UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas

Methodological proposal for Adjusting the residential energy Simulation Models using Experimental Data

*Propuesta metodológica para el ajuste de modelos de
simulación energética de viviendas a partir de datos
experimentales*

PhD Dissertation

Elena Cuerda Barcaiztegui

Architect

Supervisors

Dr. Fco. Javier Neila González. *PhD architect*

Dr. Juan José Sendra Salas. *PhD architect*

2020

Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Methodological proposal for Adjusting the residential energy Simulation Models using Experimental Data (MASMED)

*Propuesta metodológica para el ajuste de modelos de
simulación energética de viviendas a partir de datos
experimentales*

PhD Dissertation
Tesis doctoral

Elena Cuerda Barcaiztegui
Arquitecto

Supervisors /*Directores*

Dr. Fco. Javier Neila González. *Doctor arquitecto*

Dr. Juan José Sendra Salas. *Doctor arquitecto*

2020

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....
de.....de 20....

Presidente:_____

Vocal: _____

Vocal:_____

Vocal:_____

Secretario:_____

Suplente:_____

Suplente:_____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 20.....
en la E.T.S.I. /Facultad.....

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

If you cannot measure it, you cannot improve it.

Lord Kelvin

A large, thick orange ring is centered on the page. A horizontal grey bar with rounded ends passes through the center of the ring.

MIND THE PERFORMANCE GAP

Acknowledgments

After so much time and so many things lived, there are many people whom I would like to thank for their help and good company throughout this long journey.

First, I would like to thank my thesis supervisor Prof. Javier Neila, not only for his invaluable contribution to the development of this investigation but also because thanks to him I began my research career in the ABIO-UPM Research Group 12 years ago. I have to thank him for the support and trust that he has always shown in me, both in the work we have done together and in the preparation of this thesis. This support is especially valuable in a process as long and laborious as a dissertation. Moreover, special thanks to Prof. Juan José Sendra, whose knowledge and meticulous remarks have greatly enhanced the development of this thesis. The final thesis by compendium of articles would not have been possible without the extensive support, understanding and encouragement received from my supervisors.

Thanks to my many colleagues in the ABIO Research Group, from very different countries, throughout this period, for the lunches and coffees that made my experience as a PhD student remarkable. Thanks to Marlix for being my measurement partner and to Jessica, from the TEP130 group in Seville, for showing me the world of the Blower door test, even including a practical class. To Cristina Gazulla and Isabel Sala, my colleagues from the Unesco Chair of the Life Cycle, with whom I learnt a new way to build a research dream team with great potential, able to achieve everything proposed.

My stay at Delft University of Technology marked a before and after for my research career. Thanks to Ulrich Knaack for opening the doors of the Façade Research Group and making me feel part of the team during my 9-month-stay there and for teaching me the endless possibilities that an institution like TU Delft has to offer at research level. Thank you as well to my TU Delft colleagues, Thaleia, Mauricio, Alejandro and Luzma, for our numerous lunchtime discussions, which also contributed to this work. Special thanks to Natalia for making our extremely fruitful collaboration possible, as the development of the monitoring campaign for this thesis would not have been so interesting without it. And of course, Olivia, who shared all her wisdom about research methods, occupant behaviour, and the world of publications; and for being part of a great work duo despite the many kilometres between us.

I am also grateful to Eva for her excellent work as a doctoral secretary, always available and willing to help, and to Anna for help with proofreading the English text.

I cannot fail to name Isabel and Chenchá, the two occupants of the case studies, who opened the doors to their homes, welcoming me as if I were a granddaughter. Without them this thesis could not have been developed.

At a personal level, I would like to thank my mother who would have been very proud of me. Even without her here, I felt her close every day giving me her support as she always did. To my father, for always showing great pride in his daughters. To my sister Irene, for giving me reassurance when I needed it most, encouraging and understanding me, having already gone through this process herself and, to my aunt Rosi, for making the road much more bearable for me, "al tran tran". Many thanks to my friends: Belén, for being my daily companion, sharing so many things and being the rock with whom to share pains and happiness; Ale and Maria, who I have always felt very close, even in the distance, supporting me in every step I have taken. To Eva and Carli for providing much-needed breaks in this process for fun and laughter; always there whenever they were needed. To Paloma and Roberto for the invaluable help with their grandchildren.

To Manuela and Mara, who have come into the world while this thesis was being developed. This makes the completion of this work my third birth. Thanks to them I can appreciate the real importance of individual things, and when it is most needed, they help me forget everything.

And last, but certainly not least, thank you to Roberto, for the commitment and unconditional support he has shown in this project, which he has also made his. Without it this thesis would never have seen the light of day. For his love, company and patience so far, and for all the projects we have left to do together from now on.

Agradecimientos

Después de tanto tiempo y tantas cosas vividas, son muchas las personas a las que tengo que agradecer su ayuda y compañía tanto desde el punto de vista académico como personal en este largo camino.

En primer lugar, a mis directores de tesis. A Javier Neila, no solo por la invaluable contribución que ha tenido en el desarrollo de esta tesis sino porque gracias a él comencé mi carrera investigadora en el Grupo de Investigación ABIO-UPM hace ya 12 años. Tengo que agradecerle el apoyo y confianza que ha mostrado siempre en mí, tanto en los trabajos que hemos realizado juntos como en la elaboración de la tesis, y que en cualquier proceso largo y trabajoso como éste, resulta sumamente valioso. A Juanjo Sendra, cuyas aportaciones y meticulosidad en sus revisiones han enriquecido enormemente el desarrollo de esta tesis. La realización de la tesis por compendio de artículos no hubiera sido posible sin el gran apoyo, comprensión y ánimo que he sentido por parte de mis directores.

A mis compañeras del Grupo de investigación ABIO-UPM, que han sido muchas y de muy distintas procedencias a lo largo de este periodo, por las comidas y los cafés juntas que siempre han servido de desconexión. A Marlix por ser mi compañera de mediciones y a Jessica, del grupo TEPI30 de Sevilla, por descubrirme el mundo del blower door con clase práctica incluida. A Cristina Gazulla e Isabel Sala, mis compañeras de la Cátedra Unesco de Ciclo de Vida, con las que aprendí a construir un equipo investigador con un gran potencial, que podía conseguir todo lo que se propusiera.

Mi estancia en la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft), marcó un antes y un después en mi carrera investigadora. Gracias a Ulrich Knaack por abrirme las puertas del Façade Research Group y considerarme una más del equipo durante los 9 meses de mi estancia allí y por enseñarme las inmensas posibilidades que ofrece a nivel de investigación una institución como TU Delft. A mis compañeros, Thaleia, Mauricio, Alejandro y Luzma, con los que compartí inquietudes y estupendos almuerzos y cafés. A Natalia, por conseguir que estableciéramos una colaboración sumamente fructífera y sin la cuál el desarrollo de la campaña de monitorización de esta tesis no hubiera sido tan interesante. A Olivia, por compartir toda su sabiduría sobre investigación y el mundo de las publicaciones conmigo y por formar un gran tándem entre las dos aunque nos separen muchos kilómetros.

También querría agradecer a Eva el gran trabajo que desempeña en su labor de secretaria de doctorado, siempre disponible y dispuesta a ayudar y a Anna por la mejora que ha supuesto al texto final la revisión que ha realizado del inglés.

Y no puedo dejar de nombrar a Isabel y a Chenchá, las dos vecinas propietarias de los casos de estudio que me abrieron las puertas de su casa y me acogieron como si fuera una nieta más, y sin las cuales, esta tesis no se hubiera podido desarrollar.

A nivel personal, a mi madre, que estaría muy orgullosa de mí, y que sin estar aquí, la he sentido cerca cada día dándome su apoyo como siempre hizo. A mi padre, por mostrar siempre un gran orgullo por sus hijas. A Irene, por darme el relevo cuando más lo necesitaba, animarme y entenderme al haber vivido ya este proceso, y junto a mi tía Rosi, por hacerme el camino mucho más llevadero, “al tran tran”. A Belén, por ser mi compañera del día a día, compartir tantas cosas juntas y ser el gran apoyo con el que compartir los baches y las alegrías. A mis amigas Ale y María que aún en la distancia siempre he conseguido sentir las muy cerca apoyándose en cada paso que he dado. A Eva y Carli por hacer que este proceso tuviera descansos en los que disfrutar y reír y por estar siempre cuando se les necesita. A Paloma y Roberto, por formar esa tribu tan necesaria.

A Manuela y a Mara, que han llegado al mundo mientras se desarrollaba esta tesis y que por ello la finalización de este trabajo será mi tercer parto. Ellas consiguen que uno dé a cada cosa la importancia real que tiene y puedas olvidarte de todo cuando más falta te hace.

Y por último, pero sin el cual esta tesis no hubiese visto la luz, a Roberto, por su compromiso y apoyo incondicional con este proyecto, al hacerlo también suyo. Por su cariño, compañía y paciencia en este camino, y por todos los proyectos que nos quedan por hacer juntos a partir de ahora.

This thesis was developed within the Research Group ABIO-UPM (Bioclimatic Architecture in a Sustainable Environment) within the Doctoral Program of Construction and Architectural Technology R.D. 99/2011 of the Technical University of Madrid.

This thesis has received financial support through a predoctoral contract, within the framework of the Predoctoral trainee researchers (PIF), funded by the Technical University of Madrid and Campus of International Excellence: Moncloa Campus. This contract was granted to the author in the 2016 call for a period of three years (12/12/2016 to 12/12/2019). In addition, I benefited from another predoctoral contract lasting one year and a services contract, both linked to a national research project within the National public-private cooperation programme funded by the Spanish National Plan for Scientific and Technical Research and Innovation, led by the Ministry of Economy and Competitiveness (MINECO), and the European Regional Development Fund (FEDER). The project title is *SHERIFF: Hybrid and Economic System of Integral Flexible Facade Retrofit* (IPT-2011-1239- 380000). This project began in November 2011 and ended in January 2015. The initial stages of this thesis were driven by this project and a scientific article was published in a high impact journal based on the results obtained.

In order to obtain the International Mention, I completed a 9-month research stay at the Delft University of Technology, in the Department of Architectural Engineering and Technology. My work was supervised by professors Ulrich Knaack and Tillman Klein.

This doctoral thesis is presented as a compendium of publications, following the requirements of the Technical University of Madrid approved by the Governing Council of 30th November 2017. It consists of the following sections:

- A. Abstract
- B. Introduction: interest of research, objectives and hypothesis
- C. Methodology: approach and methodology, organization and content
- D. Publications: collection of publications
- E. Summary and analysis of results
- F. Conclusions and future lines of research
- G. Bibliography

The three articles in section “D” must meet the following requirements: the doctoral candidate must be the first of the authors, the articles must appear in the JCR or SJR rankings in positions Q1 or Q2, the maximum number of authors must be six and the director or co-director of the thesis must be co-author in at least one of the articles.

The research results have already been published in five articles. Four of them in journals indexed in the Journal Citation Report (JCR) and one in a journal indexed in Scimago Journal & Country Rank (SJR). Partial advances in research work were also presented at two international conferences. The list of publications that make up this thesis can be seen below.

Esta tesis se ha desarrollado en el seno del Grupo de Investigación ABIO-UPM (Arquitectura Bioclimática en un Entorno Sostenible) dentro del Programa de Doctorado de Construcción y Tecnología arquitectónicas R.D. 99/2011 de la Universidad Politécnica de Madrid.

Para su elaboración he contado con un contrato predoctoral para la realización de los estudios de doctorado, en el marco del Programa Propio de Ayudas para Personal Investigador en Formación (PIF), financiado por la Universidad Politécnica de Madrid y por el Campus de Excelencia Internacional Moncloa. Este contrato me fue concedido en la convocatoria 2016 por un periodo de tres años (2/12/2016-2/12/2019). Además, he sido beneficiaria de otro contrato predoctoral de una duración de un año y un contrato por obra y servicio, ambos vinculados a un proyecto de investigación del Programa Estatal de I+D+i de cooperación público-privada cuyo nombre es SHERIFF: Sistema Híbrido y Económico de Rehabilitación Integral Flexible de Fachadas (IPT-2011-1239- 380000). El proyecto empezó a ejecutarse en noviembre de 2011 y finalizó en enero de 2015; fue cofinanciado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), dentro del Plan Estatal de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011 (INNPACKTO 2011), y la Unión Europea con cargo a fondos FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional). Este proyecto supuso el comienzo de esta tesis y sus resultados dieron lugar a un artículo científico publicado en una revista de alto impacto.

Con el fin de obtener la Mención Internacional, realicé una estancia de investigación de 9 meses en la Universidad Tecnológica de Delft, en el Departamento de Ingeniería Arquitectónica y Tecnología. Mi trabajo fue supervisado por los profesores Ulrich Knaack y Tillman Klein.

Esta tesis doctoral se presenta por compendio de publicaciones, siguiendo los requisitos exigidos por la Universidad Politécnica de Madrid, aprobados por Consejo de Gobierno de 30 de noviembre de 2017. Se compone de los siguientes apartados:

A. Resumen

B. Introducción general: interés de la investigación, objetivos e hipótesis

C. Metodología: enfoque y metodología, organización y contenido

D. Publicaciones: colección de publicaciones

E. Resumen y análisis de resultados

F. Conclusiones y futuras líneas de investigación

G. Bibliografía

Los tres artículos del apartado “D” deben cumplir con los siguientes requisitos: el doctorando debe ser el primero de los autores; los artículos deben figurar en los listados JCR o SJR en las posiciones Q1 o Q2; el número máximo de autores debe ser seis y al menos en uno de los artículos el director o codirector de la tesis debe ser coautor.

Los resultados de la investigación han sido ya publicados y difundidos en cinco artículos, cuatro de ellos en revistas indexadas en Journal Citation Report (JCR) y uno en una revista indexada en Scimago Journal & Country Rank (SJR). También se presentaron los avances parciales del trabajo de investigación en dos congresos internacionales. A continuación se puede ver el listado de las publicaciones que componen esta tesis.

List of publications

Publications in indexed journals that meet the requirements of the Technical University of Madrid.

ARTICLE 1:

Cuerda, E., Pérez, M., & Neila, F. J. (2014). Facade typologies as a tool for selecting refurbishment measures for the Spanish residential building stock. *Energy and Buildings*, 76, 119-129. Q1 (JCR).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.054>

ARTICLE 3:

Cuerda, E., Guerra-Santin, O., & Neila, F. J. (2017). Defining occupancy patterns through monitoring existing buildings= Definiendo patrones de ocupación mediante la monitorización de edificios existentes. *Informes de la Construcción*, 69(548), 1-10. Q1 (SJR).
<https://doi.org/10.3989/id.53526>

ARTICLE 4:

Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, & Neila, F. J. (2019). Comparing the impact of presence patterns on energy demand in residential buildings using measured data and simulation models. *Building Simulation* (pp. 1-14). Tsinghua University Press. Q2 (JCR), Q1 (SJR).
<https://doi.org/10.1007/s12273-019-0539-z>

ARTICLE 5:

Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, J. J., & Neila, F. J. (2019). Understanding the performance gap in energy retrofitting: input measured data to adjust building simulation models. *Energy and Buildings*, 209, 15 Feb.2020, 109688. Q1 (JCR).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109688>

Publications in indexed journals that do not meet the requirements of the Technical University of Madrid.

ARTICLE 2:

Guerra-Santin, O., Herrera, N. R., Cuerda, E., & Keyson, D. (2016). Mixed methods approach to determine occupants' behaviour—Analysis of two case studies. *Energy and Buildings*, 130, 546-566. Q1 (JCR).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.084>

Publications in international conference proceedings with reviewers connected to the thesis.

CONFERENCE PAPER 1:

E. Cuerda, O. Guerra-Santin, J. Neila, N. Romero. Post-occupancy monitoring of two flats in Madrid: development and assessment of a mixed methods methodology. *31st International PLEA Conference*. Architecture in (R)evolution. 09-11/09/2015.
<http://oa.upm.es/38270/>

CONFERENCE PAPER 2:

E. Cuerda, O. Guerra-Santin, J. Neila, N. Romero. Evaluation and comparison of building performance in use through on-site monitoring and simulation modeling. Third IBPSA – England Conference. *BSO 2016 Building simulation and optimization*. 12-14/09/2016.
<http://www.ibpsa.org/proceedings/BSO2016/p1012.pdf>

Listado de publicaciones

Publicaciones en revistas indexadas que cumplen exigencias de la Universidad Politécnica de Madrid.

ARTICULO 1:

Cuerda, E., Pérez, M., & Neila, F. J. (2014). Facade typologies as a tool for selecting refurbishment measures for the Spanish residential building stock. *Energy and Buildings*, 76, 119-129. Q1 (JCR).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.054>

ARTICULO 3:

Cuerda, E., Guerra-Santin, O., & Neila, F. J. (2017). Defining occupancy patterns through monitoring existing buildings= Definiendo patrones de ocupación mediante la monitorización de edificios existentes. *Informes de la Construcción*, 69(548), 1-10. Q1 (SJR).
<https://doi.org/10.3989/id.53526>

ARTICULO 4:

Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, & Neila, F. J. (2019). Comparing the impact of presence patterns on energy demand in residential buildings using measured data and simulation models. *Building Simulation*, 12(6), 985-998. Q2 (JCR), Q1 (SJR).
<https://doi.org/10.1007/s12273-019-0539-z>

ARTICULO 5:

Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, J. J., & Neila, F. J. (2019). Understanding the performance gap in energy retrofitting: input measured data to adjust building simulation models. *Energy and Buildings*, 209, 15 Feb.2020, 109688. Q1 (JCR).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109688>

Publicaciones en revistas indexadas sin cumplir exigencias de la Universidad Politécnica de Madrid.

ARTICULO 2:

Guerra-Santin, O., Herrera, N. R., Cuerda, E., & Keyson, D. (2016). Mixed methods approach to determine occupants' behaviour—Analysis of two case studies. *Energy and Buildings*, 130, 546-566. Q1 (JCR).
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.084>

Publicaciones en actas de congresos internacionales con revisores relacionadas con la tesis.

COMUNICACIÓN 1:

E. Cuerda, O. Guerra-Santin, J. Neila, N. Romero. Post-occupancy monitoring of two flats in Madrid: development and assessment of a mixed methods methodology. 31st International PLEA Conference. *Architecture in (R)evolution*. 09-11/09/2015.
<http://oa.upm.es/38270/>

COMUNICACIÓN 2:

E. Cuerda, O. Guerra-Santin, J. Neila, N. Romero. Evaluation and comparison of building performance in use through on-site monitoring and simulation modelling. Third IBPSA – England Conference. BSO 2016 Building simulation and optimization. 12-14/09/2016.
<http://www.ibpsa.org/proceedings/BSO2016/p1012.pdf>

Index

A. ABSTRACT	17
B. INTRODUCTION	23
B.1. PROBLEM STATEMENT AND JUSTIFICATION OF RESEARCH	25
B.2. HYPOTHESIS, RESEARCH QUESTIONS AND OBJECTIVES	33
C. METHODOLOGY	37
C.1. METHODOLOGY AND THESIS STRUCTURE.....	39
D. PUBLICATIONS.....	45
E. SUMMARY AND ANALYSIS OF RESULTS.....	171
E.1. PHASE 1. Identification and classification of the construction types of residential building façades in Madrid (1950-1980).....	173
E.2. PHASE 2. Experimental collection of data on the variables that influence the thermal-energy behaviour of the building and a combination of qualitative and quantitative data.	182
E.3. PHASE 3. Definition of actual and standardized presence patterns and their relationship with national and international standards.....	195
E.4. PHASE 4 AND ANALYSIS OF RESULTS	204
F. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH	231
F.1. CONCLUSIONS.....	233
F.2. FUTURE RESEARCH	238
H. BIBLIOGRAPHY	253

Indice

A. RESUMEN	17
B. INTRODUCCIÓN	23
<i>B.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN</i>	<i>25</i>
<i>B.2. HIPÓTESIS, PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS</i>	<i>33</i>
C. METODOLOGÍA.....	37
<i>C.1. METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS</i>	<i>39</i>
D. PUBLICACIONES	45
E. RESUMEN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	171
<i>E.1. FASE 1. Identificación y clasificación de los tipos constructivos de fachada de edificios residenciales en Madrid (1950-1979).</i>	<i>173</i>
<i>E.2. FASE 2. Obtención de las variables que influyen en el comportamiento térmico del edificio de manera experimental y combinación de datos cualitativos y cuantitativos.</i>	<i>182</i>
<i>E.3. FASE 3. Definición de los patrones de presencia reales y estandarizados y su relación con normas nacionales e internacionales.</i>	<i>195</i>
<i>E.4. FASE 4 Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</i>	<i>204</i>
F. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS.....	231
<i>F.1. CONCLUSIONES</i>	<i>233</i>
<i>F.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....</i>	<i>238</i>
H. BIBLIOGRAFÍA.....	253

A. Abstract

A. Resumen

A. Abstract
A. Resumen

The energy consumption of buildings represents more than 40% of the total use of final energy in the European Union [1]. This is why the objectives of the EU's energy and climate framework for 2030 and 2050 focus on accelerating the process that is underway to reduce CO₂ emissions, improving energy efficiency in the building from retrofitting and the use of clean energies [2].

In the case of Spain, the construction sector is geared towards the refurbishment and modernization of buildings since a large part of the residential building stock is outdated, as it was built prior to 1979, when basic energy and habitability requirements were introduced [3]. In order to carry out effective retrofitting policies, it is necessary to know the housing stock, to have real information about the buildings, identifying and cataloguing the constructions [4-6] and generating databases to monitor compliance with regulations and statistics relating to the real building stock. The most appropriate refurbishment strategies for each building [7] are selected by employing a much more exhaustive approach, evaluating each of the influential variables on the thermal and energy behaviour of the building and their individual repercussion on the energy consumption of the building.

Building energy simulation tools are used to predict the energy performance of buildings [8], for example in energy certification processes. However, numerous studies have shown [9-14] that there is a discrepancy between the expected and real energy behaviour of buildings; this is known as the "performance gap".

User behaviour is one of the main variables identified in the literature as relevant [15, 16], given the impact of occupants' behaviour on the demand and energy consumption of the building. Likewise, the stochastic nature of the user behaviour hinders the definition of actual occupancy patterns that can be used in energy simulation programs and represent the social reality studied as accurately as possible.

This thesis concentrates on the exploration of methods for reducing the performance gap between the expected and actual performance of buildings using a building dynamic simulation tool. This study pursues two main purposes. Firstly, it aims to develop a methodological proposal for the adjustment of resi-

El consumo energtico de los edificios representa ms del 40% del uso total de energa final en la Unin Europea (UE) [1]. Es por ello que los objetivos del marco de energa y clima para el 2030 y el 2050 de la UE se centran en acelerar el proceso iniciado para la reducci n de emisiones de CO₂, mejorando la eficiencia energtica en la edificaci n desde la rehabilitaci n y el uso de energas limpias [2].

En el caso concreto de Espa a, el sector de la construcci n de viviendas se dirige hacia la rehabilitaci n y modernizaci n de los edificios, debido a que una gran parte del parque edificado est desactualizado por construirse en una poca (anterior a 1979) en la que no exista una normativa con exigencias energticas y de habitabilidad bsicas [3]. Para llevar a cabo polticas de rehabilitaci n eficaces, es necesario conocer nuestro parque edificado, tener informaci n real, identificar y catalogar los edificios [4-6]. Gracias a esto se podr n generar bases de datos para el control del cumplimiento de normativas y para la elaboraci n de estadsticas sobre el parque inmobiliario. Las estrategias de rehabilitaci n ms apropiadas para cada edificio [7] podr n entonces ser seleccionadas haciendo una aproximaci n mucho ms exhaustiva, evaluando cada una de las variables que influyen en el comportamiento trmico y energtico del edificio, y estudiando la repercusi n que tiene cada una de ellas en el consumo energtico.

Las herramientas de simulaci n energtica son utilizadas para predecir el comportamiento energtico de los edificios [8], por ejemplo, en los procesos de certificaci n energtica. Sin embargo, numerosos estudios han demostrado [9-14] que existe una discrepancia entre el comportamiento energtico esperado y el real de los edificios, denominado "performance gap" o brecha de comportamiento.

El comportamiento de los usuarios es una de las variables identificadas en la literatura como relevante en la repercusi n que tiene en la demanda y consumo energtico del edificio [15, 16]. Asimismo, su carcter estocstico o aleatorio dificulta la definici n de unos patrones de ocupaci n precisos, que representen lo ms certeramente posible la realidad social estudiada, y puedan ser utilizados en los programas de simulaci n energtica.

Esta tesis se centra en la exploraci n de mtodos para la reducci n de la brecha que existe entre el comportamiento esperado y medido de la edificaci n a partir del uso de una herramienta de simulaci n dinmica de edificios. Este estudio persigue dos prop sitos principales: por un lado, desarrollar una

dential energy simulation models using experimental data to help reduce the level of uncertainty of the results. Its second purpose is to quantify the relative effect of measured parameters compared to the standardized parameters for building and occupant desription, on the heating and cooling consumption by adjusting simulation models.

This methodological proposal is carried out and tested in two experimental studies in Madrid, selecting two collective housing buildings identically constructed originally, although one has been retrofitted while the other has not. In-situ measurements and a monitoring campaign were performed, and the results were used to define use and occupancy patterns [17, 18], based on the application of the mixed-method approach [19, 20]. These patterns have been used to adjust the input parameters of energy simulation models with real data in order to study the energy consumption of the models and to distinguish the impact of each of the parameters studied through a parametric study.

propuesta metodológica para el ajuste de modelos de simulación energética de vivienda, a partir datos experimentales, que permita reducir el nivel de incertidumbre de los resultados; y por otro, cuantificar el efecto que tiene, en el consumo de calefacción y refrigeración, el uso de parámetros medidos en comparación con parámetros estandarizados en el ajuste de modelos de simulación energética.

La propuesta metodológica se aplica y testea en dos estudios experimentales, seleccionando dos edificios de vivienda colectiva del mismo tipo constructivo ubicados en Madrid, uno rehabilitado y otro sin rehabilitar. En ellos se han realizado monitorizaciones y mediciones in situ cuyos resultados han sido utilizados para definir los patrones de uso y ocupación [17, 18], a partir de la aplicación de los métodos mixtos [19, 20]. Estos patrones han sido utilizados para ajustar los parámetros de entrada de modelos de simulación con datos reales, con el fin de estudiar el consumo energético de los modelos, y de realizar un estudio paramétrico que permita independizar la repercusión de cada uno de los parámetros estudiados.

Research scheme

The case studies analysed in this research show a discrepancy between models adjusted with standardized and measured data. The results show that the estimated potential savings are four times greater when adjusting the models with standardized data rather than with measured data. The results on the energy consumption of the models have highlighted the importance of adjusting the user behaviour parameters (reaching differences of up to 98%) and the weather data parameters (reaching differences of up to 190%) as they have been identified as the most relevant variables in the difference between adjusting the models with measured or standardized data.

This study constitutes an advance for future retrofitting programs in which the use of energy residential simulation models can be promoted, from the design phase, adjusted with real data of the characteristics of the building and its occupants. It allows the promotion of simulation programs as predictive tools to accurately estimate the energy savings and amortization periods resulting from the intervention. In addition, the need to promote the definition of real occupation patterns through national housing policies has been demonstrated, so that they reflect the different households, socio-economic factors, customs, ways of life, and user habits and attitudes. In turn, this will allow the accurate calculation of energy savings in retrofitting work and the future energy behaviour of new buildings.

Los casos de estudio analizados en la presente investigación han mostrado que existe una discrepancia en función de los datos utilizados para el ajuste en los modelos, dándose un potencial de ahorro estimado en el consumo de calefacción cuatro veces mayor al ajustar los modelos con datos estandarizados en vez de con datos medidos. Los resultados sobre consumo energético de los modelos han revelado la importancia del ajuste de los parámetros del comportamiento de los usuarios (alcanzando diferencias de un 98%) y de los datos climáticos (alcanzando diferencias de un 190%), los que se han identificado como más relevantes en la diferencia entre ajustar los modelos con datos medidos o estandarizados.

Este trabajo constituye un avance para los futuros planes de rehabilitación en los que se pueda promover el uso de modelos de simulación energética de viviendas, desde la fase de diseño, ajustados con datos reales de los edificios y sus ocupantes. Su aplicación permitirá fomentar que las herramientas de simulación sean utilizadas como herramientas predictivas para estimar de manera fiable los ahorros energéticos que se producen tras las intervenciones de rehabilitación y, consecuentemente, los periodos de amortización. Además, se ha demostrado que existe la necesidad de promover, desde las políticas nacionales de vivienda, la definición de patrones de ocupación reales, que reflejen la diversidad de hogares, los factores socioeconómicos, las costumbres, modos de vida y los hábitos y actitudes de los usuarios, que permitan estimar de manera precisa los ahorros energéticos en los trabajos de rehabilitación, así como el comportamiento energético futuro de los edificios en los casos de obra nueva.

B. Introduction
ntroducci n

B. Introduction

B. Introducci3n

B.1.1. Energy retrofitting of residential buildings

In recent years, there has been a significant change in the regulations relating to energy efficiency in buildings. These changes have been brought about mainly by the need to comply with international measures such as the Kyoto Protocol [22], or the more recent Paris Agreement [23], which seek to reduce greenhouse gas emissions through the mitigation, adaptation and resilience of ecosystems to global warming. The energy consumption of buildings represents more than 40% of the total final energy consumption and 36% of the total CO₂ emissions of the European Union [24]. Therefore, the objectives set in the European Union's framework for energy and climate for 2030 and 2050 focus on accelerating the current process for the reduction of CO₂ emissions, improving energy efficiency in buildings following retrofitting and using clean energy [25].

B.1.1. La rehabilitación energética de la edificación residencial

En los últimos años se está reduciendo un importante cambio en la normativa relacionada con la eficiencia energética de la edificación. Estos cambios se introducen para dar cumplimiento a medidas internacionales como el Protocolo de Kyoto, o el más recientemente acordado Acuerdo de París, que persiguen la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del calentamiento global. El consumo de energía de los edificios representa más del 40% (Figure 1) del consumo total de energía final y el 36% de las emisiones totales de la Unión Europea [24]. Por ello, los objetivos planteados en el marco de energía y clima de la Unión Europea, para los años 2030 y 2050, se centran en acelerar el proceso ya iniciado para la reducción de emisiones de CO₂, mejorando la eficiencia energética en la edificación desde la rehabilitación y el uso de energías limpias [25].

Figure 1. Final energy consumption by sector, EU-28, 2017.

Source: Drawn up by the author based on Energy statistics - an overview. Eurostat.

Given the increasing energy demand in Spain, the residential sector is key in the framework of the current energy policy. In 2016, the consumption of this sector already accounted for 18.3% of the total final energy consumption and 30% of electricity consumption [26]. In order to reduce the energy consumption of homes, the residential construction sector is focusing mostly on the retrofitting and modernization of buildings. In Spain, 44% of the total residential buildings predate the Basic Standard of Thermal Conditions in Building approved in 1979 [26, 27]. As the thermal characteristics of the envelope were limited in this standard, these buildings are obsolete with respect to the current regulatory requirements on habitability and interior comfort conditions.

The current economic crisis in Spain has made energy poverty an increasingly pressing matter, especially in social housing, where families often cannot cope with the costs of energy services to maintain basic conditions of habitability and wellbeing in their homes. In Spain, ranked 4th among European Union countries in terms of the number of people affected by energy poverty, 17% of the population has difficulty coping with this expense [28]. This situation of energy precariousness is mostly the result of low household incomes, high energy prices, high housing prices, and poor construction quality. Therefore, in order to improve the quality of housing and the energy consumption it generates it is essential to undertake the modernization and retrofitting of Spanish residential building stock. However, given the high percentage of households in Spain living in housing blocks (70%), when comprehensive retrofitting is being planned, it should be taken into consideration that in addition to the economic difficulties, the different neighbours' associations need to reach a consensus on the action to be carried out, often a complicated task.

In order to implement effective retrofitting policies, it is necessary to have an in-depth knowledge of the building stock and its residents, and it is therefore essential to obtain real information through experimental studies. The benefits of this information are two-fold. It firstly allows the buildings be identified and catalogued, in turn generating databases for the

En el caso concreto de España, el sector residencial resulta clave en el marco de la política energética actual, debido a la creciente demanda que supone. El consumo de este sector representaba ya en 2016 el 18,3% del consumo de energía final total y el 30% del consumo eléctrico [26]. Para poder reducir el consumo energético de las viviendas, los esfuerzos del sector de la construcción residencial se dirigen principalmente hacia la rehabilitación y la modernización de los edificios. El 44% del total de los edificios de viviendas se construyeron antes de que se aprobara la Norma Básica de Condiciones Térmicas en la Edificación en 1979 [26, 27]. En esta norma, se limitaban las características térmicas de la envolvente. Por lo tanto, estos edificios se encuentran completamente alejados respecto a los actuales requerimientos normativos sobre habitabilidad y condiciones de confort interior.

La situación de crisis vivida en nuestro país ha hecho que la pobreza energética sea un problema cada vez más acuciante, especialmente en la vivienda social, ya que las familias no pueden hacer frente a los gastos que suponen los servicios de energía para poder mantener las condiciones básicas de bienestar y habitabilidad en sus viviendas. En España, el 17% de la población tiene dificultades para hacer frente a este gasto, y es el 4º país de la Unión Europea con más personas en situación de pobreza energética [28]. Las causas que generan esta precariedad energética son principalmente: bajos ingresos del hogar, precios elevados de la energía y de la vivienda y calidad insuficiente de las construcciones. Por ello, resulta fundamental afrontar la modernización y renovación del stock de edificios de viviendas en nuestro país para mejorar la calidad de las viviendas y reducir el consumo energético que generan. Sin embargo, debido a que hay un alto porcentaje de los hogares de España, 70%, que vive en bloques de viviendas, a la hora de afrontar la rehabilitación integral, a las dificultades económicas hay que añadir otra más, debido a que las comunidades de vecinos deben llegar a un consenso sobre la actuación a realizar, y esto no suele ser fácil de conseguir.

Para llevar a cabo la implementación de políticas de rehabilitación eficaces es necesario conocer en profundidad nuestro parque edificado y a los usuarios que habitan estos edificios y, para ello, resulta fundamental obtener información real a través de estudios experimentales. Esta información nos permite dos cosas; por un lado, identificar y catalogar los edificios para generar bases de datos a efectos de control del

purpose of complying with regulations and drawing up statistics on the real building stock. Secondly, information about the occupants and their customs and habits when using their homes can be obtained. Thus, a far more comprehensive approach provides information on how the buildings have been built, and how their residents use them, in order to assess these buildings' energy performance and select the most appropriate retrofitting strategies for each case.

B.1.2. Predictive evaluation of the energy performance of buildings: "performance gap"

Energy simulation programs are the tools used to help predict the thermal behaviour of buildings and the comfort of their occupants [8, 21]. In recent decades, interest in these programs has increased given their usefulness in the search for more efficient buildings in terms of energy. Specialists in the design phase, whether in retrofitted or new building projects, use these tools as a predictive method to evaluate and select the most energy efficient solutions for building envelopes and HVAC systems. Indeed, numerous regulations, including the Spanish Technical Code, use these programs as a method for verifying compliance with current regulations related to the energy efficiency of buildings.

Interest in these tools has led to the appearance of numerous energy simulation programs for buildings, although EnergyPlus [29], TRNSYS [30], and ESP-r [31] remain the most widely used by the scientific community [32]. In addition, plugins such as Insight [33], IES [34], OpenStudio [35] and Skelion [36] are also emerging, and can be linked to architectural design programs used for energy evaluations of the designed model or evaluations of specific aspects such as the incorporation and integration of photovoltaic solar energy.

However, the usefulness of energy simulation programs has been questioned in numerous studies [10, 13, 14, 21, 37, 38] which show that the actual behaviour of buildings does not reflect that calculated with these tools. This reduces the major predictive potential of these tools and increases the uncertainty of the energy consumption results calculated through simulations. These differences can be attributed to a

cumplimiento de normativas y para la elaboración de estadísticas sobre el parque inmobiliario; y por otro, obtener información sobre los usuarios que viven estos edificios y conocer sus costumbres y hábitos en el uso de sus viviendas. De esta manera, mediante una aproximación mucho más exhaustiva, se podrá saber cómo han sido construidos los edificios, quién los habita y qué uso se hace de ellos, con el fin de evaluar el comportamiento energético de la edificación y así poder escoger las estrategias de rehabilitación más apropiadas para cada caso.

B.1.2. Evaluación predictiva del comportamiento energético de los edificios: "performance gap"

Los programas de simulación energética son las herramientas utilizadas para ayudar a predecir el comportamiento térmico de los edificios y el confort de sus ocupantes [8, 21]. En las últimas décadas ha habido un interés creciente por estos programas dada su utilidad en la búsqueda de edificios cada vez más eficientes desde el punto de vista energético. Los técnicos en la fase de diseño, ya sea en proyectos de rehabilitación o de nueva planta, utilizan estas herramientas como método predictivo para evaluar y seleccionar las soluciones energéticamente más eficientes relacionadas con la envolvente de los edificios y los sistemas de climatización. De hecho, numerosos reglamentos, entre ellos el Código Técnico de la Edificación, utilizan estos programas como método de comprobación de cumplimiento de las normativas en vigor relacionadas con la eficiencia energética de la edificación.

El interés por estas herramientas ha hecho que existan numerosos programas de simulación energética de edificios. No obstante, EnergyPlus[29], TRNSYS[30], y ESP-r[31], siguen siendo los más utilizados por la comunidad científica [32]. Además de estos programas, también están surgiendo plugins como, por ejemplo, Insight [33], IES [34], OpenStudio [35] o Skelion [36], que pueden vincularse a programas de diseño arquitectónico y que posibilitan hacer evaluaciones energéticas del modelo diseñado o realizar evaluaciones sobre un aspecto en concreto, como la incorporación e integración de energía solar fotovoltaica.

Sin embargo, la utilidad de estas herramientas ha sido puesta en cuestión por numerosos estudios [10, 13, 14, 21, 37, 38] que han demostrado que el comportamiento real de los edificios no se corresponde con el comportamiento calculado con estas herramientas. Por esta razón, el gran potencial predictivo de estas herramientas queda reducido y

wide variety of reasons such as the prebound [39] or rebound effect [40], interaction between users and building technologies [41], and the selection and accuracy of input data used to adjust energy simulation models [32, 42].

Energy simulation models of residential buildings are defined based on input data used to calculate or simulate the energy consumption of buildings. The level of detail and availability of data may require the use of different modelling techniques that will allow the information gathered to be used. The input data that define an energy model of housing include the physical characteristics of the envelope, user behaviour, HVAC systems and the historical data for energy consumption [43].

There are two main categories that cover residential building modelling techniques: the “top-down” approach and the “bottom-up” approach. The “top-down” approach considers the model as a generic building that represents the residential stock. The building model is generated using information collected from norms, regulations or historical databases and does not make direct reference to individual end uses. These models, which are not based on details that influence actual consumption, apply factors that have an impact on consumption in order to determine trends. In contrast, the “bottom-up” approach is based on the individual end uses and the construction characteristics of the buildings. The input data is obtained from real buildings that are representative of the residential building stock. Therefore, when studying a representative number of these dwellings, the results can be extrapolated and considered to be representative of a neighbourhood or of the residential sector at regional or national level. Kavgic [43, 44] and Swan [43] develop these methods and their application in greater depth.

Several agencies, including the International Energy Agency, have been addressing the methods for assessing the energy performance of buildings and characterizing user behaviour to implement them in energy simulation programs for years. These include Annex 53 “Total energy use in buildings: analysis and evaluation methods” [41], Annex 58 “Reliable characterization of the energy performance of the building based on full-scale dynamic measu-

se incrementa la incertidumbre de los resultados de consumo energético calculados a través de las simulaciones. Estas diferencias pueden ser atribuidas a muy distintas razones como el prebound [39] o rebound effect [40], la interacción entre los usuarios y las tecnologías de los edificios [41], así como a la selección y la exactitud de los datos de entrada utilizados para ajustar los modelos de simulación energética [32, 42].

Los modelos de simulación energética de edificios de viviendas se definen por unos datos de entrada que nos permiten calcular o simular el consumo energético de los edificios. El nivel de detalle de estos datos, y la disponibilidad que tengamos de ellos, hará necesario utilizar distintas técnicas de modelado que nos permitan hacer uso de la información recogida. Los datos de entrada que definen un modelo energético de vivienda incluyen desde las características físicas de la envolvente, los usuarios, las instalaciones hasta el histórico de datos de consumo energético [43].

Existen dos grandes categorías que abarcan las técnicas de modelado de edificios residenciales: el enfoque “top-down” y el enfoque “bottom-up”. El enfoque “top-down” considera el modelo como un edificio genérico que representa el stock residencial. El modelo del edificio se genera utilizando información recogida de bases de datos normativas, reglamentarias o históricas y no hacen referencia directa a los usos finales individuales. Estos modelos no se basan en detalles que repercutan en los consumos reales y aplican factores que influyen en el consumo con el fin de determinar tendencias. Por el contrario, el enfoque “bottom-up” se basa en los usos finales individuales y en las características constructivas del edificio. Los datos de entrada provienen de edificios reales que son característicos del stock de edificios residenciales. Por lo tanto, al estudiar un número significativo de estas viviendas, los resultados pueden extrapolarse para ser representativos de un vecindario, del sector residencial a nivel regional o incluso nacional. Kavgic [43, 44] y Swan [43] desarrollan con mayor profundidad estos métodos y su aplicación.

Existen varios organismos, entre ellos la Agencia Internacional de la Energía, que lleva años abordando los métodos de evaluación del comportamiento energético de los edificios y la caracterización del comportamiento de los usuarios para su incorporación en los programas de simulación energética. Desde los ya finalizados Anexo 53 “Total Energy Use in Buildings: Analysis & Evaluation

rements” [45], Anexo 66 “Definition and simulation of the behavior of the occupant in buildings ” [46], which have all been completed, and the more recent and still ongoing nnex 71 “Evaluation of the energy performance of the building based on measurements in situ” [47] and nnex 79 “ esign and operation of buildings focused on the occupant” [48]. The STEE etwork ynamic nalysis, Simulation and Testing applied to the Energy and Environmental performance of buildings [49] work group aims to provide a multidisciplinary space in which to share the research work carried out in the evaluation of the energy efficiency of buildings in relation to the E B directive Building Energy erformance irective , focusing on the application of tools and methodologies in this field.

In order to reduce the building behaviour gap, different studies have explored the calibration of simulation models [42, 50-55] and the comparison between the expected and actual behaviour of buildings [10, 14, 21, 56-60]. Coakley [32] presents a review of the current calibration methods used by the scientific community. These methods are classified into two groups: manual and automated. The manual methods are based on the continuous and pragmatic intervention of the modeller through the use of analytical tools and techniques, such as characterization techniques or advanced graphic methods. The automated ones, however, use mathematical and statistical techniques to achieve their objective through optimization methods or the most recent use of artificial neural networks. Coakley concludes that there is no scientific consensus regarding the procedure to be used or the generic validation criteria necessary to calibrate the energy models of different buildings. Menezes [21] demonstrates how the results of a post-occupancy evaluation can be used to generate and adjust an energy model through the acquisition of energy consumption data and occupancy patterns in an office building. Raftery [53] proposes an evidence-based calibration method, generating a model calibrated exclusively with referenced sources of information about the building. owever, regarding the behaviour of the users and the values of the infiltrations of the building, he sustains that the standardized data of different regulations can be taken into account to calibrate the model, given the difficulty of obtaining real data on these variables. Furthermore,

Methods” [41], Anexo 58 “Reliable Building Energy Performance Characterisation Based on Full Scale Dynamic Measurements” [45] y Anexo 66 “Definition and Simulation of Occupant Behaviour in Buildings” [46], hasta los más recientes, y todavía en curso, Anexo 71 “Building Energy Performance Assessment Based on In-situ Measurements” [47] y Anexo 79 “Occupant-Centric Building Design and Operation” [48]. El grupo de trabajo DYNASTEE Network (DYNamic Analysis, Simulation and Testing applied to the Energy and Environmental performance of buildings) [49] pretende proporcionar un es acio multidisci linar en el ue com artir el trabajo de investigación realizado en la evaluación de la eficiencia energética de los edificios en relación con la directiva EPDB (Energy Performance of Buildings Directive), centrándose en la aplicación de herramientas y metodologías en este campo.

Con el fin de reducir la brecha de comportamiento de los edificios, diferentes estudios han explorado la calibración de los modelos de simulación [42, 50-55] o la comparación entre el comportamiento esperado y real de los edificios [10, 14, 21, 56-60]. Coakley [32] presenta una revisión de los métodos actuales de calibración que son utilizados por la comunidad científica. Estos métodos son clasificados en dos grupos: manuales y automatizados. Los manuales se basan en la intervención continua y pragmática del modelador mediante el uso de herramientas y técnicas analíticas, como técnicas de caracterización o métodos gráficos avanzados. Las automatizadas, sin embargo, utilizan técnicas matemáticas y estadísticas para conseguir su objetivo, mediante métodos de optimización o el más reciente uso de redes neuronales artificiales. Coakley concluye que no existe consenso científico respecto al procedimiento que debe ser usado o al criterio de validación genérico necesario para calibrar los modelos energéticos de distintos edificios. Menezes [21] demuestra cómo los resultados de una evaluación post ocupacional pueden ser utilizados para generar un modelo energético ajustado, a través de la adquisición de datos de consumo energético y de patrones de ocupación en un edificio de oficinas. Raftery [53] propone un método de calibración basado en la evidencia, en el que se genera un modelo calibrado exclusivamente con fuentes de información referenciadas sobre el edificio. Sin embargo, respecto al comportamiento de los usuarios y a los valores de las infiltraciones del edificio, considera que los datos estandarizados de distintas normati as ueden ser utilizados ara calibrar el modelo, debido a la dificultad que supone

he makes no distinction between the different types of building, residential and non-residential, in which the data acquisition methods have very different limitations, such as the consideration of the privacy of the home [61].

This study focuses on exploring the energy performance gap in dwellings in a continental Mediterranean climate. Such studies have usually focused on tertiary buildings [14, 21, 60, 62], disregarding the residential sector. This is due to the difficulty in obtaining data in residential buildings in use, which involves invading residents' personal privacy and requiring a major commitment from the users in terms of availability and involvement in order to carry out the study [63]. However, the residential sector is a key sector in this discussion. Regarding the climate, although numerous studies focus on northern Europe and heating energy consumption [9, 10, 13, 64, 65], research is gradually emerging and addressing the problem of cooling in Mediterranean climates [12, 21, 66-68].

According to Guerra-Santin [69] the performance gap can be considered an "artificial" problem, given that it is the result of the definition of "expected" energy consumption. Therefore, it becomes essential to establish how this "expected" energy consumption has been calculated, the assumptions considered [70, 71], the input values selected to be introduced in the simulation models and the sources providing the information collected and processed [72].

B.1.3. Influencing factors for the energy behaviour of buildings: acquisition and evaluation

The climate, building envelope, energy systems, use and maintenance, quality of the indoor environment, and the behaviour of the users and the activities they perform, have been identified in the literature as the parameters with the most influence on the energy behaviour of the buildings [73-75]. It is necessary to define all the previously listed parameters when generating an energy simulation model, in addition to graphically representing the volume of the building, which specifies the dimensions of the elements that form it and defines its environment annexed buildings, vegetation or the building position with respect to the land. These parameters

la obtención de datos reales sobre estas variables. Además, no diferencia entre edificios residenciales y no-residenciales, en los que los métodos de adquisición de datos tienen unas limitaciones muy distintas al tener que considerar la privacidad del hogar [61].

Este estudio se ha centrado en la exploración de la brecha del comportamiento energético en viviendas y en un clima mediterráneo continentalizado. Habitualmente estos estudios se han centrado en edificios terciarios [14, 21, 60, 62], dejando en un segundo plano el sector residencial. Esto se produce por la dificultad que conlleva la obtención de datos en edificios de viviendas que estén en uso, ya que hay que invadir la privacidad de las personas y se requiere de una disponibilidad e involucración importante por parte de los usuarios para que los estudios puedan llevarse a cabo [63]. Sin embargo, el sector residencial representa un sector clave en esta discusión. Respecto al clima, existen muchos estudios realizados en el norte de Europa, centrados en el consumo energético de calefacción [9, 10, 13, 64, 65], y poco a poco van surgiendo más investigaciones en climas mediterráneos en los que también se aborda el problema de la refrigeración [12, 21, 66-68].

Guerra-Santin [69] considera que la brecha de comportamiento puede ser considerada como un problema "artificial", ya que es el resultado de la definición de un "esperado" consumo energético. Por lo tanto, resulta fundamental establecer cómo ha sido calculado ese consumo energético "esperado", qué supuestos se han considerado [70, 71], qué valores de entrada han sido seleccionados para introducir en los modelos de simulación y cuáles son las fuentes de las que se ha extraído esa información [72].

B.1.3. Factores que influyen en el comportamiento energético de la edificación: obtención y evaluación

El clima, la envolvente del edificio, los sistemas energéticos, el uso y mantenimiento, la calidad del ambiente interior y el comportamiento de los usuarios y las actividades que realizan han sido identificados en la literatura como los parámetros que más influencia tienen en el comportamiento energético de la edificación [73-75]. Además de hacer un levantamiento volumétrico del edificio, donde se especifiquen las dimensiones de los elementos que lo forman, así como la definición de su entorno (edificios anejos, vegetación o posición respecto al terreno), al generar un modelo de simulación energética hay que definir todos los parámetros enumerados previamente. Estos parámetros se definen habitualmente con datos

are usually defined with standardized data collected in a series of templates incorporated into the simulation programs. Technicians in charge of these programs can generate their own templates, incorporating data and information different to that offered by the program. Information is collected on the climatic data of the place of study, the construction, definition of the construction elements and their thermophysical characteristics, HVAC and energy systems, and the activity carried out inside the building where the user behaviour is defined through the internal loads generated and the use made of the building.

The predefined data of the templates may not necessarily correspond to the real data of the building designed, but they can be modified and adjusted with more accurate data. In order to achieve this, monitoring campaigns and in-situ measurements allow the collection of real information that can be used to adjust simulation models with real input values. This adjustment is necessary to reduce the level of uncertainty of the models through knowledge of the quality of the building envelope [38, 68] and the study of microclimatic data from the site study [76, 77]. However, user behaviour is the parameter which produces most uncertainty in the difference between the expected and actual behaviour of buildings [78-83].

In terms of the quality of the building envelope, numerous techniques can be used individually or in combination to extract information on the behaviour of the constructive building systems. These include tracer gas test, thermal imaging survey, blower door test and thermal transmittance measurement. These monitoring techniques are used to evaluate a specific aspect of the building (such as infiltrations) [84-88], a component (such as the ventilation system) [64], or buildings considered as a whole [57, 89-91].

In order to acquire the climate data, a weather station is required near the case study, although in many cases this is not feasible in terms of the economic effort and dedication involved. Some studies go further and instead of settling for accessing current data they carry out predictive analysis to propose future weather data, taking the consequences of climate change into account [76].

estandarizados que se encuentran recogidos en una serie de plantillas incorporadas en los programas de simulaci3n. El t3cnico que utiliza estos programas puede generar sus propias plantillas, incorporando datos e informaci3n distinta a la ofrecida por el programa. En ellas se recoge informaci3n sobre: los datos clim3ticos del lugar de estudio, la construcci3n, definiendo los elementos constructivos y sus caracter sticas termo sicas, las instalaciones energ3ticas, tanto lum3nicas como de climatizaci3n y la actividad que se realiza en el interior del edificio, donde el com ortamamiento de las ersonas usuarias est3 definido a trav3s de las cargas internas que generan y el uso que hacen del edificio.

Los datos predefinidos de las plantillas no tienen por qu3 corresponder con los datos reales del edificio que estamos proyectando, pero pueden ser modificados y ajustarse con datos m3s certeros. Para poder conseguir esto, las campa as de monitorizaci3n y la toma de datos in situ permiten recoger informaci3n real ue ueda ser utilizada ara a ustar los modelos de simulaci3n con valores de entrada reales. Este a uste resulta necesario ara 3der reducir el ni el de incertidumbre de los modelos, a trav3s del conocimiento de la calidad de la envolvente del edificio [38, 68] y el estudio de los datos microclim3ticos del propio lugar de estudio [76, 77]. No obstante, el com ortamamiento de los usuarios es el ar metro ue mayor incertidumbre produce en la diferencia que existe entre el comportamiento esperado y real de los edificios [78-83].

es ecto a la calidad de la en ol ente, e isten numerosas t3cnicas que, usadas de manera individual o combinadas, ayudan a extraer informaci3n so re el com ortamamiento de los sistemas constructivos del edificio; entre ellas est3n: test de gas trazador, estudio termogr3fico, test de estanqueidad y medici3n de la transmitancia t3rmica. Estas t3cnicas de monitorizaci3n son utilizadas para evaluar un aspecto espec3fico del edificio (por ejemplo, las infiltraciones) [84-88], un componente (por ejemplo, el sistema de ventilaci3n) [64], o para evaluar edificios considerados en su totalidad [57, 89-91].

Para la adquisici3n de los datos clim3ticos se requiere de una estaci3n meteorol3gica, ubicada lo m s cercana osi le a nuestro caso de estudio, aun ue esto conlleva un esfuerzo econ3mico y de dedicaci3n en muchos casos inviable. Algunos estudios van m3s all3 y no se conforman con tener datos actuales, sino ue realizan estudios redicti os ara ro oner datos clim3ticos futuros, de manera que se tengan en cuenta las consecuencias del cambio clim3tico [76].

Predefined occupancy patterns are commonly used in simulation models. In the case of Spanish regulations, in the Technical Building Code [92] this pattern represents a conventional family of four people, with all family members busy outside the home in the middle of the day. However, the social and demographic changes and the economic problems which families are currently experiencing in Spain have resulted in increasingly heterogeneous households [93, 94] so that this predefined pattern does not always represent the dwellings under study [17, 18, 95, 96]. Furthermore, the complexity of user behaviour and its stochastic or random nature requires an interdisciplinary approach to ensure understanding of the different influencing factors: external factors, such as cultural, economic and climatic factors; or internal factors, such as individual comfort preferences, physiology or psychology; and the interaction of the occupants with the building's energy systems [97].

This research aims to solve the lack of procedures that provide empirical evidence to understand the link between data monitoring, occupancy patterns and the energy performance of residential buildings. It also aims to highlight how the use of these data contributes to the adjustment of the energy simulation models of buildings to identify the variables with most influence on the energy consumption of the building, thus aiding the decision-making process when addressing retrofitting.

Los patrones de ocupación predefinidos son los que se utilizan habitualmente en los modelos de simulación; en el caso de la normativa española, en el Código Técnico de la Edificación[92], este patrón representa una familia convencional de cuatro personas, en la cual todos sus miembros estudian o trabajan y se encuentran fuera del hogar en las horas centrales del día. Ahora bien, los cambios sociales, demográficos y los problemas económicos que sufren las familias en nuestro país actualmente han producido que los hogares sean cada vez más heterogéneos [93, 94] y, por lo tanto, que este patrón predefinido no siempre represente el hogar de estudio [17, 18, 95, 96]. A esto hay que añadir que la complejidad del comportamiento de las personas usuarias y su carácter estocástico o aleatorio requiere de una aproximación interdisciplinar, de manera que se puedan entender los diferentes factores que influyen en él: factores externos, como los culturales, económicos y climáticos; factores internos, como las preferencias individuales de confort, la fisiología o la psicología; y la interacción de los ocupantes con los sistemas energéticos del edificio [97].

Esta investigación persigue subsanar la falta de procedimientos que relacionen evidencia empírica para entender el vínculo entre la monitorización de datos, los patrones de ocupación y el comportamiento energético de los edificios residenciales; y cómo el uso de estos datos permite ajustar los modelos de simulación energética de edificios para identificar qué variables tienen mayor influencia en el consumo energético de la edificación y, de esta manera, ayudar en la toma de decisiones a la hora de abordar trabajos de rehabilitación.

B.2. HYPOTHESIS, RESEARCH QUESTIONS AND OBJECTIVES

The hypothesis in this study is that energy simulation models in residential buildings require data collection and monitoring in real conditions of use in order to evaluate the energy performance of buildings. It is essential to ascertain the influence of individual parameters relating to the energy performance of the buildings in order to achieve a match between the models and buildings.

Two main questions have been raised to confirm this hypothesis:

How can energy simulation models be adjusted from experimental data to achieve a closer approximation between models and buildings?

What is the effect of measured parameters compared to standardized ones in the energy consumption of buildings?

To answer these questions, the main objective of this research is to develop a methodological proposal in order to adjust the residential energy simulation models from experimental data to reduce the level of uncertainty of the results. Its application will compare the relative effect of the measured parameters to the standardized parameters in the energy consumption of the building to be determined, thereby identifying which of them should be further considered when undertaking an energy retrofitting project.

To achieve the main objective, it is first necessary to meet three specific objectives.

Specific objective 1: To identify, classify and catalogue the most representative constructive types of residential building façades in the city of Madrid to ensure an adequate selection of case studies.

Specific objective 2: To define the parameters that influence the energy behaviour of the building and to develop a monitoring and in situ measurement procedure to obtain the real parameters to be used to adjust simulation models.

Specific objective 3: To develop user presence patterns and to verify the effect on energy demand of the use of real or standardized patterns in energy simulation models.

B.2. HIPÓTESIS PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS

La hipótesis de esta tesis es que los modelos de simulación energética de viviendas requieren de la toma de datos y la monitorización en condiciones reales de uso para poder evaluar el comportamiento energético de los edificios. Resulta imprescindible saber la influencia de cada uno de los parámetros relacionados con el comportamiento energético de los edificios para lograr un mejor ajuste entre los modelos y los edificios.

Dos preguntas de investigación han surgido para confirmar esta hipótesis:

¿Cómo se pueden ajustar los modelos de simulación energética a partir de datos experimentales para lograr una mayor aproximación entre los modelos y los edificios?

¿Cuál es el efecto relativo que tienen los parámetros medidos en comparación con los estandarizados en el consumo energético de los edificios?

Para responder a estas cuestiones se propone como objetivo principal de esta investigación el desarrollar una propuesta metodológica con el fin de ajustar los modelos de simulación a partir de datos experimentales, para reducir así el nivel de incertidumbre de los resultados. Su aplicación permitirá determinar el efecto relativo de los parámetros medidos, en comparación con los estandarizados, en el consumo energético del edificio, y de esta manera identificar en cuáles de ellos se debe profundizar a la hora de afrontar un proyecto de rehabilitación energética.

Para alcanzar el objetivo principal es necesario cumplir previamente con tres objetivos específicos.

Objetivo específico 1: Identificar, clasificar y catalogar los tipos constructivos de fachada de edificios residenciales más representativos en la ciudad de Madrid para una adecuada selección de los casos de estudio.

Objetivo específico 2: Definir los parámetros que influyen en el comportamiento energético del edificio y desarrollar un procedimiento de monitorización y toma de datos in situ para la obtención de los parámetros reales que permita ajustar posteriormente los modelos de simulación.

Objetivo específico 3: Desarrollar los patrones de presencia de usuarios y comprobar el efecto que tiene, en la demanda de energía, el uso de patrones reales o estandarizados en los modelos de simulación energética.

In order to achieve the proposed objectives, experimental research has taken the form of a study of two dwellings located in two collective residential buildings in the neighbourhood of *Los Angeles*, in the *Villaverde* district in the south of Madrid. Both buildings are open blocks following the same constructive system. They are representative constructions of the period of “developmentalism” in the city of Madrid. The residential buildings constructed in this period, prior to 1979, account for a very high percentage of Spanish housing stock, 44% [27], and have a high potential for retrofitting in terms of energy efficiency. One of the case studies is retrofitted while the other is not. This has made it possible to evaluate the energy behaviour before and after the retrofitting intervention and to compare the similarities and differences between them. Data collection and monitoring campaigns have been carried out on both the constructive variables that influence the thermal - energy behaviour of the building, and the information relating to the residents of two of the dwellings, their habits of use, customs and routines in the consumption and use of energy. These data were subsequently used as input values to characterize the energy simulation models. Efforts were also made to take full advantage of the predictive potential of energy simulation programs, with the behaviour of the models generated accurately reflecting that of the buildings.

Para cumplir con los objetivos propuestos, se ha desarrollado una investigación experimental a través del estudio de dos viviendas situadas en dos edificios residenciales colectivos ubicados en el barrio de *los Ángeles*, en el distrito de *Villaverde* en el sur de Madrid. Ambos edificios son bloques abiertos y se realizaron con el mismo tipo constructivo. Son construcciones representativas del periodo del “desarrollismo” en la ciudad de Madrid. Los edificios residenciales construidos en este periodo, anterior a 1979, constituyen un porcentaje muy elevado del parque de viviendas edificado en nuestro país, 44% [27], y tienen un alto potencial para ser rehabilitados desde el punto de vista de la eficiencia energética. Uno de los edificios caso de estudio ha sido rehabilitado y el otro no, lo que ha permitido que se evalúe su comportamiento antes y después de la intervención de la rehabilitación, así como comparar las similitudes y diferencias que se dan entre ellos. Se ha llevado a cabo una toma de datos y monitorización tanto de las variables constructivas que influyen en el comportamiento térmico - energético del edificio, como de la información relativa a los usuarios que afectan a las viviendas, sus hábitos, costumbres y rutinas referidas al consumo y uso de energía. Estos datos han sido utilizados posteriormente como valores de entrada para la caracterización de los modelos de simulación energética y, de esta forma, se ha pretendido alcanzar el potencial predictivo de los programas de simulación energética, asemejando de una manera eficiente el comportamiento de los modelos generados con el de los edificios.

C. Methodology
C. Metodología

This thesis is organized into four phases, presented as an investigation by aggregation of parts, in which the first three phases are necessary to carry out the fourth, fulfilling the general objective of the research. In turn, in the first three phases, the three specific objectives set out in this work, and listed in the previous section, are achieved. Figure 2 shows the methodological scheme followed in this research.

a tesis se di ide en cuatro ases y se lantea como una in estigaci n or agregaci n de artes, en la ue las tres rimeras ases son necesarias ara oder lle ar a ca o la cuarta n esta ltima se cum le con el o eto o general de la in estigaci n su ez, en las tres rimeras ases se da respuesta a los tres objetivos especficos planteados en este tra o y ue se encuentran enumerados en el a artado anterior n la igure se uede o ser ar el es uema metodol gico seguido ara desarrollar esta in estigaci n

Figure 2. Methodology

Each of these phases and their corresponding publications are listed and described below

The study carried out for the selection of the case studies of this thesis is presented in phase 1. The objective is to identify and classify the construction types of residential building fa ades from 1950 to 1980 in the city of Madrid in order to select case studies of representative buildings from the constructive point of view.

continuaci n se enumeran y descri en cada una de las ases con sus corres ondientes u licaciones

n la rimerase se resenta el estudio realizado ara la selecci n de los casos de estudio de esta tesis *El objetivo es la identificaci n y clasifi caci n de los tipos constructivos de fachada de edificios residenciales del eriodo com rendido entre el a o y 1980, en la ciudad de Madrid, con el fin de poder seleccionar unos casos de estudios re resentati os desde el unto de ista constructi o*

The work carried out in this phase began with the investigation developed within the *SHERIFF Research Project* from the INNPACTO Subprogram of the National RDI Program. This research work resulted in an article published in the indexed scientific journal *Energy and Buildings*.

- National RDI Program Project. *SHERIFF Project (Hybrid and Economic System of Integral Flexible Façade Refurbishment)*, funded by the National RDI Program 2008-2011, within the INNPACTO subprogram of the year 2011 (ref. IPT-2011-1239-380000). The coordination of the project was carried out by the company DRAGADOS S.A.

- Article 1: Cuerda, E., Pérez, M., & Neila, J. (2014). Facade typologies as a tool for selecting refurbishment measures for the Spanish residential building stock. *Energy and Buildings*, 76, 119-129. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.054

In the second phase, the parameters that influence the energy performance of the building are classified, an experimental procedure is proposed to obtain these parameters, and the mixed research methods are described. The aim of this phase is to define the variables that influence the thermal-energy behaviour of the building and to develop the monitoring and in-situ measurement data collection procedure as part of the application of the mixed-method approach to the case studies defined in phase 1.

The content of this phase was presented at an international congress and in an indexed publication which does not meet the requirements of the compendium established by the UPM as the doctoral student is not the first author of the article.

- Article 2: Guerra-Santin, O., Herrera, N. R., Cuerda, E., & Keyson, D. (2016). Mixed methods approach to determine occupants' behaviour—Analysis of two case studies. *Energy and Buildings*, 130, 546-566.

- Conference paper 1: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Neila González, F. J., & Romero Herrera, N. (2015). Post-occupancy monitoring of two flats in Madrid: development and assessment of a mixed methods methodology. Paper presented at the *Passive and Low Energy Architecture (PLEA)*, Bologna. Italia.

El trabajo realizado en esta fase se inició con la investigación desarrollada en el Proyecto de Investigación SHERIFF del Subprograma INNPACTO del Programa Nacional I+D+i, y dio lugar a un artículo publicado en la revista Energy and Buildings.

- Proyecto del Programa Nacional I+D+i. Proyecto SHERIFF (Sistema Híbrido y Económico de Rehabilitación Integral Flexible de Fachadas), financiado por el Programa Nacional de I+D+i 2008-2011, dentro del subprograma INNPACTO del año 2011 (ref. IPT-2011-1239-380000). La coordinación del proyecto la realizó la empresa DRAGADOS S.A.

- Artículo 1: Cuerda, E., Pérez, M., & Neila, J. (2014). Facade typologies as a tool for selecting refurbishment measures for the Spanish residential building stock. *Energy and Buildings*, 76, 119-129. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.02.054

En la segunda fase se clasifican los parámetros que influyen en el comportamiento energético del edificio, se propone un procedimiento para la obtención de estos parámetros de manera experimental, y se describen los métodos mixtos de investigación. El objetivo de esta fase es la definición de las variables que influyen en el comportamiento térmico-energético del edificio y el desarrollo del procedimiento de monitorización y toma de datos in situ, como parte de la aplicación de la metodología mixta a los casos de estudio definidos en la fase 1.

El contenido de esta fase se presenta mediante una comunicación en un congreso internacional y una publicación indexada que no cumple con los requisitos del compendio establecidos por la UPM, por no ser la doctoranda la primera autora del artículo.

- Artículo 2: Guerra-Santin, O., Herrera, N. R., Cuerda, E., & Keyson, D. (2016). Mixed methods approach to determine occupants' behaviour—Analysis of two case studies. *Energy and Buildings*, 130, 546-566.

- Comunicación 1: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Neila González, F. J., & Romero Herrera, N. (2015). Post-occupancy monitoring of two flats in Madrid: development and assessment of a mixed methods methodology. Paper presented at the *Passive and Low Energy Architecture (PLEA)*, Bologna. Italia.

In the third phase, the actual presence patterns are defined through the application of the mixed methods and the standardized patterns are extracted from national and international standards. A comparison of the influence of the use of real or standardized patterns in energy simulation models is then performed. The objective of this phase is to study the impact on energy demand of the use of actual presence patterns compared to standardized ones.

The content of this phase is presented through two articles published in indexed journals, one ranked in SJR in the journal *Informes de la Construcción* and another ranked in JCR in the journal *Building Simulation*.

- Article 3: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., & Neila González, F. J. (2018). Defining occupancy patterns through monitoring existing Buildings/ Definiendo patrones de ocupación mediante la monitorización de edificios existentes. *Informes de la Construcción*, 69(548), 223. doi: 10.3989/id.53526

- Article 4: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, J. J., & Neila González, F. J. (2019). Comparing the impact of presence patterns on energy demand in residential buildings using measured data and simulation models. *Building Simulation*. doi: 10.1007/s12273-019-0539-z.

In the fourth and final phase, the main objective of the thesis is fulfilled with the development of a methodological proposal for the adjustment of residential energy simulation models, based on experimental data. This makes it possible to identify the effect of the use of measured parameters compared to standardized ones in the energy consumption of the building. Thus, it is possible to identify the parameters which should be further considered when upgrading an existing building.

The content of this phase is presented through a communication at an international congress and a recently published indexed publication in *Energy and Buildings*.

- Article 5: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, J. J., & Neila González, F. J. (2020). Understanding the performance gap in energy retrofitting: input measured data to adjust building simulation models. *Energy and Buildings*. 209, 15 Feb.2020, 109688.

En la tercera fase se definen los patrones de presencia reales a partir de la aplicación de los métodos mixtos y los patrones estandarizados extraídos de normas nacionales e internacionales. A continuación se realiza una comparación de la influencia del uso de los patrones reales o estandarizados en los modelos de simulación energética. El objetivo de esta fase es el estudio de la repercusión que tiene en la demanda energética el uso de los patrones de presencia reales en comparación con los estandarizados.

El contenido de esta fase se presenta a través de dos artículos publicados en revistas indexadas tanto en JCR como en SJR: revista Informes de la Construcción y revista Building Simulation.

- Artículo 3: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., & Neila González, F. J. (2018). Defining occupancy patterns through monitoring existing Buildings/ Definiendo patrones de ocupación mediante la monitorización de edificios existentes. *Informes de la Construcción*, 69(548), 223. doi: 10.3989/id.53526

- Artículo 4: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, J. J., & Neila González, F. J. (2019). Comparing the impact of presence patterns on energy demand in residential buildings using measured data and simulation models. *Building Simulation*. doi: 10.1007/s12273-019-0539-z.

En la cuarta y última fase se cumple con el objetivo principal de la tesis desarrollando una propuesta metodológica para el ajuste de los modelos de simulación energética, a partir de datos experimentales, que permita identificar el valor relativo de los parámetros medidos en comparación con los estandarizados en el consumo energético de la edificación y, de esta manera, identificar en cuál o cuáles de ellos debemos profundizar a la hora de intervenir en los edificios.

El contenido de esta fase se presenta mediante una comunicación en un congreso internacional y una publicación indexada recientemente publicada en la revista Energy and Buildings.

- Artículo 5: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, J. J., & Neila González, F. J. (2020). Understanding the performance gap in energy retrofitting: input measured data to adjust building simulation models. *Energy and Buildings*. 209, 15 Feb.2020, 109688.

- Conference paper 2: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Neila González, F. J., & Romero Herrera, N. (2016). Evaluation and comparison of building performance in use. Paper presented at the *Third International Building Performance Simulation Association. England Conference*, Newcastle.

In phase four, the methodological proposal developed is applied in the case studies selected in phase 1, giving rise to an in-situ monitoring and measurement campaign carried out and developed in phase 2. The data extracted from the monitoring campaign are analysed through the application of the mixed methods explained and tested in phase 3. Finally, energy simulation models are adjusted using actual or standardized parameters in order to assess the influence of individual types of parameter on the energy consumption of the building. Subsequently, conclusions are drawn, and future lines of research are proposed.

- *Comunicación 2: Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Neila González, F. J., & Romero Herrera, N. (2016). Evaluation and comparison of building performance in use. Paper presented at the Third International Building Performance Simulation Association. England Conference, Newcastle.*

En la fase cuatro se aplica la propuesta metodológica desarrollada a los casos de estudio seleccionados en la fase 1, en los que se lleva a cabo una campaña de monitorización y mediciones in situ, desarrollada en la fase 2, se aplican los métodos mixtos para el análisis de los datos extraídos de la campaña de monitorización, explicados y testados en la fase 3, y se generan modelos de simulación energética ajustados con parámetros reales o estandarizados que nos permitan evaluar la influencia de cada tipo de parámetro en el consumo energético de la edificación. Posteriormente se extraen las conclusiones y se proponen las futuras líneas de investigación.

. ublications
u licaciones