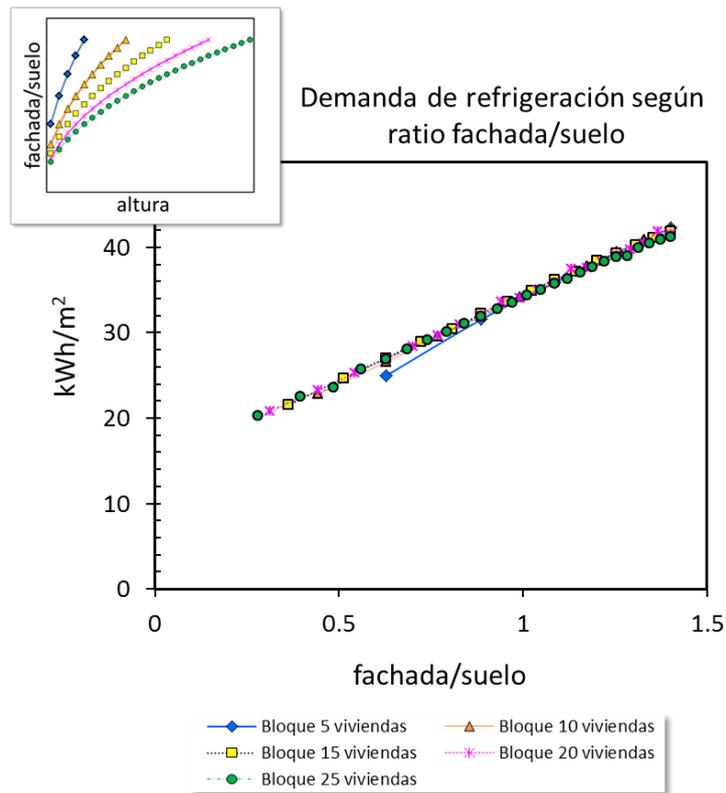


Figura 3.19. Demanda de refrigeración según ratio fachada/suelo.

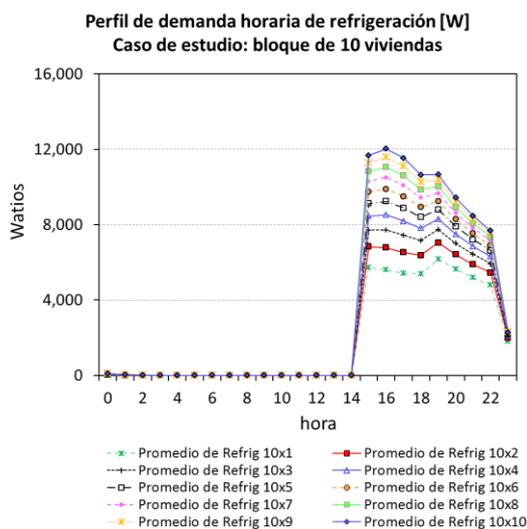
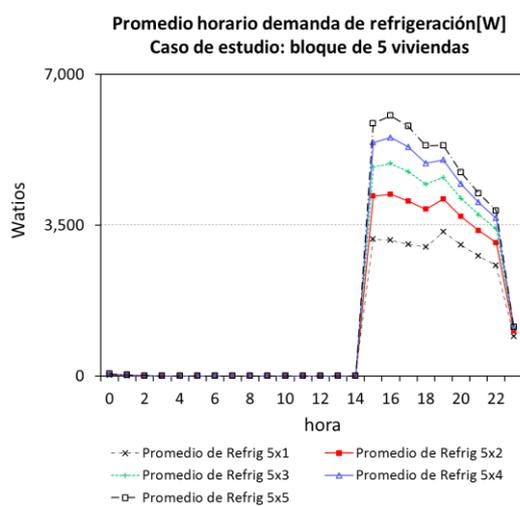
Fuente: elaboración propia.

Al igual que la demanda de calefacción simulada podía ser descrita por un conjunto de funciones polinómicas, la demanda de refrigeración se ajusta a una serie de funciones lineales según el valor del ratio fachada/suelo (ver tabla 3.16). En estas funciones, (y) representa la demanda de refrigeración en kWh/m² esperada y (x) es el valor del ratio fachada/suelo de cada caso estudiado.

Tabla 3.16. Funciones lineales ajustadas de demanda de refrigeración. Fuente: elaboración propia.

Caso de estudio	Ecuación lineal ajustada de demanda de refrigeración (y) [kWh/m ²]	Valor R ²
Bloque 5 viviendas	$y = 22.286x + 11.379$	0.9969
Bloque 10 viviendas	$y = 20.306x + 13.901$	0.9997
Bloque 15 viviendas	$y = 19.622x + 14.689$	0.9992
Bloque 20 viviendas	$y = 19.51x + 14.727$	0.9981
Bloque 25 viviendas	$y = 18.965x + 15.008$	0.999

En los gráficos siguientes se muestra el valor promedio de demanda horaria de refrigeración, expresado en Vatios. En todos los casos, los edificios de más altura presentan una mayor demanda de refrigeración. Sin embargo, los perfiles diarios de demanda de refrigeración varían según la altura del edificio (al contrario de lo que sucedía con la demanda de calefacción)



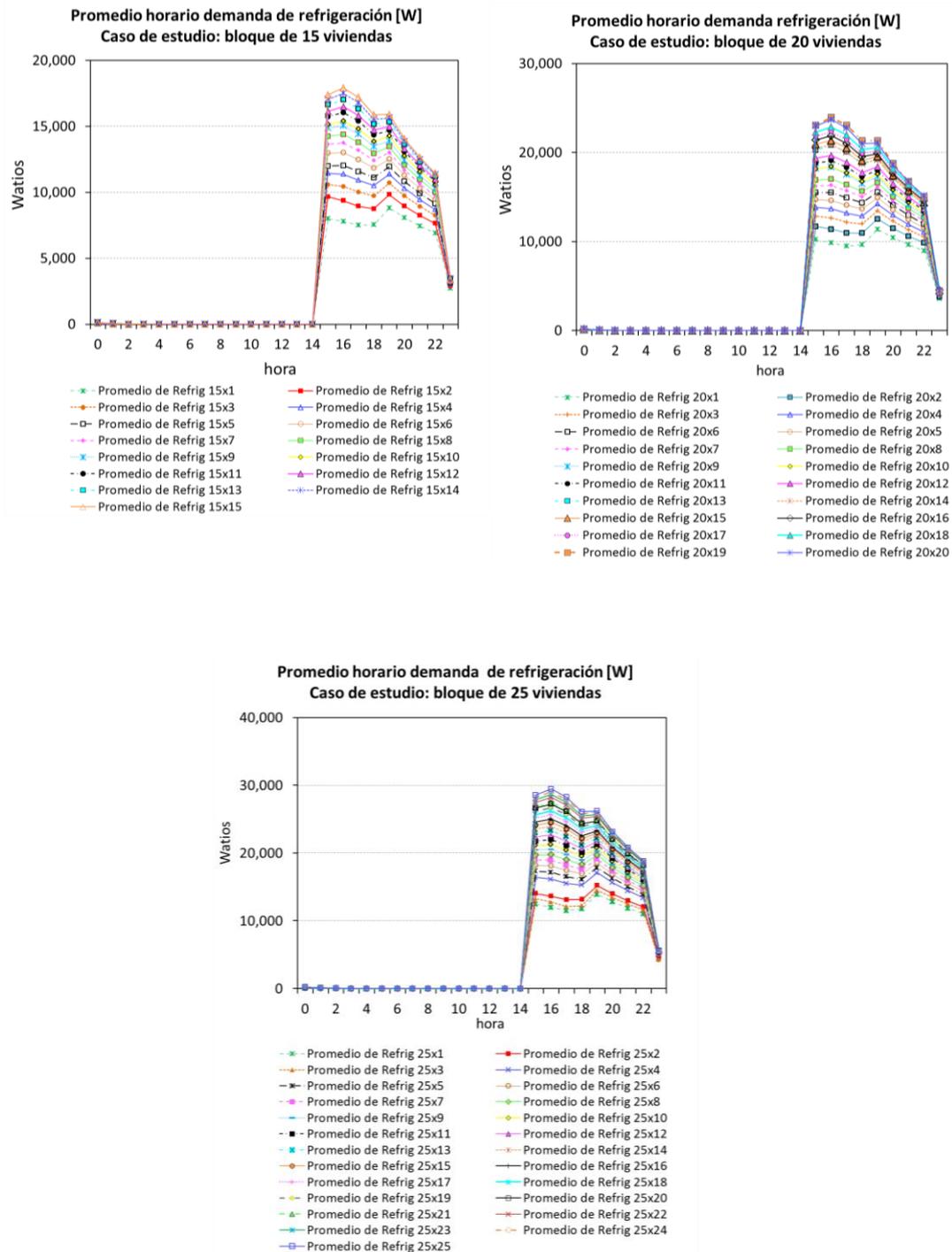
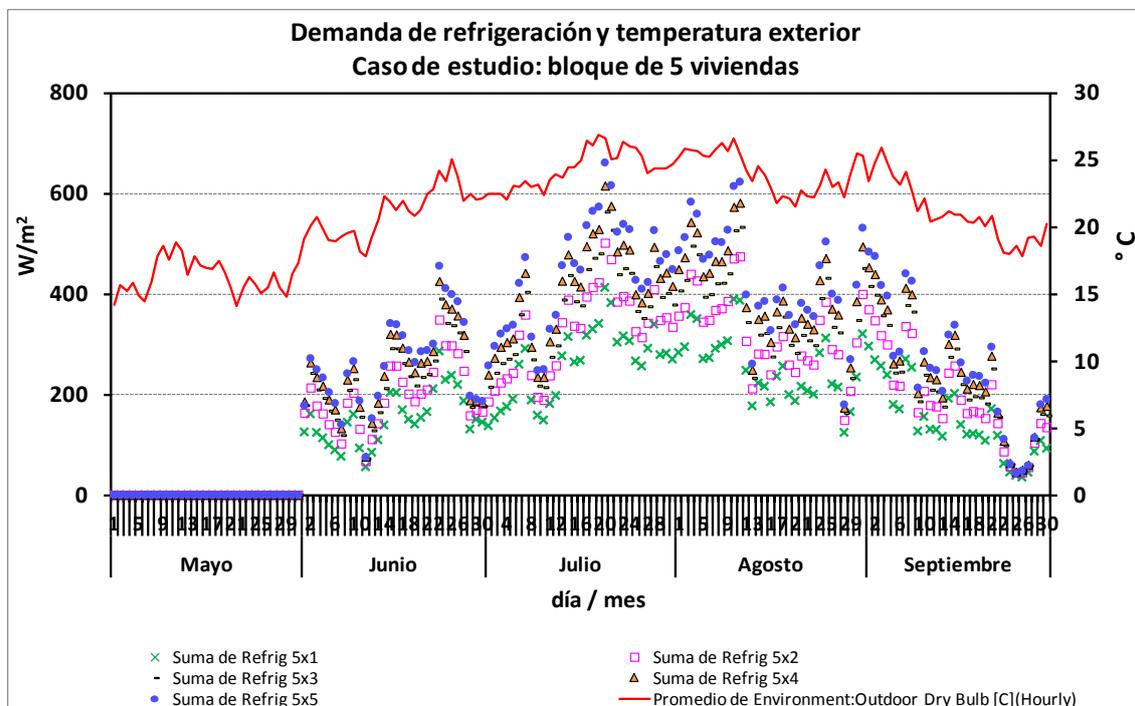


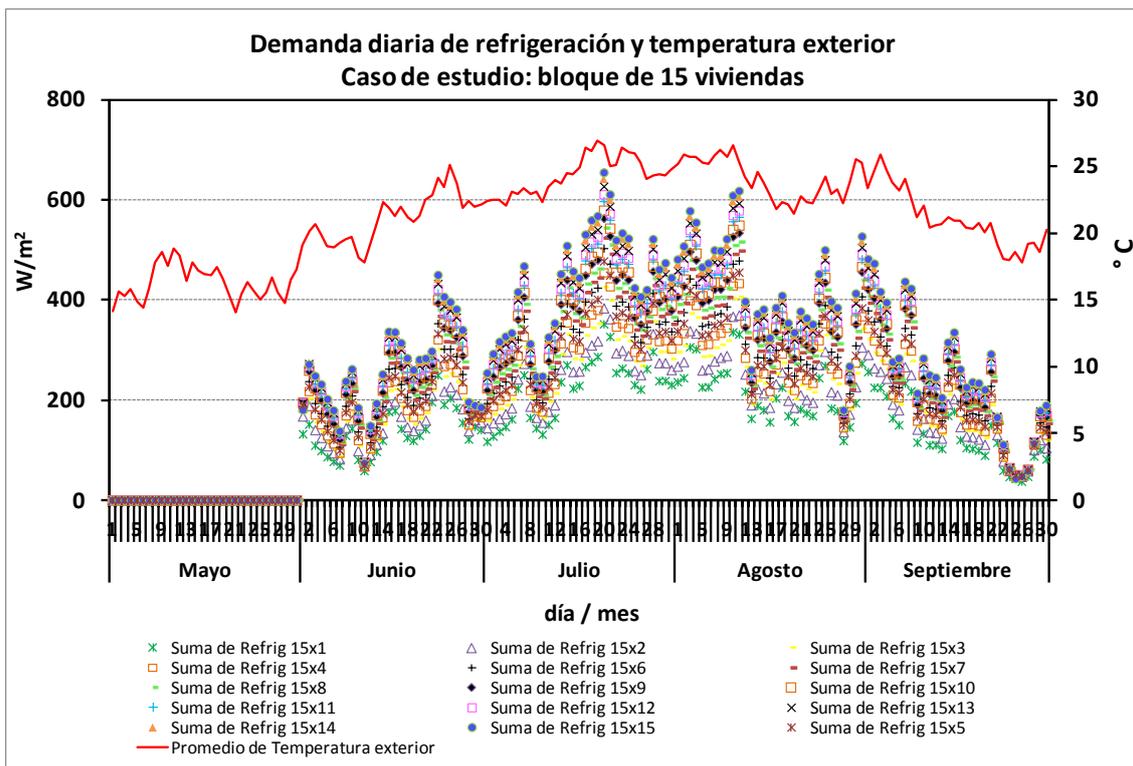
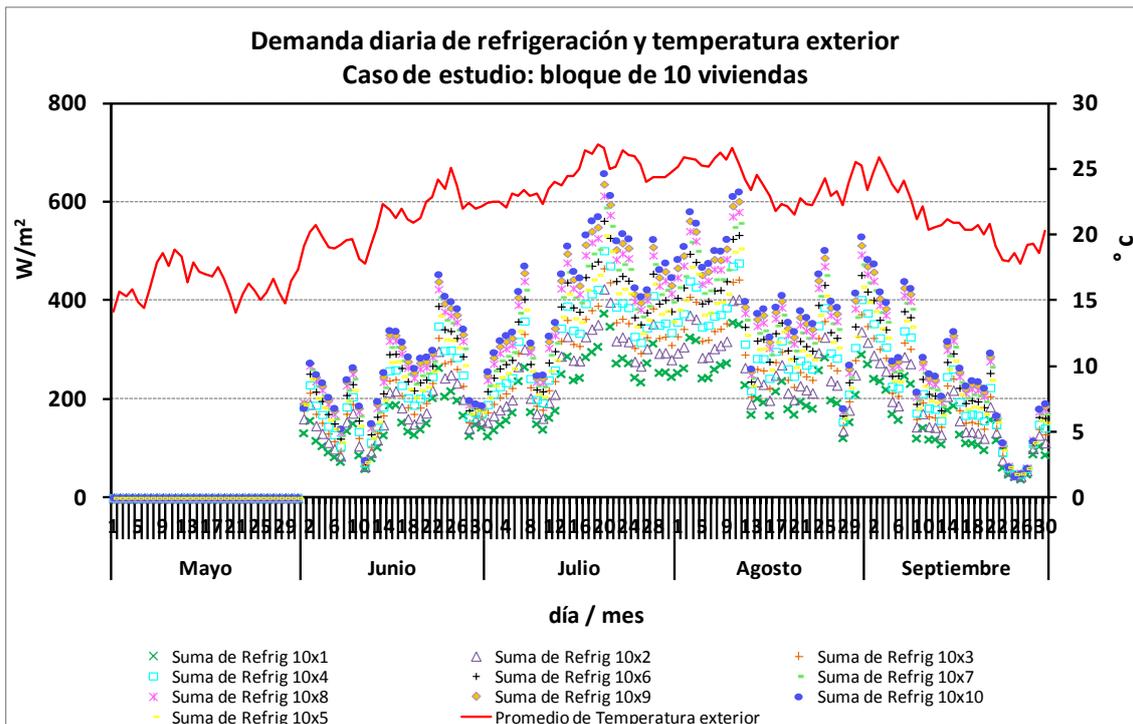
Figura 3.20. Promedio horario de demanda de refrigeración para todos los casos de estudio según el número de viviendas y altura. Fuente: elaboración propia.

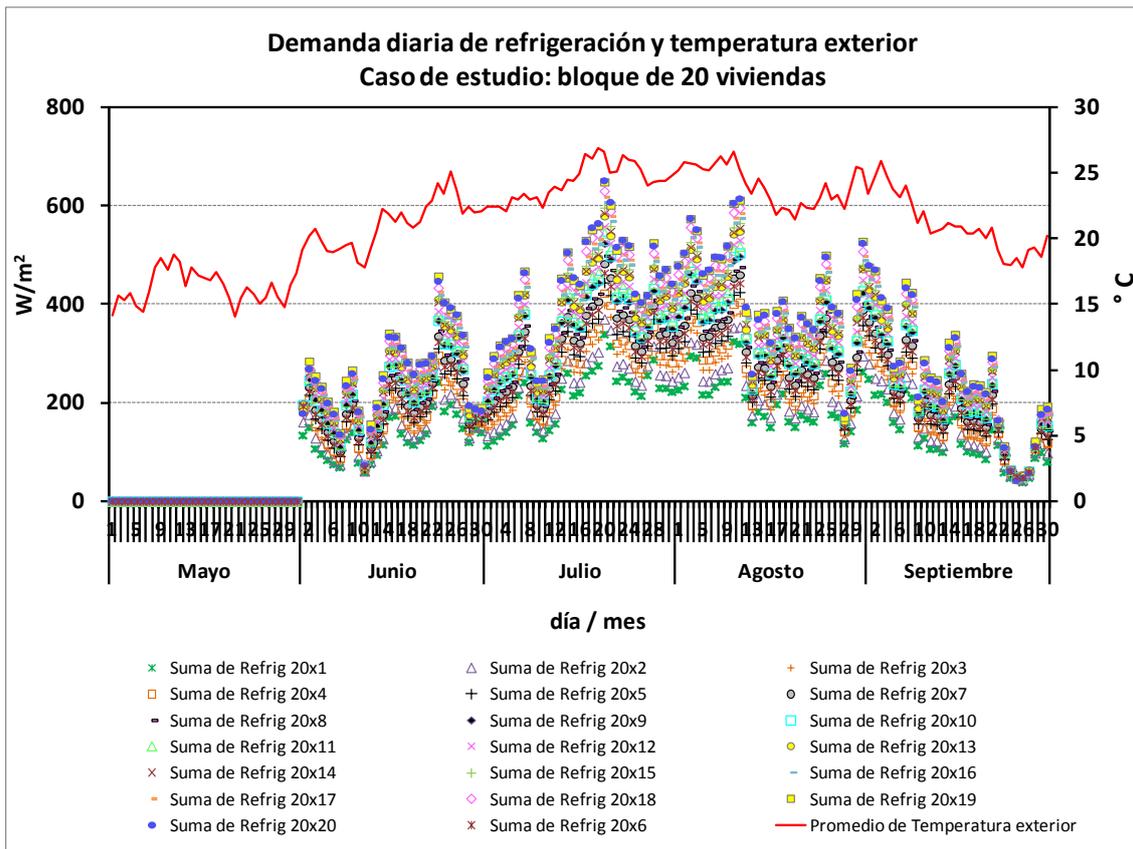
En los edificios de mayor altura se produce el pico de máxima demanda durante las 14 y 16h (serie de datos en color azul). En cambio, en los edificios de una o dos

plantas de altura (en color verde), el pico de demanda de refrigeración se produce a las 19h, debido en gran parte a un sobrecalentamiento del espacio interior del edificio.

El análisis de la evolución de los resultados de demanda diaria de refrigeración confirma la tendencia que se había puesto de manifiesto al estudiar la demanda diaria de calefacción. De nuevo, son los edificios altos aquellos en los cuales la demanda es mayor y los picos de refrigeración son también más elevados. En los edificios de pocas plantas de altura, la demanda de refrigeración mantiene un perfil más constante (figura 3.21).







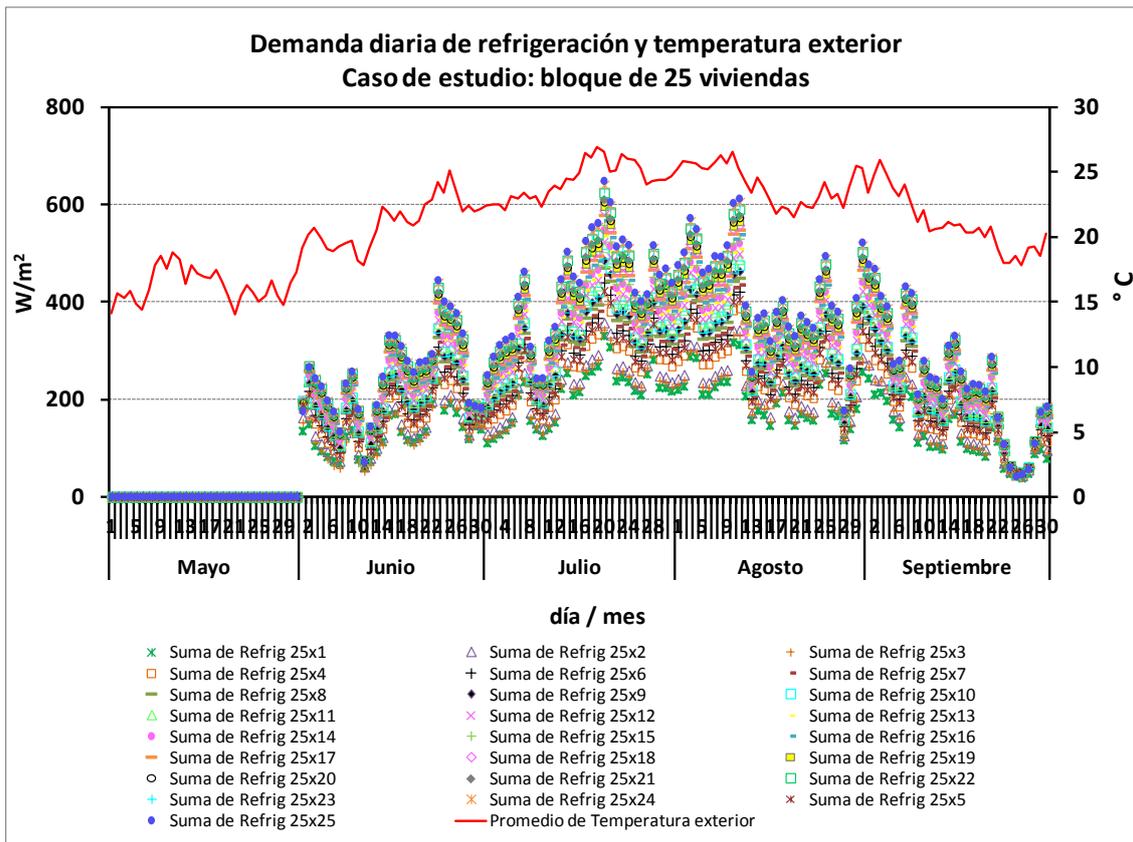


Figura 3.21. Demanda diaria de refrigeración y promedio de temperatura exterior para todos los casos de estudio según el número de viviendas y altura. Fuente: elaboración propia.

El valor de la desviación típica guarda una relación lineal con la proporción fachada/suelo del edificio y, por lo tanto, con la altura del mismo (ver gráfica de la figura 3.22). Esto indica que, los edificios modelizados, están poco protegidos con respecto a las altas temperaturas lo que induce unos picos de demanda muy elevados durante el día.

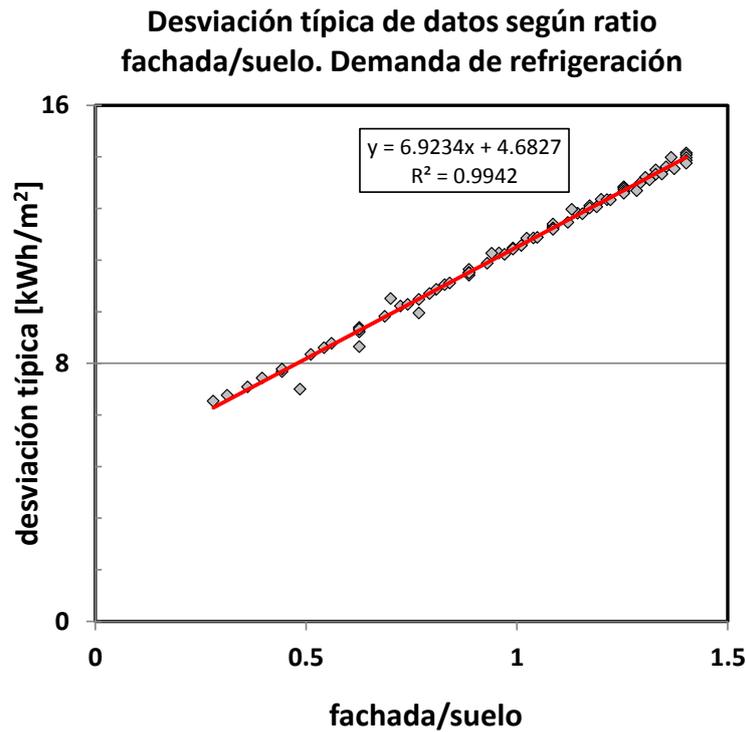


Figura 3.22. Valor de desviación típica según el ratio fachada/suelo.

Fuente: elaboración propia.

Al igual que sucedía con la demanda de calefacción, en los edificios más altos se da una mayor dispersión de los datos y, por lo tanto, la demanda es menos continua que en el resto. Este comportamiento es constante a lo largo de los meses de refrigeración, al contrario de lo que sucedía con la calefacción.

En la figura 3.24 se muestra el valor mensual de la desviación de datos para el caso de estudio de un bloque de 15 viviendas.

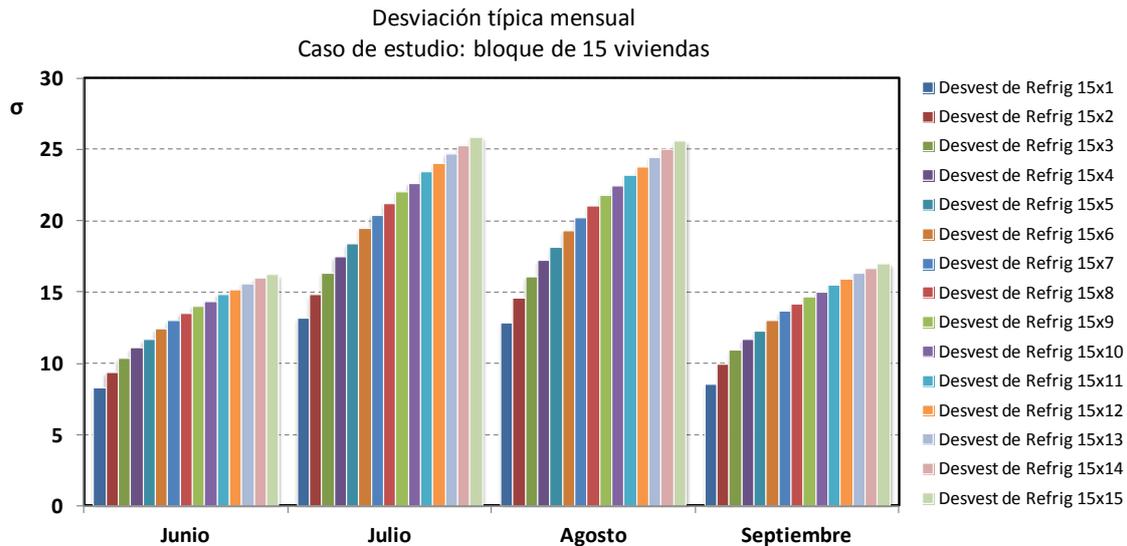


Figura 3.23. Valor de la desviación típica mensual para el caso de estudio de bloque de 15 viviendas. Fuente: elaboración propia.

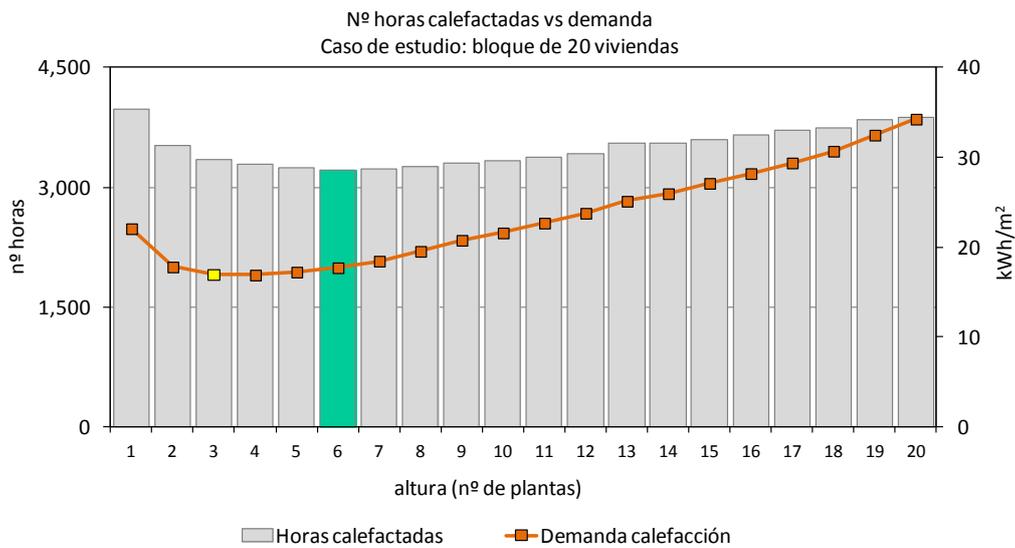
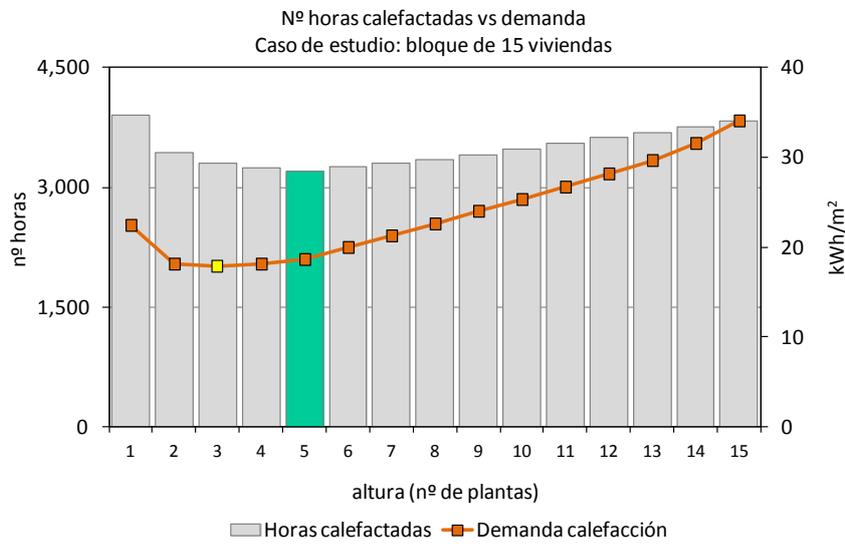
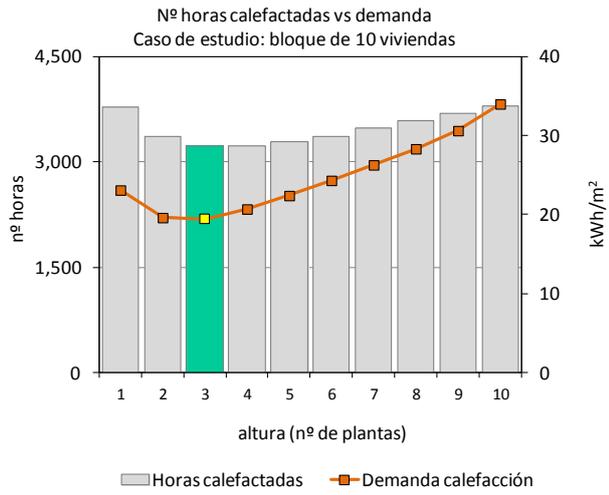
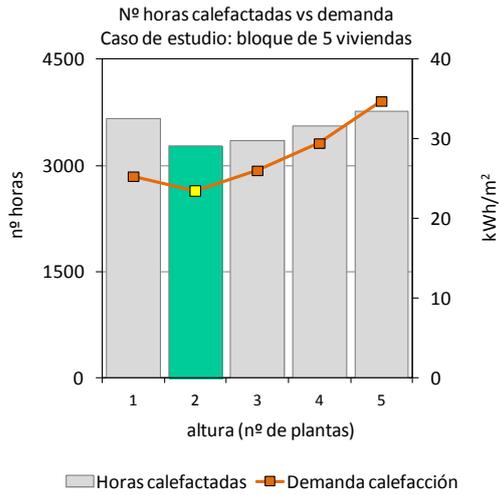
Estudio del número de horas climatizadas

A partir del análisis de los resultados de la simulación energética, para la que se ha utilizado el software EnergyPlus™, se ha realizado un estudio del número de horas de la demanda de la climatización en cada edificio.

En los gráficos mostrados a continuación se compara el número de horas calefactadas en cada edificio con la demanda de calefacción (figura 3.24). Se ha marcado con verde el edificio de cada caso de estudio que precisa de menos horas de calefacción.

Estos resultados ponen de manifiesto, que en los edificios de superficie útil elevada, no coincide el edificio con menor demanda de calefacción con el edificio con un número menor de menos horas calefactadas. Tampoco existe concordancia entre el edificio de mayor demanda y el edificio que es calefactado más horas.

Para los bloques de menos superficie, 5 y 10 viviendas, coinciden los máximos y mínimos de horas climatizadas y la demanda.



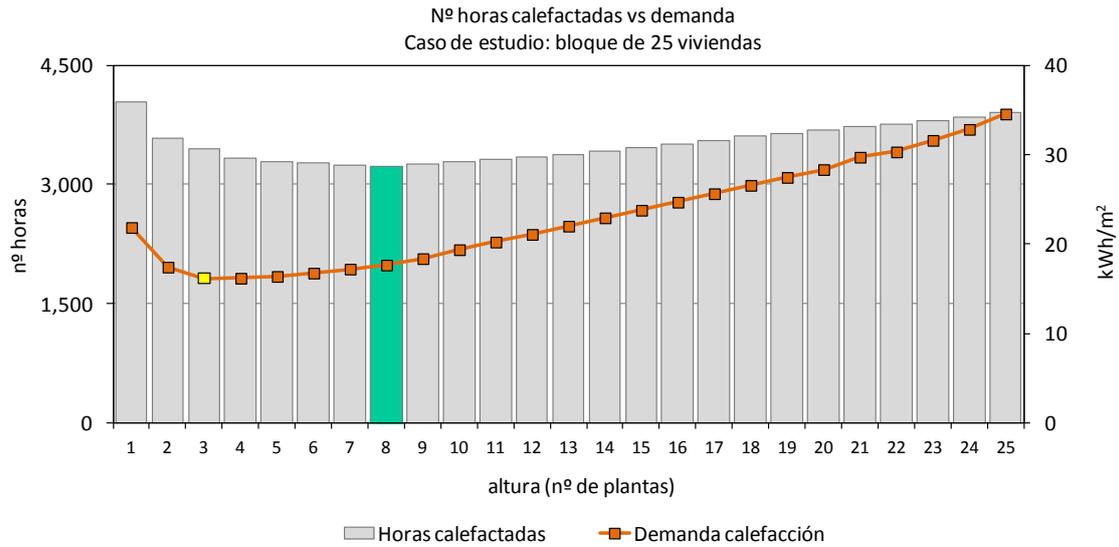


Figura 3.24. Número de horas de demanda de calefacción y kWh/m² de demanda para cada caso de estudio. Los valores mínimos de cada serie se han destacado en otro color. Fuente: elaboración propia.

Para una misma superficie total útil puede darse el caso de que exista una diferencia significativa de horas calefactadas. Esto pasa en el edificio de 25 viviendas en ocho alturas (3,230 horas) y el edificio con la misma superficie pero distribuida en una sola planta de altura (4,033 horas).

La diferencia de horas de la demanda de refrigeración entre edificios de una misma superficie total útil, es poco significativa y, por tanto, no se va a presentar en este análisis.

3.4.2. Resultados del modelo

Una vez calculada la demanda inicial, mediante la simulación dinámica con EnergyPlus™, y la producción de energía solar fotovoltaica, se muestran los resultados del balance energético entre ambas y la proporción de demanda abastecida.

Edificios de viviendas unifamiliares

Con respecto a las dos tipologías de edificios unifamiliares, se obtiene un mayor porcentaje de la demanda cubierta por la producción fotovoltaica en el caso de edificios de viviendas adosadas (figura 3.25)

A pesar de que el edificio de viviendas unifamiliar aislado tiene un mayor potencial de producción de energía solar fotovoltaica, debido a que la superficie de cubierta es mayor, la demanda energética por superficie útil también es más elevada.

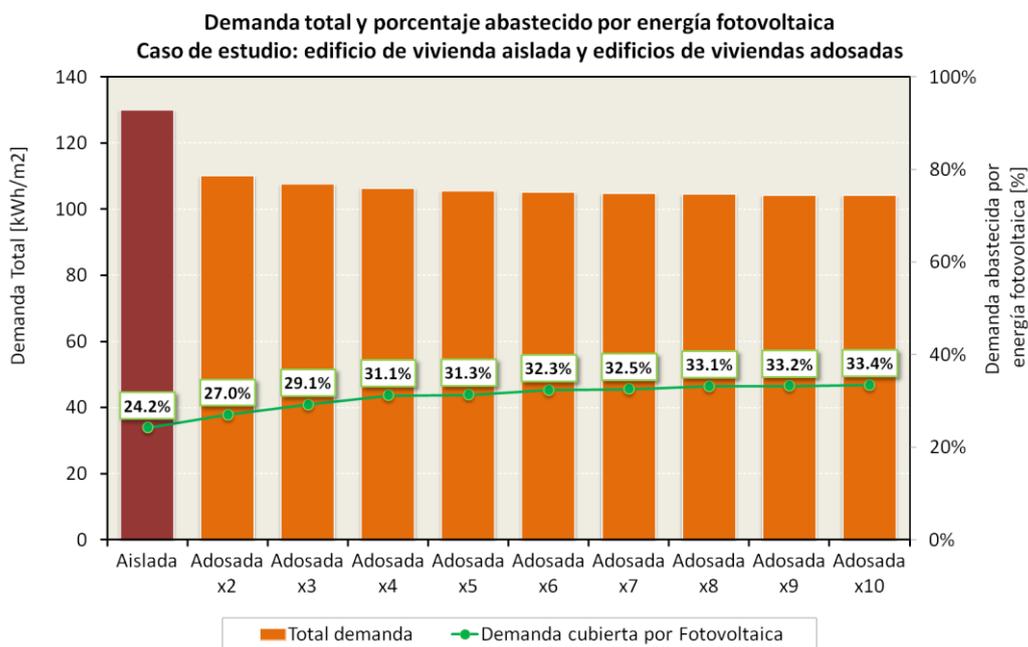


Figura 3.25. Porcentaje de demanda energética abastecido por energía fotovoltaica para los casos de estudio de edificio de vivienda aislada y edificio de viviendas adosadas.

Fuente: elaboración propia.

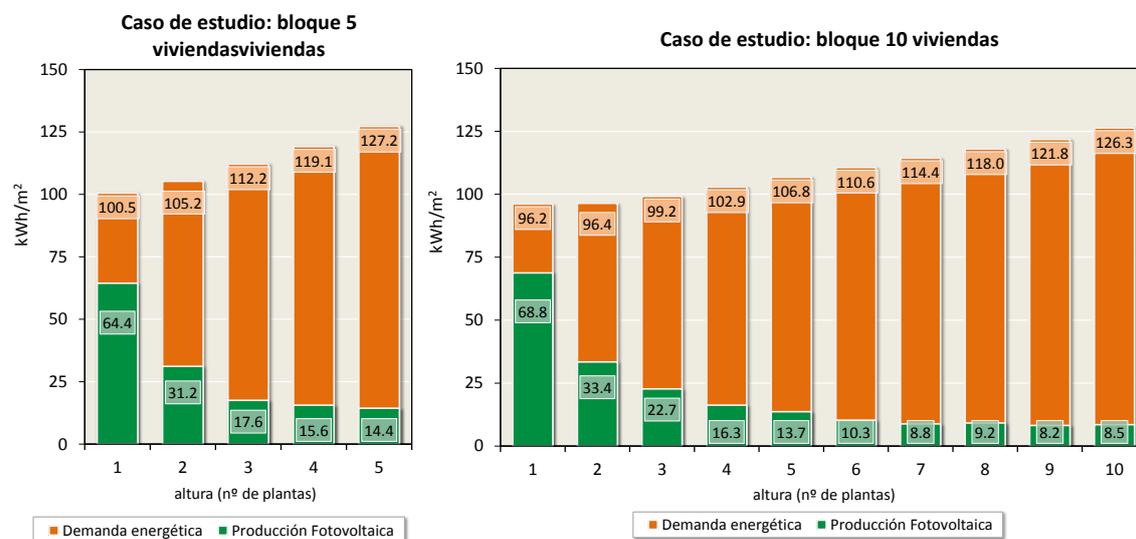
El sistema de generación fotovoltaica ofrece unos resultados satisfactorios para ambas tipologías (figura 3.25). La relación superficie en planta/altura de los arquetipos diseñados, permite un equilibrio satisfactorio entre la demanda energética y la superficie disponible para los sistemas fotovoltaicos.

Incluso para el caso más desfavorable, hasta un 24% de la demanda puede ser abastecida por la producción de los paneles solares. Este porcentaje es mayor para los casos de edificios de viviendas adosadas, entre el 27% y el 33%.

Los datos indican que a partir de cuatro viviendas adosadas, tanto la demanda inicial como la contribución fotovoltaica por metro cuadrado, se estabilizan y crecen en la misma proporción. A medida que se añaden viviendas la diferencia en el balance es mínima.

Edificios plurifamiliares

En los gráficos de la figura 3.26 se muestra la demanda energética de todos los casos de la tipología de edificio plurifamiliar según la altura. Se representa también (en color verde), la energía producida por los paneles fotovoltaicos instalados en la cubierta de cada edificio y en el 50% de la superficie de la fachada orientada al sur.



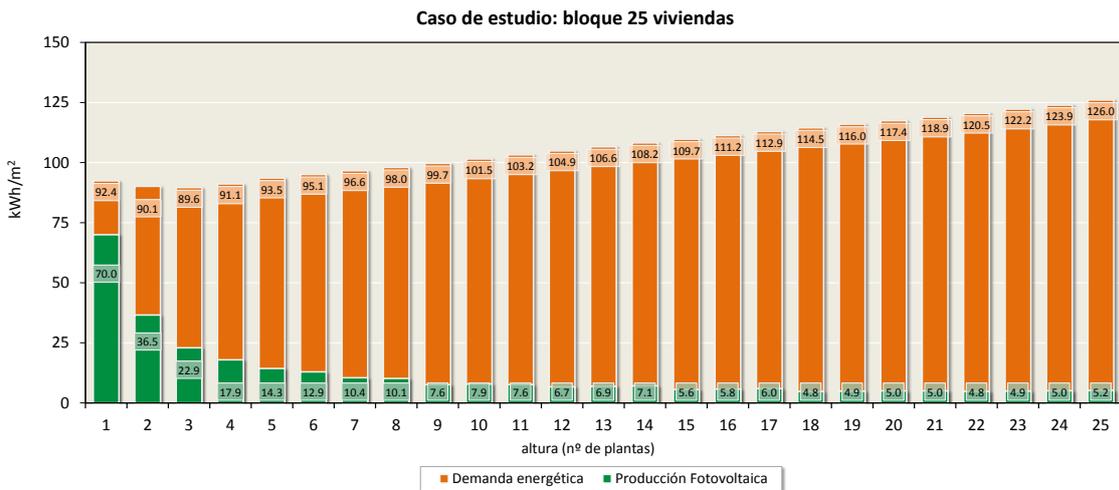
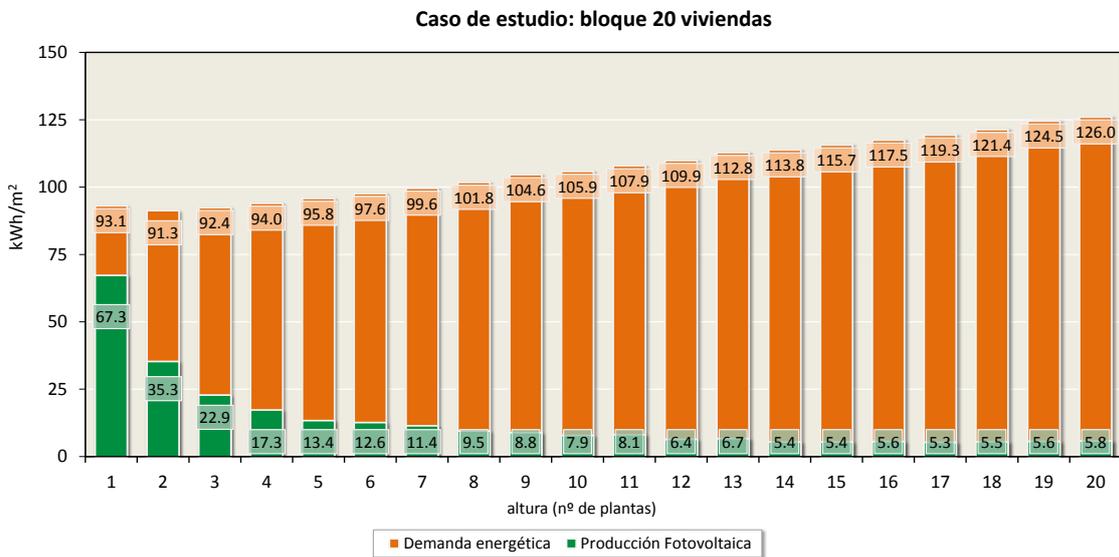
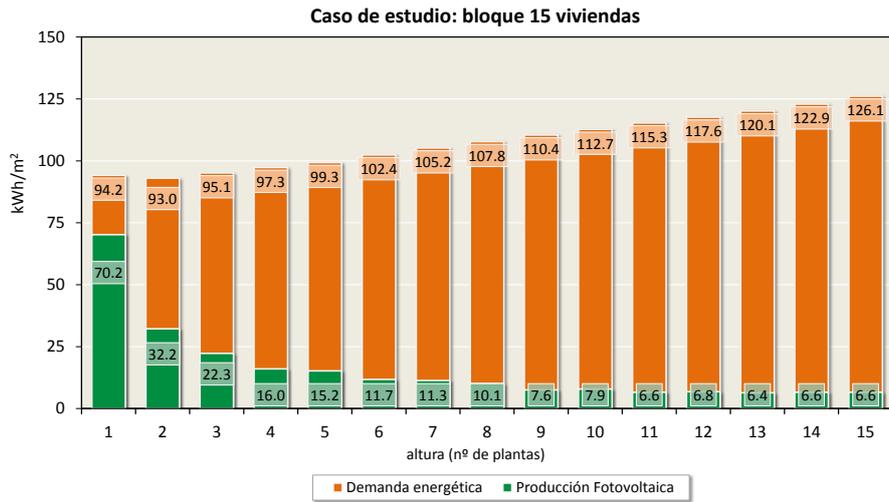


Figura 3.26. Demanda energética y energía fotovoltaica generada para cada caso de edificio de vivienda plurifamiliar estudiado. Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que aquellos edificios de menor superficie total útil – como son los correspondientes a 5 y 10 viviendas – la demanda energética total como consecuencia de las necesidades de calefacción, refrigeración, iluminación y uso de equipamiento, aumenta conforme lo hace el número de plantas en altura del bloque.

Sin embargo, en los edificios de mayor superficie total útil (como los correspondientes a 20 y 25 viviendas) existe una altura “ideal” en la que la demanda de energía es mínima. El valor de esta altura óptima está alrededor de las 2 y 4 plantas según el caso.

Los datos correspondientes a la producción de energía fotovoltaica de la figura 3.26, señalan que en los edificios de una planta la producción es considerablemente mayor que en los más altos. Esto es debido a que en los bloques de una planta de altura la superficie de cubierta disponible es la máxima posible.

A medida que en el edificio se reduce la superficie en planta y se aumenta la altura, la superficie de cubierta también se reduce, mientras que la superficie de fachada disponible para la instalación de los paneles solares aumenta (aunque en menor proporción).

Una vez que se han presentado los datos de demanda energética obtenidos en la simulación, y los datos de producción de energía fotovoltaica correspondientes a cada edificio, se calcula el balance energético, como diferencia entre ambos, para obtener la demanda energética final:

$$Demanda\ final = Demanda\ inicial - Producción\ fotovoltaica \quad (3.14)$$

La demanda energética final, por metro cuadrado de superficie útil, obtenida como la diferencia entre la demanda inicial y la energía generada en los paneles solares del edificio, se puede ajustar mediante una función logarítmica:

$$Demanda\ final = A \cdot \ln(n) + B \quad (3.15)$$

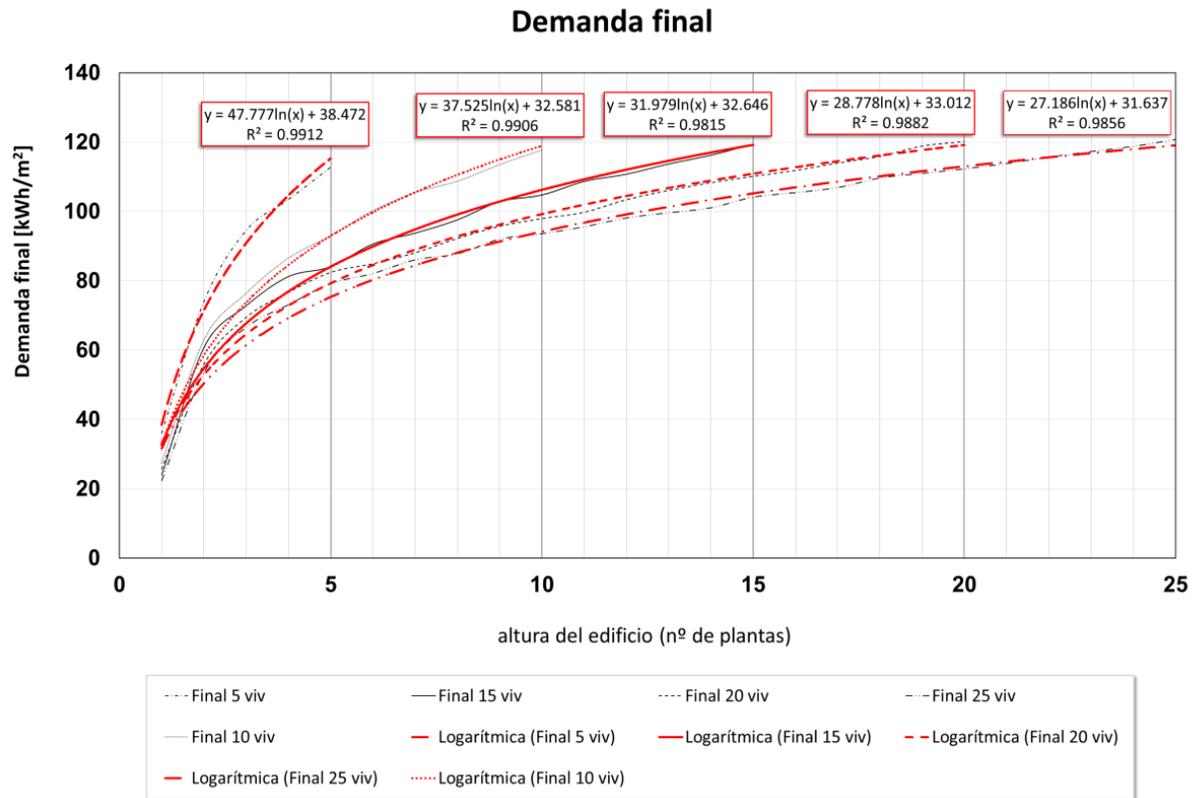


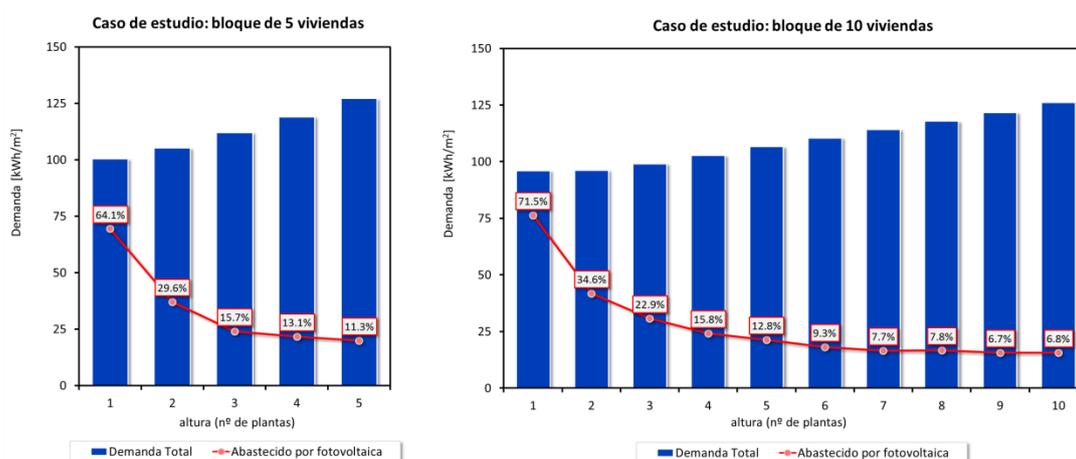
Figura 3.27. Ecuaciones logarítmicas que se ajustan a las curvas de demanda energética final por metro cuadrado de superficie útil. Fuente: elaboración propia.

La demanda final para cada caso de estudio puede representarse mediante una serie de curvas (figura 3.27). Estas curvas se ajustan a un conjunto de funciones logarítmicas según la altura del edificio.

El resultado del balance energético entre la demanda del edificio y la energía fotovoltaica producida, indica que los edificios que permiten mayores ahorros energéticos de forma global son aquellos de una sola planta de altura porque ofrecen mayor superficie disponible para la instalación de paneles solares.

De la gráfica de la figura 3.27 puede extraerse una segunda lectura. Para dos edificios de la misma altura, la demanda energética final es menor cuanto mayor sea la superficie útil. A modo de ejemplo, la demanda final por metro cuadrado de un edificio de 25 viviendas en 5 plantas de altura es de 79.23 kWh/m² mientras que en un edificio de 5 viviendas y la misma altura, es de 112.85 kWh/m², un 30% más.

En las gráficas que componen la figura 3.28, se compara el ahorro energético potencial en cada edificio mediante el uso de la energía fotovoltaica generada. Las barras azules representan la demanda anual y la línea roja representa el porcentaje de esta demanda que es abastecido por la producción de los paneles fotovoltaicos.



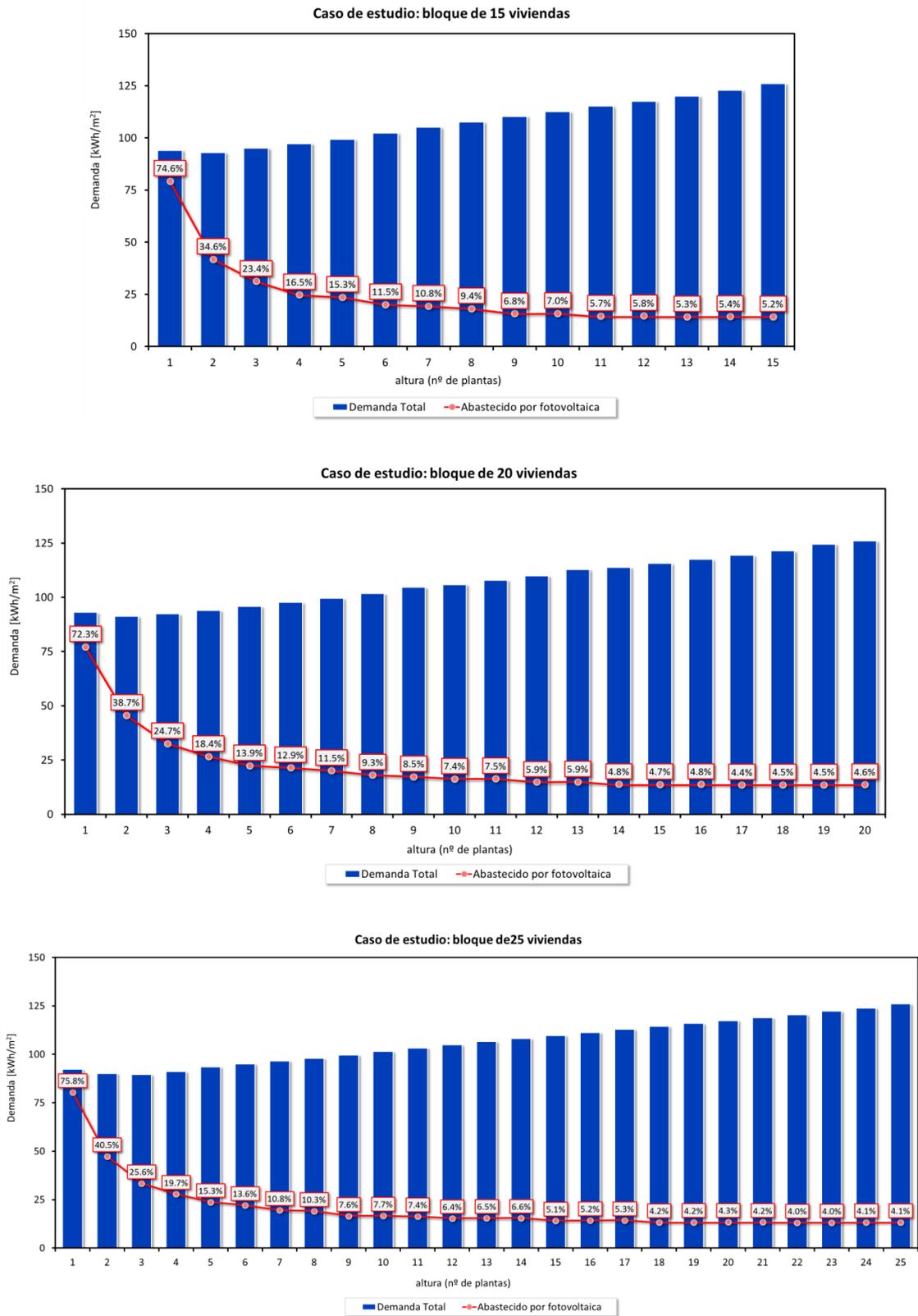


Figura 3.28. Demanda energética total de un edificio que puede ser abastecida por energía solar fotovoltaica, según la altura del edificio para todos los casos de estudio. Fuente: elaboración propia.

Estos datos muestran que más del 70% de la demanda energética de un edificio de viviendas, cuya superficie total útil sea de 1,832.52 m² (correspondiente a 25 viviendas), puede provenir de fuentes de energía renovables mediante la instalación de paneles fotovoltaicos en la cubierta y en la fachada sur del edificio.

Este sería el supuesto más optimista, para un edificio de una planta de altura, no siendo un caso muy frecuente. Sin embargo, para un edificio más común, como puede ser un edificio de 25 viviendas distribuidas en 6 plantas de altura, los resultados del modelo planteado nos indican que hasta un 14% de la energía demandada puede provenir de la producción fotovoltaica.

En la tabla 3.17 se resumen todos los resultados del cálculo de la demanda energética y la producción de energía fotovoltaica de cada caso estudiado. En las dos últimas columnas se indica el porcentaje de la demanda total y de la demanda de climatización que puede ser cubierto por la energía fotovoltaica:

Tabla 3.17 a) y b). Resultados del modelo. Fuente: elaboración propia.

Tipología y superficie útil	Altura (nº de plantas)	Fachada / suelo	Demanda energética inicial [kWh/ m ²]	Energía fotovoltaica generada [kWh/m ²]	Demanda total abastecida por energía fotovoltaica [%]	Demanda de climatización abastecida por fotovoltaica [%]
bloque de 5 viviendas 366.50 m ²	1	0.63	100.50	64.43	64.11%	128.14%
	2	0.89	105.23	31.16	29.61%	56.63%
	3	1.09	112.15	17.55	15.65%	28.34%
	4	1.25	119.11	15.61	13.11%	22.67%
	5	1.40	127.21	14.36	11.29%	18.64%
bloque de 10 viviendas 733 m ²	1	0.44	96.17	68.77	71.50%	149.65%
	2	0.63	96.42	33.41	34.65%	72.31%
	3	0.77	99.17	22.71	22.90%	46.38%
	4	0.89	102.89	16.26	15.80%	30.87%
	5	0.99	106.76	13.68	12.81%	24.19%
	6	1.09	110.61	10.31	9.32%	17.07%
	7	1.17	114.36	8.83	7.72%	13.76%
	8	1.25	117.97	9.17	7.77%	13.53%
	9	1.33	121.78	8.20	6.73%	11.46%
	10	1.40	126.33	8.54	6.76%	11.22%
bloque de 15 viviendas 1,099.50 m ²	1	0.36	94.16	70.20	74.55%	159.76%
	2	0.51	93.01	32.20	34.62%	75.24%
	3	0.63	95.11	22.27	23.42%	49.61%
	4	0.72	97.31	16.05	16.49%	34.07%
	5	0.81	99.31	15.19	15.30%	30.95%
	6	0.89	102.42	11.75	11.47%	22.51%
	7	0.96	105.15	11.34	10.78%	20.64%
	8	1.02	107.76	10.14	9.41%	17.62%
	9	1.09	110.43	7.55	6.84%	12.54%
	10	1.14	112.70	7.89	7.00%	12.63%
	11	1.20	115.30	6.57	5.69%	10.09%
	12	1.25	117.62	6.79	5.77%	10.08%
	13	1.30	120.14	6.37	5.30%	9.11%
	14	1.35	122.88	6.60	5.37%	9.08%
	15	1.40	126.10	6.60	5.23%	8.70%

Tipología y superficie útil	Altura (nº de plantas)	Fachada / suelo	Demanda energética inicial [kWh/ m ²]	Energía fotovoltaica generada [kWh/m ²]	Demanda total abastecida por energía fotovoltaica [%]	Demanda de climatización abastecida por fotovoltaica [%]
bloque de 20 viviendas 1,466.00 m ²	1	0.31	93.06	67.29	72.30%	157.06%
	2	0.44	91.30	35.32	38.68%	85.97%
	3	0.54	92.37	22.85	24.74%	54.21%
	4	0.63	94.02	17.30	18.40%	39.48%
	5	0.70	95.83	13.35	13.93%	29.28%
	6	0.77	97.62	12.63	12.94%	26.64%
	7	0.83	99.58	11.44	11.49%	23.17%
	8	0.89	101.75	9.49	9.33%	18.42%
	9	0.94	104.62	8.84	8.45%	16.26%
	10	0.99	105.85	7.86	7.42%	14.13%
	11	1.04	107.92	8.11	7.52%	14.06%
	12	1.09	109.88	6.43	5.85%	10.78%
	13	1.13	112.82	6.68	5.93%	10.68%
	14	1.17	113.81	5.43	4.78%	8.55%
	15	1.21	115.65	5.43	4.70%	8.30%
	16	1.25	117.47	5.60	4.77%	8.33%
	17	1.29	119.32	5.29	4.43%	7.66%
	18	1.33	121.37	5.46	4.50%	7.67%
	19	1.37	124.54	5.63	4.52%	7.58%
	20	1.40	126.03	5.80	4.60%	7.65%
bloque de 25 viviendas 1,832.50 m ²	1	0.28	92.37	69.99	75.77%	166.06%
	2	0.40	90.12	36.53	40.54%	91.56%
	3	0.49	89.58	22.94	25.61%	61.41%
	4	0.56	91.08	17.92	19.68%	42.81%
	5	0.63	93.54	14.31	15.30%	33.04%
	6	0.69	95.06	12.90	13.57%	28.77%
	7	0.74	96.57	10.44	10.81%	22.53%
	8	0.79	97.99	10.14	10.35%	21.22%
	9	0.84	99.66	7.59	7.62%	15.36%
	10	0.89	101.52	7.87	7.75%	15.33%
	11	0.93	103.24	7.62	7.38%	14.37%
	12	0.97	104.87	6.69	6.38%	12.25%
	13	1.01	106.57	6.90	6.47%	12.24%
	14	1.05	108.21	7.10	6.56%	12.25%
	15	1.09	109.74	5.55	5.06%	9.33%
	16	1.12	111.24	5.76	5.17%	9.43%
	17	1.16	112.93	5.96	5.28%	9.50%
	18	1.19	114.47	4.76	4.15%	7.40%
	19	1.22	115.95	4.89	4.22%	7.44%
	20	1.25	117.39	5.03	4.28%	7.49%
	21	1.28	118.92	5.03	4.23%	7.32%
	22	1.31	120.50	4.78	3.96%	6.80%
	23	1.34	122.24	4.91	4.02%	6.82%
	24	1.37	123.88	5.05	4.08%	6.85%
	25	1.40	126.02	5.18	4.11%	6.84%

El modelo desarrollado permite diseñar edificios en los que, mediante una combinación de la optimización de la forma del edificio y la producción de energía solar fotovoltaica, se obtiene una reducción de la demanda además de un porcentaje de autoabastecimiento cercano al 20%. Este valor resulta satisfactorio, desde un punto de vista energético, ya que si observamos la estructura de las fuentes energéticas en nuestro país, la cuota de producción de energía solar fotovoltaica apenas cubre el 3% de la demanda eléctrica y tan solo una décima parte de esta producción se genera en cubiertas de edificios domésticos (Unión Española Fotovoltaica, 2013)

Además, este modelo propone el autoabastecimiento de parte de la demanda, con el consecuente beneficio ambiental y la reducción de la dependencia energética exterior.

3.5. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo propuesto en esta investigación, se realizó aplicando la metodología del análisis de la varianza bajo diversos supuestos.

El análisis de varianza de un factor sirve para comparar una variable cuantitativa para varios grupos de estudio. Este método, también conocido como ANOVA test, es una técnica de dependencia diseñada para medir la significación de la influencia que una o varias variables no métricas tienen sobre otra variable dependiente métrica (Luque Martínez, 2012).

A la variable categórica que define los grupos se le denomina factor o variables independiente VI. A la variable cuantitativa con la que se pretende comparar los grupos se denomina variable dependiente o VD.

La hipótesis de partida es que las medias poblacionales son iguales en cada grupo, o lo que es lo mismo, que las medias de la variable dependiente son iguales en cada nivel de la variable independiente. Si las medias poblacionales son iguales, significa que los grupos no difieren en la variable dependiente y que, en consecuencia, no existe una relación de dependencia entre ambas variables.

El modelo se expresa como (Luque Martínez, 2012):

$$y_{ik} = \mu + \tau_k + \varepsilon_{ik} \quad (3.6)$$

donde y_{ik} es la observación i de la modalidad k , expresada como resultado de una media general μ , del efecto de un factor τ_k y el error aleatorio ε_{ik} .

La hipótesis nula de igualdad de medias poblacionales equivale a la afirmación de que ninguno de los factores tiene efecto alguno, asumiendo que si $\mu_1 = \mu_2$ es porque el factor no tiene efecto (Luque Martínez, 2012).

Pueden darse dos situaciones:

- Las medias son iguales $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$, lo que implica que el efecto del factor τ_k es nulo para $k=1, 2, \dots, p$, existiendo entre ellas tan sólo diferencias atribuibles al azar.
- No todas las medias son iguales, siendo $\tau_k \neq 0$

El denominador estadístico F es una estimación de la varianza poblacional basada en la variabilidad existente dentro de cada grupo. En el supuesto de que las medias poblacionales fuesen iguales, el cociente F tomará un valor próximo a 1. Cuanto más diferentes sean las medias, mayor será el valor de F .

El P-valor de un análisis estadístico representa la probabilidad de obtener valores como el obtenido o mayores. En un análisis de varianza, cuando el P-valor es menor que 0.05, la hipótesis de igualdad de medias es rechazada y se concluye que no todas las medias poblacionales comparadas son iguales con una confianza del 95%. En caso contrario, la hipótesis de igualdad no puede ser rechazada.

3.5.1. Validación del modelo para climas cálidos

Para validar los resultados obtenidos, se realizó un test de análisis de la varianza a los 75 elementos que componen la muestra de la tipología de edificio de viviendas plurifamiliar en bloque.

Como hipótesis de partida, se consideró que existe una relación de dependencia entre la altura del edificio y la demanda energética final obtenida por el modelo.

La variable independiente o factor de observación es la altura del edificio. Para categorizar esta variable cuantitativa, se agrupan los elementos de la muestra en dos categorías: baja (desde 1 hasta 5 plantas de altura) y alta (de 6 plantas en adelante). La variable dependiente, también denominada variable observable, es la demanda energética final, en kWh/m², obtenida en el modelo desarrollado.

Los valores medios de la diferencia mínima significativa de ambos grupos (conocida como LSD por su acrónimo en inglés = *Least Significant Difference*) no se solapan (figura 3.29). El valor de F para esta muestra es de 82.50 y P-valor=0, por

lo que puede afirmarse que el factor altura del edificio tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable demanda final.

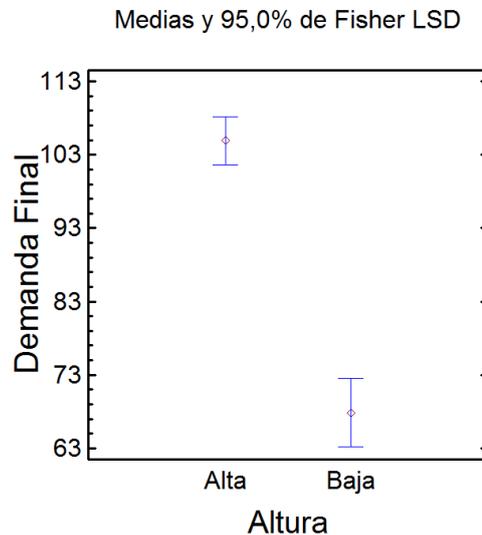


Figura 3.29. Intervalos de diferencia mínima significativa (95% de confianza) según la altura del edificio. Fuente: elaboración propia.

Estos resultados indican que existen diferencias estadísticamente significativas entre los elementos de la muestra y por lo tanto la hipótesis de partida es cierta, confirmándose que existe una relación de dependencia entre la demanda energética final calculada por el modelo y la altura del edificio.

3.5.2. Validación del modelo para otras condiciones climáticas

Tanto la demanda energética del edificio como la producción de energía fotovoltaica, están relacionadas con las condiciones climáticas y el nivel de radiación solar recibida. En la sección anterior se han mostrado los resultados del modelo, bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Granada. Según la clasificación climática de Köppen, el clima de esta ciudad se corresponde con el tipo *Csa*: mediterráneo con verano cálido. Además, esta ciudad recibe un alto nivel de radiación solar diario.

Para evaluar la robustez del modelo desarrollado, se estudió una de las tipologías edificatorias descritas bajo otras condiciones climáticas. Para ello se escogieron dos localizaciones europeas cuyas circunstancias climáticas difieren de las de Granada.

Como clima opuesto al de Granada, se seleccionó la ciudad de Oslo. Siguiendo la clasificación climática de Köppen, se corresponde con un clima *Dfb*: subclima continental húmedo con verano templado. El clima en esta ciudad se caracteriza por muy bajas temperaturas medias durante el invierno y con grandes diferencias de temperatura entre el invierno y el verano. El nivel de radiación solar recibido es bajo al tratarse de una localización a gran latitud.

Como clima intermedio entre los dos anteriores, se escogió el correspondiente a la ciudad de París. Descrito como *Cfb*: clima oceánico con verano suave, se caracteriza por tener temperaturas relativamente suaves durante todo el año. El nivel de radiación solar recibida es moderado, en comparación con el de Granada.

En el siguiente mapa se señala la localización de las tres ciudades consideradas y el nivel de radiación recibido.

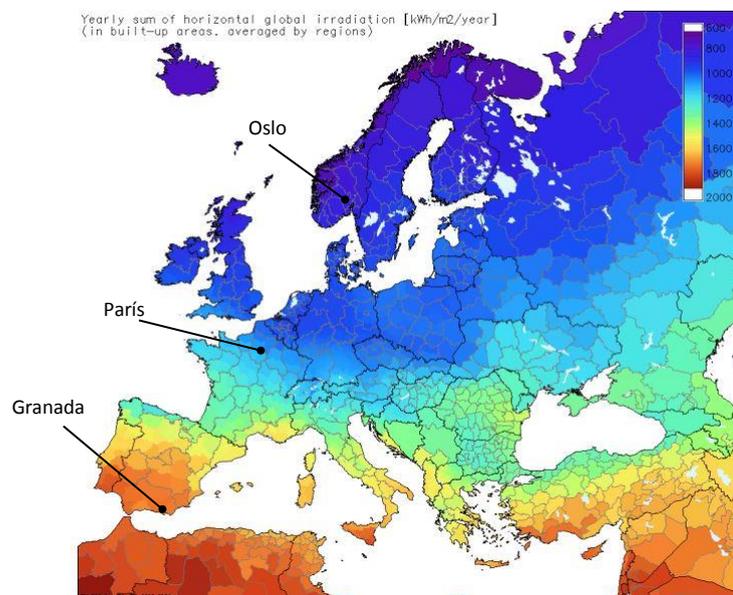


Figura 3.30. Mapa de radiación solar y localización de las ciudades consideradas.

Fuente: (JRC's Institute for Energy and Transport (IET), 2014)

La temperatura promedio mensual de las ciudades estudiadas es significativamente diferente, especialmente en los meses fríos, tal y como se aprecia en la figura 3.31. Puede observarse que, por ejemplo, durante los meses de invierno, las temperaturas en Oslo se sitúan próximas a 0 alcanzando incluso valores negativos, mientras que en París, la media de temperaturas no llega al cero absoluto.

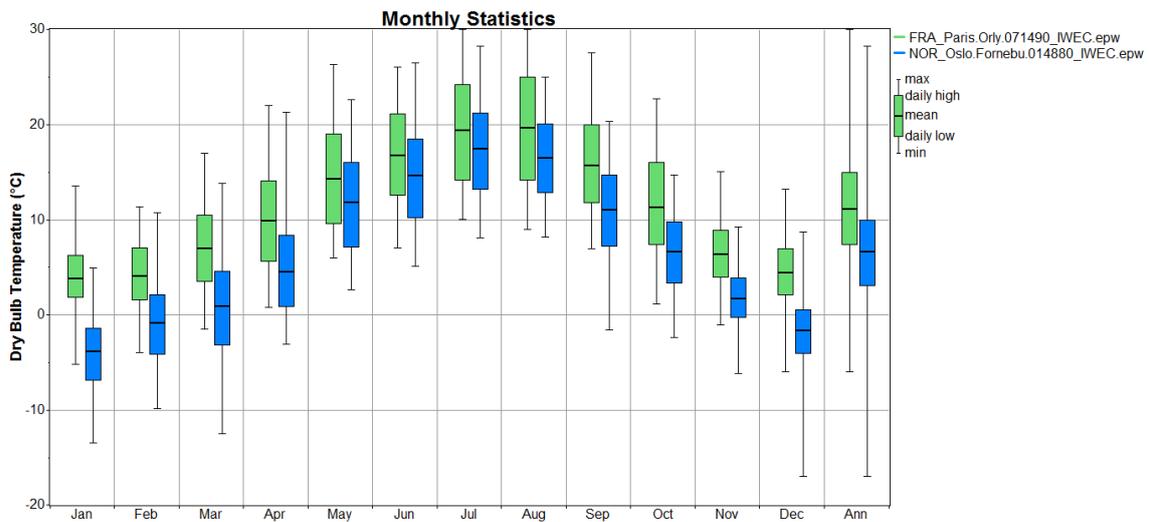


Figura 3.31. Temperatura promedio, máxima y mínima exterior de las ciudades de París (color verde) y Oslo (color azul). Fuente: elaboración propia.

Se aportan más datos sobre las tres localizaciones en la tabla 3.18. La base de datos de radiación solar empleada ha sido PVGIS-CMSAF y puede consultarse online (JRC's Institute for Energy and Transport (IET), 2014)

Tabla 3.18. Datos climáticos y de radiación solar de las localizaciones consideradas. Fuentes: (JRC's Institute for Energy and Transport (IET), 2014) (Climatedata.eu, 2014)

	Granada	París	Oslo
Latitud	37°8'13" N	48°51'23" N	59°54'49" N
Longitud	3°37'53" W	2°21'7" E	10°45'8" E
Elevación [m.s.n.m.]	687	41	20
I_{opt} [deg.]	33	36	40
Irr. Def. [%]	0.1	0.2	0.1
Clasificación climática de Köppen	Csa	Cfb	Dfb
Hh [Wh/m²/day]	5,160	3,260	2,310
NDD	1,318	2,460	4,393

siendo m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar; I_{opt}: Inclinación óptima [deg.]; Irr. Def.: Déficit de la irradiación anual debido al sombreado (horizontal) [%]; Hh: Irradiación horizontal [Wh/m²/día]; NDD: Número de *heating degree-days*.

Se escogió el bloque correspondiente a 15 viviendas (1,099.50 m² de superficie total útil) por representar un caso intermedio de la muestra de elementos de edificios plurifamiliares estudiados anteriormente

Siguiendo la metodología de simulación descrita en este trabajo, y bajo los mismos supuestos, se procedió a calcular la demanda energética final del caso de estudio bajo las diferentes condiciones climáticas.

Los resultados de la simulación con EnergyPlus™, indican una demanda de calefacción significativamente más elevada en Oslo con respecto a las otras dos ciudades (figura 3.32). Sin embargo, la diferencia relativa dentro de la misma ciudad es mayor en Granada, donde la diferencia entre el caso más favorable y el menos favorable es de casi el doble. En cambio, en Oslo esta diferencia es sólo del 50%.

El mínimo valor de la demanda de energía en Granada se obtiene para el edificio de tres plantas de altura mientras que en Oslo se corresponde con el edificio de dos plantas.

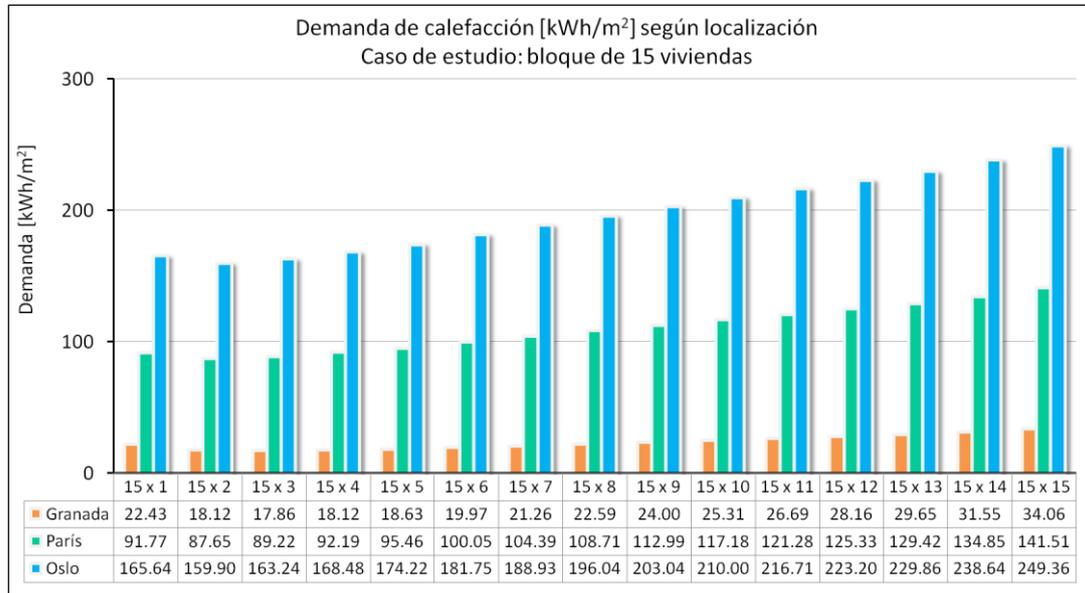


Figura 3.32. Demanda de calefacción del caso de estudio en las tres ciudades comparadas.

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a la demanda de refrigeración, los resultados para la ciudad de Oslo, son prácticamente despreciables. Aunque la demanda de refrigeración en París alcanza unos valores muy bajos, es apreciable la misma tendencia que para Granada y ésta aumenta a medida que el edificio es más alto.

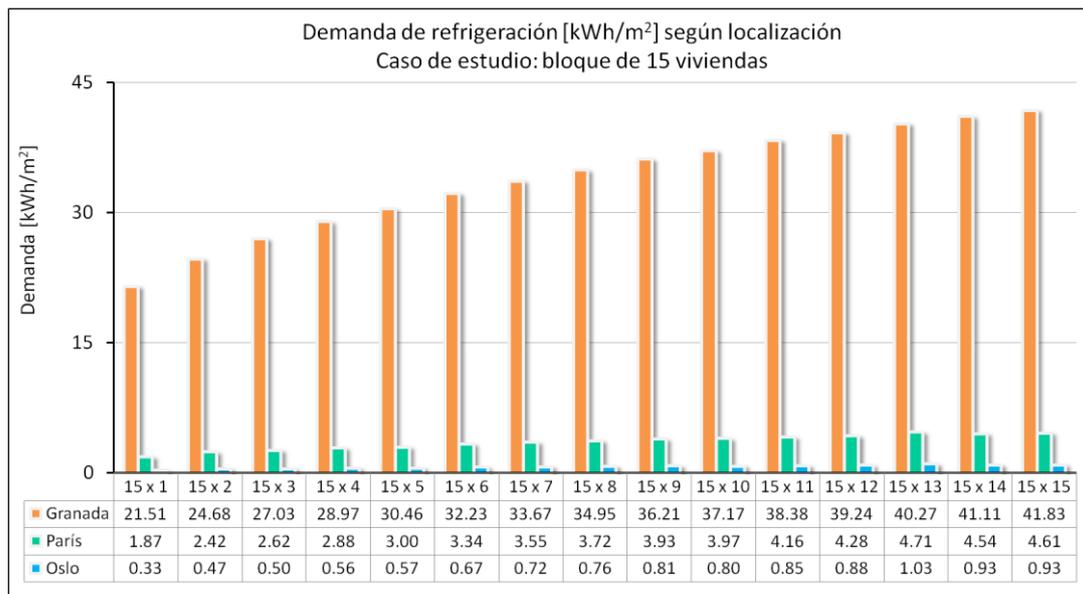


Figura 3.33. Demanda de refrigeración del caso de estudio en las tres ciudades comparadas.

Fuente: elaboración propia.

La demanda total por metro cuadrado es mayor en todos los casos estudiados para la ciudad de Oslo. En los gráficos de la figura 3.34 se comparan los resultados obtenidos por el modelo de cálculo para las tres ciudades. La línea de datos en color negro, representa la demanda energética de los edificios. La producción de energía fotovoltaica se representa en color verde. Por último, la línea roja simboliza la función que se ajusta a la demanda final obtenida como el balance energético de demanda y producción. Se indican también las ecuaciones que se ajustan a la curva del resultado del balance energético.

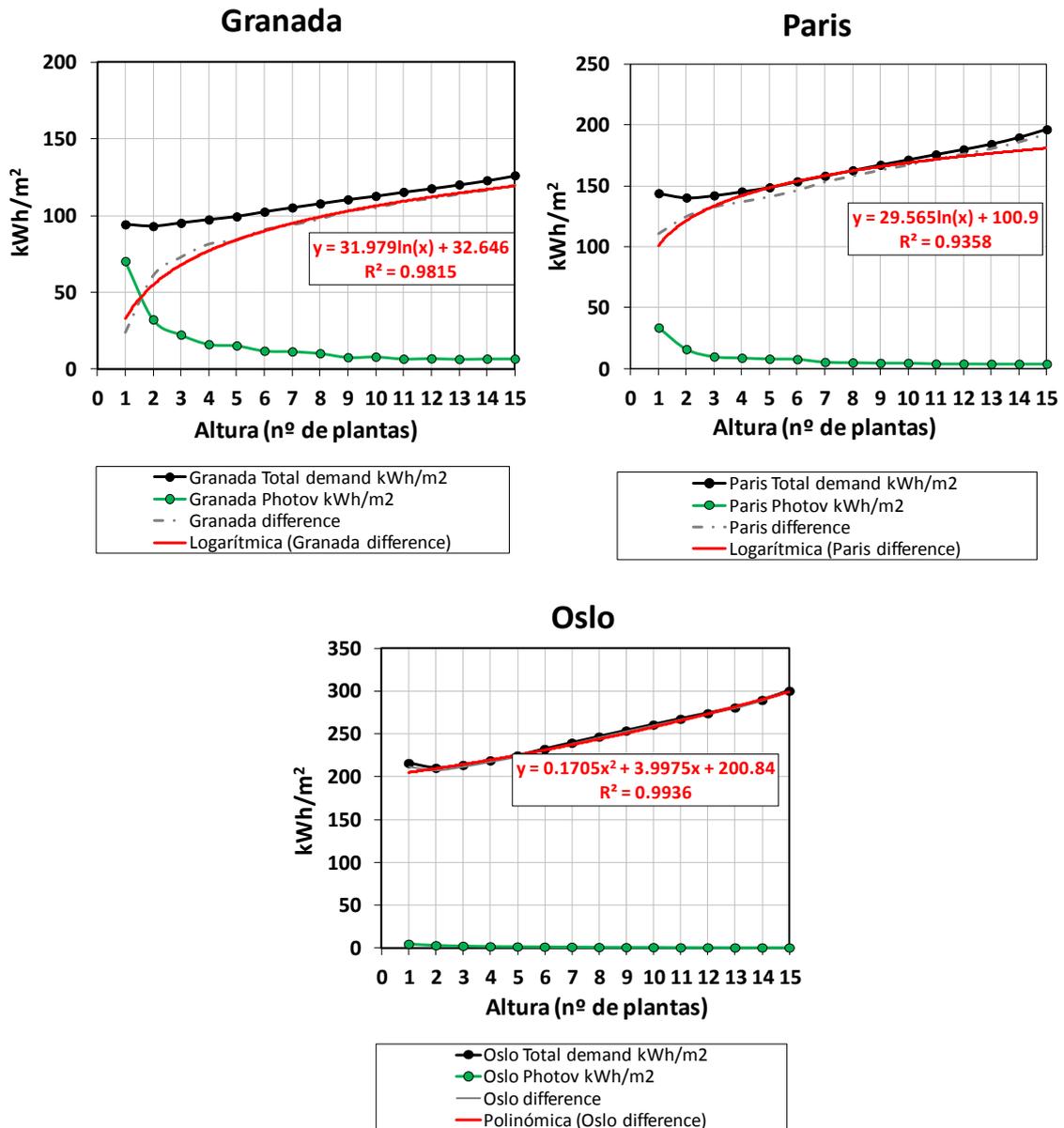


Figura 3.34. Resultados de demanda energética y porcentaje de demanda abastecido por energía fotovoltaica obtenidos con el modelo de evaluación propuesto, para el caso de estudio en las tres localizaciones consideradas. Fuente: elaboración propia.

Estas gráficas revelan que, en consonancia con los datos obtenidos en la sección anterior, existe una altura óptima del edificio en la que la demanda energética se reduce.

Puede observarse que mientras que para las dos ciudades con un clima más cálido la ecuación obtenida es logarítmica, en la ciudad con clima más frío la ecuación adquiere una forma polinómica.

Con respecto a la generación en energía fotovoltaica, en el escenario de clima frío (ciudad de Oslo), la contribución solar al balance energético es casi despreciable debido al bajo nivel de la radiación solar recibida. La ecuación que representa el balance energético en este caso es polinómica (figura 3.34 abajo)

Sin embargo, en climas más cálidos, la contribución de la energía fotovoltaica generada es considerable y adquiere un peso significativo en el balance energético, especialmente en los edificios de una y dos plantas, que son los que disponen de mayor superficie de cubierta para la instalación de los paneles fotovoltaicos. Este hecho hace que la ecuación que representa el balance energético adquiera una forma logarítmica.

Se realizó un test de análisis de varianza para determinar si el modelo desarrollado en esta investigación es sensible a las condiciones climáticas de la localización en la que se evalúa.

La variable independiente o factor es la ciudad en la que se han modelizado los edificios, asumiendo que las condiciones climáticas y de radiación solar son diferentes para cada una. La variable dependiente es la demanda energética final obtenida por el modelo de evaluación propuesto en esta investigación.

La figura 3.35 representa el valor del intervalo de diferencia mínima significativa (LSD) de los resultados obtenidos con el modelo en las tres ciudades consideradas. La gráfica pone de manifiesto que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tres grupos. Los intervalos de valores medios no se solapan y el valor de F es 128.01 y P-valor = 0.

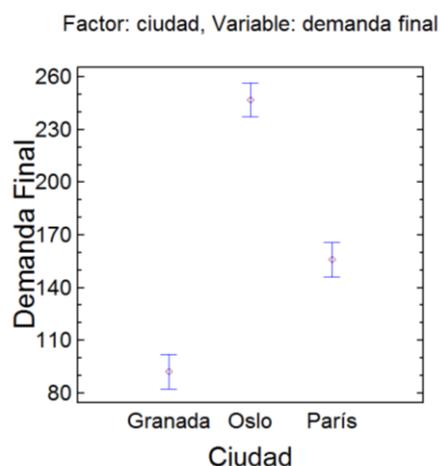


Figura 3.35. Intervalos de diferencia mínima significativa (95% de confianza) según localización.

Fuente: elaboración propia.

Esto significa que, para la misma muestra, evaluada bajo tres diferentes condiciones climáticas, los valores medios obtenidos en el modelo son significativamente diferentes unos de otros. Como consecuencia, podemos concluir que el modelo desarrollado es sensible a la localización evaluada.

Esta conclusión es comprensible, puesto que tanto la demanda de energía de un edificio como el potencial de producción de energía fotovoltaica están fuertemente influenciados por las condiciones climáticas y por el nivel de radiación solar recibida. Dado que el modelo propuesto se basa en el balance energético de demanda y producción, es entendible que los resultados se alteren al cambiar la localización.

Los resultados satisfactorios y la precisión del modelo expuestos en la sección 3.3, dependerán de la zona climática para la cual el modelo ha sido diseñado y calibrado. En nuestro caso, el modelo fue concebido para evaluar el potencial de ahorro energético de tres tipologías edificatorias en un clima mediterráneo y bajo unas condiciones favorables de radiación solar.

Por último, se realiza un nuevo test de análisis de la varianza para comprobar si la relación de dependencia entre la altura del edificio y los resultados del modelo (figura 3.29) es consistente cuando se dan otras condiciones climáticas.

Se realiza el análisis de varianza de forma separada para la misma muestra en las ciudades de París y Oslo. La variable independiente es la altura del edificio, categorizada en baja (de 1 a 5 plantas de altura) o alta (de 6 plantas en adelante). La variable dependiente es la demanda energética final obtenida por el modelo de evaluación propuesto en esta investigación. El caso de estudio es el edificio de 15 viviendas y las condiciones de simulación y las propiedades del edificio son las mismas que se detallaron anteriormente.

A continuación se recogen los intervalos de diferencia mínima significativa para la población dividida en los dos grupos. Los resultados muestran que existen diferencias significativas entre los edificios bajos y altos para las dos ciudades. El valor de F para la ciudad de París es de 27.62 y para Oslo es de 23.09. En este análisis se ha obtenido un P-valor = 0.

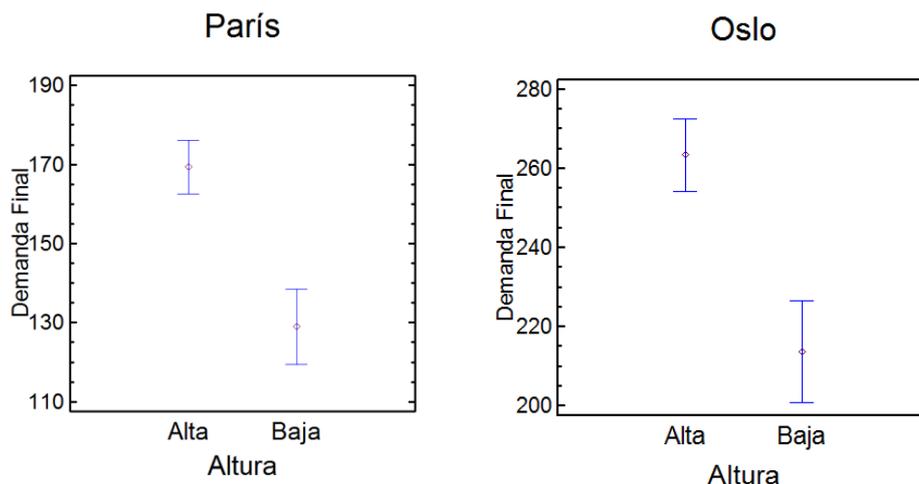


Figura 3.36. Intervalos de diferencia mínima significativa (95% de confianza) según la altura del edificio para las ciudades de París y Oslo. Fuente: elaboración propia.

Estos resultados son consistentes con los obtenidos para la ciudad de Granada, demostrando que existe una relación de dependencia entre la altura del edificio y la demanda energética final, independientemente de las condiciones climáticas en las que se modelizan.



CAPÍTULO 4

CONCLUSSIONS

This research proposes a calculation model to estimate the potential of reduction of the residential building energy demand by optimizing the building height and by integrating photovoltaic power systems.

This model proposes a combination of building efficiency design to reduce external energy demand, along with the self-sufficient by integrating renewable energy generation systems. This approach allows mitigating the carbon emissions due to residential buildings operation, with the consequent environmental benefit to the citizens and the reduction of external energy dependency.

The residential sector in Andalusia is characterized by studying the most common buildings types, obtaining the following results:

- The graphs and formulas obtained allow obtaining, for each value of useful surface area that is to be constructed, the optimal building height where the energy demand supplied by renewable sources is satisfactory.
- The validation of the model confirmed that the building height has effect on the final building energy demand, especially on heating and cooling
- Among the single-family houses studied, the detached house is less efficient than the semi-detached houses
- In the case of multi dwelling buildings, it has been demonstrated that, for each useful surface area, there is a height of the building at which energy demand reaches the minimum possible value.
- In the case of multi dwelling buildings up to 6 height floors, and under the modelling conditions corresponding to Granada, between 10% and 15% of the energy demand can be supplied by the generation of photovoltaic solar energy
- The analysis of temporal variation on the demand, has been highlighted as a powerful tool to know the building thermal behavior and to assess the convenience of improvements actions

- When assessing the energy performance of a residential building, it is interesting to know some characteristics parameters that define the thermal behavior of the building. Some of these parameters are: total number of heating and cooling hours, the peak value of the heating demand and the standard deviation of the demand. The results presented in this research evidence the importance of including these parameters in the study of buildings energy performance. It has been shown that not always the building with lower energy demand is the one that needs fewer hours of heating or cooling needs or has less variability regarding the demand data. This sort of parameters characterizes the thermal behavior of the building and, therefore, their variations have effect on the comfort level of buildings users.
- The methodology developed becomes a useful technical tool, not only in the design phase of the building, but also in the planning of urban areas, providing information of interest to those agents involved in the design of new buildings or new residential spaces. In so far these agents know the efficacy of the use of efficient design measures and the existence of new evaluation techniques, they will have a greater framework of knowledge and will be able to making more effective decisions that allow mitigating the environmental impact derived from the use of buildings.

Regarding the methodology developed, it can be concluded that:

- It has been proposed and validated a model that, from the traditional calculation methods, combines the techniques for efficient design of buildings with the integration of power generation systems from renewable sources in the building.
- This methodology allows assessing the effect of the building height on the result from the balance between the energy demand and the energy generated from renewable source. The results obtained are applicable to

estimate the most suitable geometry features of the building that make it possible to reduce its energy requirements external dependence for supply

The design of building archetypes that characterize the residential sector, and the selection of materials and construction systems commonly used , have allowed us to obtain representative results that are also applicable to future research.

The proposed model is also applicable to buildings under different climatic conditions and even to buildings that belong to other sector.

FUTURE RESEARCH PROSPECTS

The following research prospects are proposed:

- Given that, as has been demonstrated, the proposed model depends of the climatic and radiative conditions, the proportion of energy savings obtained in the case of a warm Mediterranean climate cannot be directly extrapolated to other climatic conditions.
- The proposed methodology is also valid to assess the effect of others factors that impact the final building energy demand, such as: the building heat transfer coefficient, the effectiveness of systems that protect from solar radiation or shadows control devices.
- The developed study should be completed by also including buildings that hold other uses and activities, such as educative or commercial buildings.
- Given that a bottom-up methodology has been applied, and once that data concerning the energy demand, the self-production of photovoltaic power and the energy balance between them is known, it could be possible to develop studies aimed at assessing the macro level (cities), to evaluate the potential carbon emissions savings that could be achieved by incorporating photovoltaic systems in existing buildings.

CONCLUSIONES

En esta investigación se ha propuesto un modelo de cálculo de la demanda energética de los edificios residenciales mediante un estudio de la altura y de la integración de los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica.

Este modelo propone la combinación de un diseño eficiente del edificio para reducir la demanda exterior de energía, con el autoabastecimiento mediante la integración de sistemas de generación de energías renovables. Todo ello permite mitigar el nivel de emisiones de carbono derivados de los usos que se lleva a cabo en los edificios residenciales, con el consecuente beneficio ambiental para el resto de los ciudadanos y la reducción de la dependencia energética de fuentes externas al sistema.

Se han estudiado tres tipologías edificatorias, que caracterizan el sector residencial en Andalucía, obteniéndose los siguientes resultados:

- La validación del modelo ha confirmado que la altura del edificio tiene efecto sobre la demanda energética final, especialmente la de climatización
- De entre las tipologías de edificios unifamiliares, la tipología de vivienda aislada es menos eficiente que la de viviendas adosadas
- En el caso de edificios plurifamiliares se ha demostrado que, para cada valor de superficie total útil, existe una altura del edificio en la que la demanda energética alcanza el mínimo valor posible
- Las gráficas y fórmulas obtenidas permiten, para cualquier superficie útil que se quiera construir, obtener la altura óptima en la que el porcentaje de energía abastecida por fuentes renovables sea satisfactorio
- En edificios plurifamiliares de hasta 6 plantas de altura, y para el caso de Granada, entre el 10 y el 15% de la demanda energética puede ser abastecido por sistemas de generación fotovoltaicos instalados en la cubierta y mitad de la fachada sur del edificio

- El estudio de la variación temporal de la demanda se ha mostrado como una herramienta muy potente para conocer el comportamiento térmico del edificio y valorar la conveniencia de llevar a cabo acciones de mejora
- Al evaluar la eficiencia energética de un edificio residencial, es de interés conocer el valor de ciertos parámetros característicos que definen el comportamiento energético del edificio. Algunos de estos parámetros son: el número total de horas climatizadas, el valor pico y la desviación típica de la demanda. Los resultados expuestos en esta investigación han puesto de manifiesto la importancia de incluir estos parámetros en el estudio. Se ha demostrado que no siempre el edificio de menor demanda es el que precisa menos horas de climatización o presenta menos variabilidad respecto a los datos de la demanda. Este tipo de parámetros caracterizan el comportamiento térmico del edificio y, por tanto, sus variaciones afectan a la calidad del confort térmico de los usuarios.
- La metodología desarrollada se convierte en una herramienta técnica útil, tanto en la fase de diseño del edificio como en el proceso de planificación de zonas urbanísticas, aportando información de interés para aquellos agentes implicados en la concepción de nuevos edificios o espacios residenciales. En la medida en que estos agentes conozcan la eficacia que tienen la aplicación de medidas de diseño eficiente y la existencia de nuevas técnicas de evaluación tendrán un marco de conocimiento mayor y podrán tomar decisiones más efectivas que permitan reducir el impacto ambiental del consumo de los edificios.

Con respecto a la metodología propuesta, puede concluirse:

- Se ha presentado y validado un modelo que, a partir de las metodologías tradicionales de cálculo, compagina técnicas de diseño eficiente de los edificios con la integración de la generación de energía de fuentes renovables en el propio edificio

- La metodología desarrollada permite evaluar la influencia de la altura del edificio en el resultado del balance entre la energía demandada y la energía generada. Los resultados obtenidos son aplicables para estimar las características geométricas óptimas de un edificio que permiten minimizar sus requerimientos energéticos.

La construcción de unos arquetipos que caracterizan al sector residencial y la selección de los materiales y los sistemas constructivos más comunes, nos han permitido obtener resultados representativos del sector y aplicables a futuros estudios. Por otra parte, las ecuaciones que rigen el modelo permiten extrapolar los resultados a un mayor número de casos reales.

El modelo propuesto es aplicable también en edificios bajo otras condiciones climáticas o pertenecientes a otro sector.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se proponen como futuras líneas de investigación:

- Al ser un modelo que, como se ha demostrado, depende de las condiciones climáticas y de la radiación, los porcentajes de ahorro energético calculados, para el caso de un clima Mediterráneo, no son extrapolables a otras condiciones climáticas. Para ello, sería necesario adaptar las propiedades de los arquetipos diseñados a los valores representativos para otras localizaciones, dedicando una especial atención al cálculo del valor U de transmitancia térmica de los elementos de la envolvente
- La metodología propuesta resulta válida para evaluar la influencia de otros factores que afectan a la demanda como pueden ser: el valor de la transmisión térmica de la envolvente y/o la eficacia de los sistemas de protección y control de las sombras
- Completar el estudio desarrollado con la inclusión de edificios de otro uso como pueden ser el educativo o el comercial
- Considerando que se ha utilizado una metodología botton-up, y una vez conocidos los datos relativos a demanda energética, autoproducción de energía fotovoltaica y balance energético, sería posible desarrollar estudios encaminados a evaluar a nivel macro (ciudades) los ahorros en cuanto a emisiones de CO₂ que pudieran conseguirse incorporando sistemas fotovoltaicos a lo ya construido



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aaheim, A., Amundsen, H., Dokken, T., Ericson, T., & Wie, T. (2009). A macroeconomic assessment of impacts and adaptation to climate change in Europe. ADAM project D-A.1.3b.
- Adamski, M. (2007). Optimization of the form of a building on an oval base. *Building and Environment*, 42(4), 1632–1643.
- Agencia Estatal de Meteorología Ministerio de Medio Ambiente. Medio Rural y Urbano. (2012). Agencia Estatal de Meteorología Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Urbano.
- Aksoy, U. T., & Inalli, M. (2006). Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region. *Building and Environment*, 41(12), 1742–1754.
- Albatici, R. (2009). Elements and Strategies for Sustainable Intervention in the Residential Building Sector: a Case Study. *Indoor and Built Environment*, 18(5), 447–453.
- Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F., & Al-Hussain, S. N. (2012). Effect of thermal mass on performance of insulated building walls and the concept of energy savings potential. *Applied Energy*, 89(1), 430–442.
- Alzoubi, H. H., & Malkawi, A. T. (2014). The optimal utilization of solar energy in residential buildings in light of the Jordanian building regulations. *Sustainable Cities and Society*, 6–13.
- America's Climate Choices. The National Academy of Sciences. (2010). *Advancing the Science of Climate Change*.
- Asociacion Española de Normalizacion y Certificacion (AENOR). UNE-EN 15242:2007 Ventilación de los edificios. Métodos de cálculo para la determinación de las tasas de los caudales de aire en edificios, incluyendo la infiltración (2007).
- Asociación Española de Normalizacion y Certificacion (AENOR). UNE-EN-ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. (2006).
- Atmaca, M., Kalaycioglu, E., & Yilmaz, Z. (2013). Evaluation of the Heating & Cooling Energy Demand of a Case Residential Building by Comparing The National Calculation Methodology of Turkey and EnergyPlus through Thermal Capacity

Calculations. In *International Conference for Enhanced Building Operations, ICEBO* (pp. 1–10).

- Augelli, L. (1981). *El aislamiento térmico de los edificios existentes* (p. 292). ITEC.
- Balaras, C. A. (1996). The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods. *Energy and Buildings*, 24(1), 1–10.
- Bektas Ekici, B., & Aksoy, U. T. (2011). Prediction of building energy needs in early stage of design by using ANFIS. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5352–5358.
- Bortolini, M., Gamberi, M., Graziani, A., Mora, C., & Regattieri, A. (2013). Multi-parameter analysis for the technical and economic assessment of photovoltaic systems in the main European Union countries. *Energy Conversion and Management*, 74, 117–128.
- Bouchlaghem, N. (2000). Optimising the design of building envelopes for thermal performance. *Automation in Construction*, 10(1), 101–112.
- Brager, G. S., & de Dear, R. J. (1998). Thermal adaptation in the built environment : a literature review, 17.
- Bruhns, H., & Wyatt, P. (2011). A data framework for measuring the energy consumption of the non-domestic building stock. *Building Research & Information*, 39(3), 211–226.
- Capeluto, I. G. (2003). Energy performance of the self-shading building envelope. *Energy and Buildings*, 35(3), 327–336.
- Capeluto, I., & Shaviv, E. (1997). Modeling the design of urban fabric with solar rights considerations. In *Proceedings of the ISES 1997 Solar World Congress, Taejon* (pp. 148–160).
- Carbó Vela, P. C., & Rocha Rangel, E. (2012). Electrochemical process in solar cells sensibilized with a natural dye. *Investigacion Y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 56, 3–10.
- Carbon Dioxide Information Analysis Center. (2014). Carbon Dioxide Information Analysis Center.
- Cardinale, N., Rospi, G., & Stazi, A. (2010a). Energy and microclimatic performance of restored hypogeous buildings in south Italy: The “Sassi” district of Matera. *Building and Environment*, 45(1), 94–106.
- Cardinale, N., Rospi, G., & Stazi, A. (2010b). Energy and microclimatic performance of restored hypogeous buildings in south Italy: The “Sassi” district of Matera. *Building and Environment*, 45(1), 94–106.

- Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Chaiyapinunt, S., Phueakphongsuriya, B., Mongkornsaksit, K., & Khomporn, N. (2005). Performance rating of glass windows and glass windows with films in aspect of thermal comfort and heat transmission. *Energy and Buildings*, 37(7), 725–738.
- Chan, A. L. S. (2011). Developing a modified typical meteorological year weather file for Hong Kong taking into account the urban heat island effect. *Building and Environment*, 46(12), 2434–2441.
- Chan, H.-Y., Riffat, S. B., & Zhu, J. (2010). Review of passive solar heating and cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 781–789.
- Chen, Y., Liu, J., Pei, J., Cao, X., Chen, Q., & Jiang, Y. (2014). Experimental and simulation study on the performance of daylighting in an industrial building and its energy saving potential. *Energy and Buildings*, 73, 184–191.
- Chwieduk, D., & Bogdanska, B. (2004). Some recommendations for inclinations and orientations of building elements under solar radiation in Polish conditions. *Renewable Energy*, 29(9), 1569–1581.
- Clarke, J. (2001). *Energy Simulation in Building Design. Energy Simulation in Building Design*. Elsevier.
- Climatedata.eu. (2014). Climatedata.eu. Retrieved from <http://www.climatedata.eu/>
- Çomakli, K., & Yüksel, B. (2003). Optimum insulation thickness of external walls for energy saving. *Applied Thermal Engineering*, 23, 473–479.
- Comisión Europea. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. (2009).
- Comisión Europea. Comunicacion de la Comisión Europea. EUROPA 2020: Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador (2010).
- Communities and Local Government. (2009). *A Technical Manual for SBEM, SBEM: Simplified Building Energy Model* (pp. 1–120).
- Cook, P., & Sproul, A. (2011). Towards low-energy retail warehouse building. *Architectural Science Review*, 54(3), 206–214.
- Corrado, V., & Fabrizio, E. (2007). Assessment of building cooling energy need through a quasi-steady state model : Simplified correlation for gain-loss mismatch. *Energy and Buildings*, 39, 569–579.

- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., ... Glazer, J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331.
- CYPE Ingenieros. (2012). CYPE Instalaciones. Retrieved from <http://instalaciones.cype.es/>
- Davies, M. G. (2004). *Building heat transfer*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd.
- Depecker, P., Menezo, C., Virgone, J., & Lepers, S. (2001). Design of buildings shape and energetic consumption. *Building and Environment*, 36(5), 627–635.
- Djuric, N., & Novakovic, V. (2009). Review of possibilities and necessities for building lifetime commissioning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 486–492.
- E.O.L. Berkeley National Laboratory. (2010). Getting Started with EnergyPlus: Basic Concepts Manual – Essential Information You Need About Running EnergyPlus. U.S. Department of Energy: Energy Efficiency & Renewable Energy.
- Eboli, F., Bosello, F., & Pierfederici, R. (2013). Assessing the economic impacts of climate change : an updated CGE point of view, (May), 1–11.
- Elasfour, A. ., Maraqa, R., & Tabbalat, R. (1991). Shading control by neighbouring buildings: application to buildings in Amman, Jordan. *International Journal of Refrigeration*, 14(2), 112–116.
- Emission Database for Global Atmospheric Research. (2010). Emission Database for Global Atmospheric Research. Retrieved from <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>
- EnergyPlus TM. (2013). EnergyPlus Engineering Reference. *EnergyPlus TM*. Retrieved from <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>
- EurObserv'ER. (2008). Photovoltaic energy barometer 2008.
- EurObserv'ER. (2009). Photovoltaic energy barometer 2009.
- EurObserv'ER. (2010). Photovoltaic energy barometer 2010.
- EurObserv'ER. (2011). Photovoltaic energy barometer 2011.
- EurObserv'ER. (2012). Photovoltaic energy barometer 2012.
- EurObserv'ER. (2013). Photovoltaic energy barometer 2013.

- Eurostat. (2014). Eurostat. Retrieved from <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>
- ExxonMobil. (2014). *The Outlook for Energy: A View to 2040 2014*.
- Fang, X., & Li, Y. (2000). Numerical simulation and sensitivity analysis of lattice passive solar heating walls. *Solar Energy*, 69(1), 55–66.
- Fanger, P. O. (1972). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Feng, Y. (2004). Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones. *Energy and Buildings*, 36(12), 1309–1312.
- Fernández Salgado, J. M. (2007). *Guía completa de la energía solar fotovoltaica* (p. 322). AMV Ediciones.
- Florides, G., Tassou, S., Kalogirou, S., & Wrobel, L. (2002). Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. *Applied Energy*, 73(3-4), 299–328.
- Georgios, K., Joe, C., Paul, S., Street, M., & Glasgow, G. (2007). Impact of using different models in practice – a case study with the simplified methods of ISO-13790 Standard and detailed modelling programs. *Proceedings: Building Simulation*, (2006), 39–46.
- Ghiaus, C. (2013). Causality issue in the heat balance method for calculating the design heating and cooling load. *Energy*, 50, 292–301.
- Gijón-Rivera, M., Álvarez, G., Beausoleil-Morrison, I., & Xamán, J. (2011). Appraisal of thermal performance of a glazed office with a solar control coating: Cases in Mexico and Canada. *Building and Environment*, 46(5), 1223–1233.
- Givoni, B. (1991). Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. *Energy and Buildings*, 17(3), 177–199.
- Givoni, B. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. John Wiley & Sons.
- Gov.UK. (2013). United Kingdom housing energy fact file: 2013. Retrieved from <https://www.gov.uk/government/publications/united-kingdom-housing-energy-fact-file-2013>
- Gribbin, J. (1990). *El efecto invernadero y Gaia*. Pirámide.
- Grupo asesor sobre energía y cambio climático de la Organización de las Naciones Unidas. (2010). *Energía para un desarrollo sostenible: informe y recomendaciones*.

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Guichard, S., Miranville, F., Bigot, D., & Boyer, H. (2014). A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate : Model description and elements of validation. *Energy & Buildings*, 70, 71–80.
- Gulledge, J., Richardson, L. J., Adkins, L., & Seidel, S. (2010). Assessing the Benefits of Avoided Climate Change: Cost-Benefit Analysis and Beyond. Workshop proceedings. In *Workshop, Proceedings of on Assessing the Benefits of Avoided Climate Change, Washington, DC, March 16-17 2009*. Pew Center on Global Climate Change: Arlington, VA.
- Gupta, R., & Ralegaonkar, R. V. (2004). Estimation of beam radiation for optimal orientation and shape decision of buildings in India. *Journal of the Institution of Engineers (India): Architectural Engineering Division*, 85(2), 27–32.
- Huang, J., Lv, H., Gao, T., Feng, W., Chen, Y., & Zhou, T. (2014). Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings. *Energy and Buildings*, 75, 504–510.
- Instituto Nacional de Estadística. (2012). Instituto Nacional de Estadística. Retrieved from <http://www.ine.es/>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). (2008). *Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios*.
- Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). (2009). *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Aisladas de Red*.
- Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). (2010). *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011-2020* (p. 173).
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). (2011a). *Análisis del consumo energético del sector residencial en España INFORME FINAL*.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). (2011b). *Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020* (p. 268).
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). (2013). IDAE. Retrieved from www.idae.es
- International Energy Agency. (2008). *IEA. Worldwide trends in energy use and efficiency*.

- International Organization for Standardization (ISO). (2008). *EN ISO 13790:2008, Energy performance of buildings – calculation of energy use for space heating and cooling*.
- Jaworski, M. (2014). Thermal performance of building element containing phase change material (PCM) integrated with ventilation system – An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 70(1), 665–674.
- Jena, A., Mohanty, S. P., Kumar, P., Naduvath, J., Gondane, V., Lekha, P., ... Bhargava, P. (2012). Dye sensitized solar cells: A review. *Transactions of the Indian Ceramic Society*.
- Jones, R. E. (1980). Effects of overhang shading of windows having arbitrary azimuth. *Solar Energy*, 24(3), 305–312.
- JRC's Institute for Energy and Transport (IET). (2014). JRC's Institute for Energy and Transport (IET).
- Kabre, C. (1998). Winshade: a computer design tool for solar control. *Building and Environment*, 34(3), 263–274.
- Kalema, T., Johannesson, G., Pylsy, P., & Hagengran, P. (2008). Accuracy of Energy Analysis of Buildings: A Comparison of a Monthly Energy Balance Method and Simulation Methods in Calculating the Energy Consumption and the Effect of Thermal Mass. *Journal of Building Physics*, 32(2), 101–130.
- Kokogiannakis, G. (2008). *Support for the Integration of Simulation in the European Energy Performance of Buildings Directive*. University of Strathclyde.
- Kouhnavard, M., Ikeda, S., Ludin, N. A., Ahmad Khairudin, N. B., Ghaffari, B. V., Mat-Teridi, M. A., ... Sopian, K. (2014). A review of semiconductor materials as sensitizers for quantum dot-sensitized solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 397–407.
- Kreith, F., Manglik, R. M., & Bohn, M. S. (2012). *Principles of HEat Transfer, Seventh Edition* (7th ed.). México D.F.: CENGAGE Learning.
- Leloux, J., Narvarte, L., & Trebosc, D. (2012). Review of the performance of residential PV systems in France. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1369–1376.
- Littlefair, P. (1998). Passive solar urban design : ensuring the penetration of solar energy into the city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(3), 303–326.
- Littlefair, P. (2001). Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment. *Solar Energy*, 70(3), 177–185.

- Liu, B. Y. H., & Jordan, R. C. (1963). The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors. *Solar Energy*, 7(2), 53–74.
- Lollini, Barozzi, Fasano, Meroni, & Zinzi. (2006). Optimisation of opaque components of the building envelope. Energy, economic and environmental issues. *Building and Environment*, 41(8), 1001–1013.
- Lollini, R., Danza, L., & Meroni, I. (2010). Energy efficiency of a dynamic glazing system. *Solar Energy*, 84(4), 526–537.
- Lomas, K. J. (2007). Architectural design of an advanced naturally ventilated building form. *Energy and Buildings*, 39(2), 166–181.
- Lomas, K. J., Fiala, D., Cook, M. J., & Cropper, P. C. (2004). Building bioclimatic charts for non-domestic buildings and passive draught evaporative cooling. *Building and Environment*, 39(6), 661–676.
- López, M. A., Santiago, I., FJ, B.-O., Moreno-Muñoz, A., & Trillo-Montero, D. (2012). Active occupation profiles in the residential sector in Spain as an indicator of energy consumption. In *2012 IEEE Second International Conference on Consumer Electronics*. Berlin.
- Luque Martínez, T. (2012). *Técnicas de análisis de datos en investigación de mercados*. Madrid: Editorial Pirámide.
- MacGregor, W. A., Hamdullahpur, F., & Ugursal, V. I. (1993). Space heating using small-scale fluidized beds: A techno-economic evaluation. *International Journal of Energy Research*, 17(6), 445–466.
- Maile, T., Fischer, M., & Bazjanac, V. (2007). *Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective*. Center for Integrated Facility Engineering-Sanford University.
- Manioğlu, G., & Yılmaz, Z. (2006). Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort. *Energy and Buildings*, 38(3), 266–272.
- Marks, W. (1997). Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings. *Building and Environment*, 32(4), 331–339. 1323(96)00065-0
- Martín Chivelet, N. (2011). *Integración de la Energía Fotovoltaica en Edificios*. Madrid: Artes Gráficas Gala, S.L.
- McCluney, R. (1998). Advanced Fenestration and Daylighting Systems. In *Daylighting '98, an international conference on daylighting technologies for energy efficiency in buildings*.
- Memon, S. A. (2014). Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 870–906.

- Méndez Muñiz, J. M., & Cuervo García, R. (2011). *Energía solar fotovoltaica*. (F. Editorial, Ed.). Madrid: FC Editorial.
- Mingfang, T. (2002). Solar control for buildings. *Building and Environment*, 37(7), 659–664. doi:10.1016/S0360-1323(01)00063-4
- Ministerio de Fomento. (2008a). *Construcción de Edificios 2003-2007. Licencias Municipales de obra*.
- Ministerio de Fomento. (2008b). Notas metodológicas del Anuario Estadístico.
- Ministerio de Fomento. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico HE, Ahorro de Energía (2009).
- Ministerio de Fomento. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HS, Salubridad (2009).
- Ministerio de Industria Energía y Turismo. (2014). *Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2014-2020* (pp. 1–156).
- Ministerio de Medio Ambiente. (2007). *Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia. Horizonte 2007-2012-2020*.
- Minsiterio de Fomento. (2006). *Código Técnico de la Edificación*.
- Morrissey, J., Moore, T., & Horne, R. E. (2011). Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation. *Renewable Energy*, 36(2), 568–577.
- Neufert, E. (1995). *Arte de proyectar en Arquitectura, 14 ed.* (p. 568). México D.F.: Gustavo Gili.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. a. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572.
- Odum, H. (1995). *Environmental Accounting: Emery and Environmental Decision Making* (p. 384). New York: Wiley.
- Olivier, J. G. J., Janssens-Maenhout, G., Peters, J. A. H. W., & Wilson, J. (2011). *Long-term trend in global CO2 emissions. 2011 Report*.
- Omer, A. (2008). Renewable building energy systems and passive human comfort solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(6), 1562–1587.
- Oral, G. K., & Yilmaz, Z. (2002). The limit U values for building envelope related to building form in temperate and cold climatic zones. *Building and Environment*, 37(11), 1173–1180.

- Ordenes, M., Marinoski, D. L., Braun, P., & R  ther, R. (2007). The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. *Energy and Buildings*, 39(6), 629–642.
- Ord  nez, J., Jadraque, E., Alegre, J., & Martínez, G. (2010). Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2122–2130.
- Ord  nez, J., & Modi, V. (2011). Optimizing CO2 emissions from heating and cooling and from the materials used in residential buildings, depending on their geometric characteristics. *Building and Environment*, 46(11), 2161–2169.
- Organizacion Naciones Unidas. (1998). Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.
- Ourchi, R., Al-Anzi, A., & Krarti, M. (2007). A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 300–305.
- Palmer, J., Boardman, B., Bottrill, C., Darby, S., Hinnells, M., & Killip, G. (2006). *Reducing the environmental impact of housing*.
- Parlamento Europeo y el Consejo. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (2009).
- Parlamento Europeo y el Consejo. Directiva 2012/27/CE de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética (2012).
- Pereira, F. O. R., & Sharples, S. (1991). The development of a device for measuring solar heat gain and shading coefficients of windows in scale models. *Energy and Buildings*, 17(4), 271–281. doi:10.1016/0378-7788(91)90010-Z
- Petersdorff, C., Boermans, T., & Harnisch, J. (2006). Mitigation of CO2 Emissions from the EU-15 Building Stock. Beyond the EU Directive on the Energy Performance of Buildings (9 pp). *Environmental Science and Pollution Research - International*, 13(5), 350–358.
- Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. (2013). *World Population Prospects The 2012 Revision*. New York.
- Presidencia del Gobierno. Real Decreto 1/2012 por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y a la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de (2012).

- Pulselli, R. M., Simoncini, E., & Marchettini, N. (2009). Energy and energy based cost-benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate. *Building and Environment*, 44(5), 920–928.
- Radhi, H. (2008). A systematic methodology for optimising the energy performance of buildings in Bahrain. *Energy and Buildings*, 40(7), 1297–1303.
- Ralegaonkar, R. V., & Gupta, R. (2010). Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2238–2242.
- Raman, P., Mande, S., & Kishore, V. V. . (2001). A passive solar system for thermal comfort conditioning of buildings in composite climates. *Solar Energy*, 70(4), 319–329.
- Reindl, D. T., Beckman, W. A., & Duffie, J. A. (1990). Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, 45(1), 9–17.
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. (2012). Renewables 2012 Global Status Report.
- Reppel, J., & Edmonds, I. . (1998). Angle-selective glazing for radiant heat control in buildings: theory. *Solar Energy*, 62(3), 245–253.
- Roos, A., & Karlsson, B. (1994). Optical and thermal characterization of multiple glazed windows with low U-values. *Solar Energy*, 52(4), 315–325.
- Sage-Lauck, J. S., & Sailor, D. J. (2014). Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building. *Energy and Buildings*, 79, 32–40.
- Salat, S. (2009). Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour. *Building Research and Information*, 37(5), 598–609.
- Saleh, M. A., Kaseb, S., & El-Refaie, M. F. (2004). Glass-azimuth modification to reform direct solar heat gain. *Building and Environment*, 39(6), 653–659.
- Sánchez de Armas, M. del R. (2010). *Simulación de la actividad del colorante en el proceso de captación de energía en celdas solares sensibilizadas*. University of Sevilla.
- Scheuer, C., Keoleian, G. A., & Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, 35(10), 1049–1064.
- Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., & Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871–875.

- Shaviv, E. (1981). The influence of the orientation of the main solar glazing on the total energy consumption of a building. *Solar Energy*, 26, 453–454.
- Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, T., & Mizuno, M. (2004). Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment*, 39(8), 959–967.
- Sigalés, B. (2003). *Transferencia de calor técnica, Vol. 1*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Strand, R. K., Crawley, D. B., Pedersen, C. O., Liesen, R. J., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., & Buhl, W. F. (2000). EnergyPlus: A New-Generation Energy Analysis and Load Calculation Engine for Building Design. In *Proceedings of the ACSA Technology Conference, Cambridge, Massachusetts*.
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819–1835.
- Talyor, R. A., & Miner, M. (2014). A metric for characterizing the effectiveness of thermal mass in building materials. *Applied Energy*, 128, 156–163.
- Tavares, P. F. de A. F., & Martins, A. M. de O. G. (2007). Energy efficient building design using sensitivity analysis—A case study. *Energy and Buildings*, 39(1), 23–31.
- Tuominen, P., Holopainen, R., Eskola, L., Jokisalo, J., & Airaksinen, M. (2014). Calculation method and tool for assessing energy consumption in the building stock. *Building and Environment*, 75, 153–160.
- Tzempelikos, A., & Athienitis, A. K. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, 81(3), 369–382.
- U.S. Department of Energy. (2012). EnergyPlus Energy Simulation Software.
- U.S. Energy Information Administration. (2013). *International Energy Outlook 2013*.
- U.S. Residential Energy Consumption Survey. (2009). U.S. Residential Energy Consumption Survey.
- Unión Española Fotovoltaica. (2013). *Informe Anual 2013*.
- US Air Force. (2001). *Passive Solar Handbook Volume I, Introduction to Passive Solar Concepts*.
- Wan, K. S. Y., & Yik, F. H. W. (2004). Representative building design and internal load patterns for modelling energy use in residential buildings in Hong Kong. *Applied Energy*, 77(1), 69–85.

- Wang, L., Gwilliam, J., & Jones, P. (2009). Case study of zero energy house design in UK. *Energy and Buildings*, 41(11), 1215–1222.
- Wang, W., Rivard, H., & Zmeureanu, R. (2006). Floor shape optimization for green building design. *Advanced Engineering Informatics*, 20(4), 363–378.
- Wauman, B., Breesch, H., & Saelens, D. (2013). Evaluation of the accuracy of the implementation of dynamic effects in the quasi steady-state calculation method for school buildings. *Energy and Buildings*, 65, 173–184.
- Yang, Z., Li, X. H., & Hu, Y. F. (2006). Study on solar radiation and energy efficiency of building glass system. *Applied Thermal Engineering*, 26(8-9), 956–961.
- Yao, R., & Steemers, K. (2005). A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. *Energy and Buildings*, 37(6), 663–671.
- Yu, J., Yang, C., & Tian, L. (2008). Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China. *Energy and Buildings*, 40(8), 1536–1546.
- Zhang, C. X., Bao, Z. G., & Tao, H. J. (2014). Effect of Quenching Temperature and Medium on Properties of TiO₂ Nanotube Arrays in DSSC. *Applied Mechanics and Materials*, 624, 91–96.