



**UNIVERSIDAD DE MURCIA**  
ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

TESIS DOCTORAL

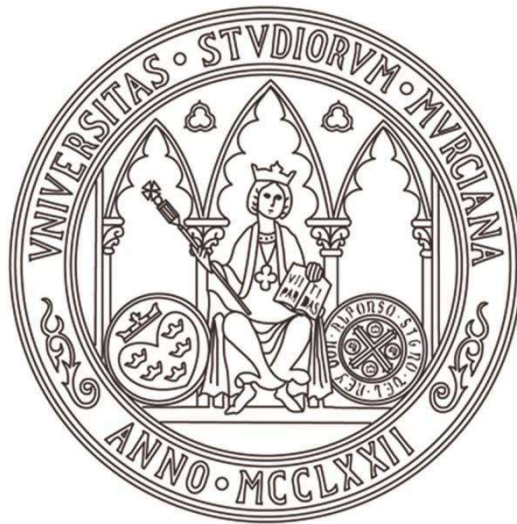
Energy flexibility under the IoT paradigm:  
the role of occupants

Flexibilidad energética bajo el paradigma del IoT:  
el rol de los ocupantes

**D.<sup>a</sup> Valentina Tomat**

**2023**





**UNIVERSIDAD DE MURCIA**  
ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

TESIS DOCTORAL

Energy flexibility under the IoT paradigm:  
the role of occupants

Flexibilidad energética bajo el paradigma del IoT:  
el rol de los ocupantes

Autor: D.<sup>a</sup> Valentina Tomat

Director/es: D. Alfonso Pablo Ramallo González y  
D. Antonio Fernando Skarmeta Gómez





**DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD  
DE LA TESIS PRESENTADA EN MODALIDAD DE COMPENDIO O ARTÍCULOS PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR**

*Aprobado por la Comisión General de Doctorado el 19-10-2022*

D./Dña. Valentina Tomat

doctorando del Programa de Doctorado en

Informática

de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Murcia, como autor/a de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor y titulada:

Energy flexibility under the IoT paradigm: the role of occupants  
Flexibilidad energética bajo el paradigma del IoT: el rol de los ocupantes

y dirigida por,

D./Dña. Alfonso Pablo Ramallo González

D./Dña. Antonio Fernando Skarmeta Gómez

D./Dña.

**DECLARO QUE:**

La tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la Ley de Propiedad Intelectual (R.D. legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Además, al haber sido autorizada como compendio de publicaciones o, tal y como prevé el artículo 29.8 del reglamento, cuenta con:

- *La aceptación por escrito de los coautores de las publicaciones de que el doctorando las presente como parte de la tesis.*
- *En su caso, la renuncia por escrito de los coautores no doctores de dichos trabajos a presentarlos como parte de otras tesis doctorales en la Universidad de Murcia o en cualquier otra universidad.*

Del mismo modo, asumo ante la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad del contenido de la tesis presentada, en caso de plagio, de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

En Murcia, a 27 de Marzo de 2023

Fdo.: Valentina Tomat

*Esta DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD debe ser insertada en la primera página de la tesis presentada para la obtención del título de Doctor.*



Información básica sobre protección de sus datos personales aportados

Responsable:	Universidad de Murcia. Avenida teniente Flomesta, 5. Edificio de la Convalecencia. 30003; Murcia. Delegado de Protección de Datos: dpd@um.es
Legitimación:	La Universidad de Murcia se encuentra legitimada para el tratamiento de sus datos por ser necesario para el cumplimiento de una obligación legal aplicable al responsable del tratamiento. art. 6.1.c) del Reglamento General de Protección de Datos
Finalidad:	Gestionar su declaración de autoría y originalidad
Destinatarios:	No se prevén comunicaciones de datos
Derechos:	Los interesados pueden ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación, oposición, limitación del tratamiento, olvido y portabilidad a través del procedimiento establecido a tal efecto en el Registro Electrónico o mediante la presentación de la correspondiente solicitud en las Oficinas de Asistencia en Materia de Registro de la Universidad de Murcia





The following PhD Thesis is a compilation of the next published articles, being the PhD student the main author of all of them:

- [1] Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta Gómez, A.F., 2020. 'A comprehensive survey about thermal comfort under the IoT paradigm: is crowdsensing the new horizon?', *Sensors* 2020, 20, 4647. JCR 2020 Q1  
DOI: 10.3390/s20164647
- [2] Tomat, V., Vellei, M., Ramallo-González, A.P., González-Vidal, A., Le Dréau, J., Skarmeta-Gómez, A., 2022. 'Understanding patterns of thermostat overrides after demand response events', *Energy and Buildings* 271 (2022) 112312. JCR 2021 D1  
DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112312
- [3] Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta-Gómez, A., Georgopoulos, G., Ntafalias, A., 2023. 'Insights into end users' acceptance and participation in energy flexibility strategies', *Buildings* 2023, 13 (2), 461. JCR 2021 Q2  
DOI: 10.3390/buildings13020461



## Acknowledgements - Agradecimientos

---

---

Uno de los requisitos para depositar la tesis debería ser ‘Declaro que al menos una vez quise dejar mi doctorado’. Y yo lo he deseado, muchas veces.

Entonces me pregunto: ¿Por qué no lo dejé? Y al responder, intentando dejar de lado el sarcasmo por una vez, me he dado cuenta de que debería dedicar unos cuantos agradecimientos...

A mis directores Antonio y Alfonso, por darme esta oportunidad y por lo que ha conllevado: las estancias en el extranjero, la flexibilidad que me habéis dejado para gestionar mis tareas, la experiencia de impartir clases (un pequeño sueño hecho realidad), la posibilidad de desarrollar mi trabajo desde casa durante una pandemia mundial que me pilló sola en una ciudad ‘nueva’. En estas y en más ocasiones me he sentido una privilegiada, y os doy las gracias por ello.

A Leo. No sé ni siquiera por dónde empezar, porque muy simplemente te debo todo. Te conocí en el peor momento, y todo empezó a tener sentido otra vez. A lo largo del doctorado fuiste para mí el mejor de los amigos, tutor no oficial de la tesis, escuchador oficial de quejas, PR manager, consejero, mejorador de humor, enemigo en los partidos de fútbol... En fin, un regalo de la vida.

A Javi, la Nana, Sergio, Pasticcino y, más recientemente, a Mariano y Manuel, por vuestra presencia constante, por nuestros coffee breaks que me alegraron tanto los días en el despacho y por aportar cariño a mi día a día, ya fuera con un abrazo o con una puyita.

A Clara, Natalia, Tito, Raba, Fran, Alberto, y Carla, por ser mi familia en Murcia. Gracias por apoyarme y soportarme a lo largo de estos años. Todos los altibajos de este camino fueron mucho más llevaderos con vosotr\*s a mi lado.

A Álvaro, por acompañarme con amor en esta última etapa. En el último año he visto desmoronarse muchas de mis certezas, pero aun así me has conseguido traer a una burbuja de felicidad de la cual espero no salir.

A Alicia, Enrique, Luis y todos los Ants, por escuchar mis dramas, mis quejas y mis tonterías. Si algo tengo claro es que siempre echaré de menos un ambiente de trabajo tan acogedor y amigable.

Ad Alessandra e alla mia Famiglia, perchè nonostante la distanza siete stati parte anche di questo percorso, come di mille altri prima di questo, facendomi da punto di riferimento e offrendomi aiuto concreto nelle tante volte in cui non mi sono sentita all'altezza della situazione, anche se ai vostri occhi lo sono sempre.

Grazie.

# Contents

---

---

I. Introduction and motivation.....	1
II. Objectives .....	6
III. Methodology.....	9
III.1 Literature survey and state-of-art .....	9
III.1.1 Thermal Comfort.....	9
III.1.2 IoT and Crowdsensing .....	11
III.1.3 Demand Response.....	12
III.2 End-users’ acceptance of energy flexibility strategies .....	16
III.3 Non-efficient energy behaviour within energy flexibility strategies.....	18
III.4 Real-world data used on this thesis .....	19
IV. Other related works.....	21
IV.1 PHOENIX.....	25
VI. Conclusions and future work.....	29
I. Introducción y motivación .....	33
II. Objetivos.....	38

III. Metodología.....	41
III.1 Estudio bibliográfico y estado del arte.....	41
III.1.1 Confort Térmico .....	41
III.1.2 IoT y Crowdsensing.....	43
III.1.3 Respuesta a la Demanda .....	44
III.2 La aceptación de los usuarios finales a las estrategias de flexibilidad energética.....	49
III.3 Comportamiento energético no eficiente dentro de las estrategias de flexibilidad energética .....	51
III.4 Datos reales utilizados en esta tesis .....	52
IV. Otras publicaciones relacionadas .....	54
IV.1 PHOENIX.....	58
V. Conclusiones y trabajos futuros.....	63
Bibliography - Bibliografía .....	67
Publications composing the PhD Thesis .....	75

# Abstract

---

---

## I. Introduction and motivation

It is now common knowledge that we are facing an environmental crisis. Society is passively accepting the consequences without little more than the occasional complain or protest. In some way, the problem is dissociated with the very same reason it is occurring.

According to the literature, 40% of the total primary energy consumption is caused by the building sector [14]. Of that portion, HVAC consumption (heating, cooling and ventilation systems) is responsible for circa 38% [15]. To give an idea of the proportions, the energy that can be cut in buildings worldwide according to the World Business Council for Sustainable Development is comparable to the energy needed by the entire transport sector [16].

This situation is getting worse. Our electric consumption is increasing every year; partly because of the new habits (electric scooters and cars, electric heat pumps, etc) and partly

because we tend to own many more appliances compared to the ones we used in the past decades. Apart from the gross consumption of electricity, there exist other problems that are appearing on the electrical system. In specific hours of the day (for example when people arrive home from work), several end-users use their appliances at the same time, creating the so-called peak demand. The magnitude of these peaks leads to two main consequences: on the one hand, energy becomes more expensive as more generators need to be run. On the other hand, the grids of our cities that were constructed decades ago, are rendered insufficient. Hence, the grid cannot support our new needs, and blackouts or power outages may start to occur, threatening the stability of the electricity supply.

There are several solutions to this problem, such as to improve the physical infrastructure that builds the grid or to equip all the buildings with electrical storage to modify the demand. Still, a sustainable solution that does not imply a large investment is the voluntary change of energy usage by the final user. Change of energy use means reshaping the patterns of consumption of the end-users: us. We refer to the modification of consumers' energy use with the term Demand Side Management, which implies both technical and behavioural strategies (change through people's education, rise in awareness and commitment) [17]. The conjunction of the strategies used to achieve the modification of the pattern of use and the reduction of the peak consumption is known as Demand Response (DR). In the DR framework, the peak power can be reshaped either through *shaving* the energy consumption i.e a net energy saving, or through *shifting* of the power consumption, in order to avoid the high peaks due to accumulation of systems used that causes the peak, or through both shaving and shifting [18].

Many DR programs have been implemented in the last years, to respond to the need of a share of users as large as possible. The categorisation of DR strategies is reported in Section III. For the aim of this PhD thesis, the main distinction that can be highlighted among the programs lies in the entity in charge of the reduction of the peak demand. In some cases, for instance the well-known Tariff of Use (ToU), the users are responsible for changing their patterns of use depending on fixed rates for electricity. In other cases, the consumer delegates the responsibility to the utility, by giving them control over their appliances (for example, over a smart thermostat) in a particular timeframe (with the so-called demand response *event*) [19].

In this context, there were a series of questions raised on this research concerning the role of the user when they are involved on this kind of programs of demand modification.

Studies revealed a generally positive attitude toward the idea of saving energy [20], but it was demonstrated that users are not capable to change their habits if their intention is not strong enough [21]. In this respect, there was a cognitive theory developed by Ajzen, called Theory of Planned Behaviour [22], that has been used successfully to predict and understand people's behaviours in specific contexts. The intention is a central factor in the theory and it is assumed to capture the motivational factors that influence a behaviour. The intention of an individual is determined by their behavioural beliefs (the perception about consequences of particular actions), their subjective norms (social pressure) and the perceived behavioural control (the personal assessment of the difficulty of an action). Then the intention may or may not lead to the behaviour.

Furthermore, humans tend to naturally pursue their comfort. This is particularly relevant when the change of the pattern of consumption involves the electric heating and cooling systems. The scientific community agree on the fact that one of the most difficult tasks in this kind of energy management strategies is to find the balance between energy efficiency and the thermal comfort of the occupants [23][24][25]. As a consequence, it is essential to understand the mechanisms behind the human thermal comfort, a topic that has captured the attention of the academic circles for decades, as will be explained in detail in Section III.1. Thermal comfort depends primarily on the heat exchange of the human body with the physical environment, which includes the heat balance and other thermophysiological mechanisms such as sweating and shivering [26]. It has been traditionally related to both objective (related to the physical environment) and subjective parameters (related to the individuals, such as activity and clothing levels) [27]. However, modern studies highlighted that the perception of thermal comfort is also related to psychological and behavioural factors, such as thermal expectation, thermal adaptation, and other complex factors [28].

For the above reasons, the response of people to the energy saving pursuit is far from being objective nor unanimous, since there are psychological and behavioural factors implied in both their thermal perception and their acceptance to modify their habits. Hence, the one-fits-all formula can hardly work, while personalised and tailored solutions need to be found.

The Internet of Things (IoT) is proposed in this PhD thesis as the link between the needs of people and the ones of the building/ the grid. IoT refers to the devices (*Things*) that are interconnected to transfer data and to do actuation [29]. The transmission of data is what allows us to make our physical environment smart, since through their analysis it is possible to improve the functioning of devices and appliances to give better services to the end-users,

to optimise the daily building and systems' operations and usage. In particular, through devices such as smart thermostats, smart appliances, smart sockets and smart meters, we can obtain data about the users' preferences and needs, a paradigm known as crowdsensing. This data is considerably useful to create and suggest strategies to optimise consumption and to raise people's awareness. In that sense, IoT and the crowdsensing applied to consumption management and thermal comfort allows considering the energy matter not only passively from the point of view of the building (or the grid) itself, but also in its relationship with the user.

Despite the evident advantages that smart devices can add to our daily life, some barriers are making the spread of these technologies slower, being privacy concerns the main one. That is why this thesis will explore not only the existing strategies in the IoT paradigm, but also the willingness of the users to include these strategies in their every-day-life [30].

The IEA-EBC Annex 67 [31] makes it is clear that the energy flexibility of buildings should be applied at a district scale in order to obtain a sufficient impact on the energy grid. It means that it will be necessary to group buildings into clusters. This is analysed throughout the thesis at two different levels. On the one hand, the analysis of the demographic features that have a significant influence on the behaviour of people towards the new devices and methods is proposed. Enablers and motivators are deduced from a direct questionnaire prepared ad-hoc to explore people's acceptance of energy flexibility and demand response [3]. This first analysis can be very useful for energy companies to create clusters based on demographics. On the other hand, through data analysis of thousands of smart thermostats, it was possible to study the interaction of users with the thermostat around the DR event. Through clustering techniques, different categories of users are identified, in particular concerning their behaviour and their reaction to the energy shifting [2]. These clusters can be a valuable basis to plan demand response events that adapt to each group of occupants. In both cases, this can be considerably useful in predicting how a user would react to an event depending on the cluster to which they belong, but also it can encourage to involve different ways of communication considering the subjective interaction of the users.

This work is structured as a compendium of three high-impact research papers, that compose the main body of the thesis itself. To understand which motivations drove me on this path and which is the *file rouge* of the works presented, this extended abstract is used to introduce the papers. The information proposed will be presented in both English and Spanish.



The first section of the abstract has been used to explain the rationale of the work and the context of the problem faced in the thesis.

The second section contains the main objectives of the research and their linkage with the three publications that compose the thesis.

The third section summarises the methodology used for the thesis, in particular regarding the evaluation of the users' acceptance and non-efficient energy behaviour within energy flexibility strategies. The section presents the highlights of the state of the art as well.

The fourth section presents the other pertinent works that have been developed during the PhD. Each one of them explores shades of the same problems that contributed greatly to the results shown in this thesis.

Finally, the fifth section presents the main conclusions and the potentialities for future works.

## II. Objectives

According to the context depicted in the Introduction and to the literature, it was detected the following problem: many strategies have been proposed to improve the energy efficiency in buildings, in particular within an IoT paradigm, but they cannot be successful if the users' point of view and role are not framed properly. Deepening into the analysis of the state-of-the-art, they emerged several different facets of the issue, bringing out the complexity of the problem faced.

Hence, the thesis aims to explore and analyse the role of the users in the energy and technology transition that we are experiencing. This entails several matters and challenges: it has to be considered on the one hand what is the role that is given to the users within energy efficiency and flexibility strategies and, on the other hand, what is the people's response to the strategies, i.e. how their acceptance is influenced by factors such as their thermal perception, their beliefs and their awareness of the problem, among others.

The aim has been pursued through the definition of the objectives listed as follows:

- O1. To identify challenges and facets related to the energy and technology transition.
- O2. To study the role given to the users in energy efficiency and flexibility strategies within the IoT paradigm, toward a user-centric view of the problem.
- O3. To analyse the state-of-the-art regarding the IoT application to energy efficiency and flexibility strategies.
- O4. To evaluate the acceptability of the users to the main energy efficiency and flexibility strategies performed with an IoT platform.
- O5. To study the interaction of the end-users' with smart technologies during energy efficiency and flexibility strategies.
- O6. To estimate the users' thermal comfort during energy efficiency and flexibility strategies.
- O7. To support methods, e.g. the modification of users' patterns of use, to unburden and respond to the needs of the grid.
- O8. To offer the cognitive tools to optimise the planning of DR events at a district level.

Table 1 shows the linkage between the objectives and the three papers that compose this thesis. Moreover, the objectives have been a constant during my entire research, inspiring also transversal works and publications that will be presented in Section IV - Other related works. To make the relation clear, the publications have been added to Table 1 as well.

Table 1 - Objectives of the thesis

Objective	Publications composing the thesis	Comments	Other related publications of the author
O1	[1] [2] [3]	This objective is common to the three papers, since they face the sustainable development of energy use topic within an IoT framework from different perspectives	[10] [12] [13]
O2	[1] [2] [3]	One of the common points of all three publications is that the role of the user is totally central. The works explain how the user can improve their energy literacy to take responsibility for their actions.	[5] [7]
O3	[1] [2] [3]	The publication [1] is a review article, hence it is dedicated to exploring the state of the art with a special focus on IoT insertion in energy saving and thermal comfort strategies. The other two articles [2][3] also analyse the literature and are more focused on the state-of-the-art of IoT applications in demand response and demand management strategies	[5] [7] [8] [10]
O4	[2] [3]	The paper [2] analyse the acceptability in a demand response framework, including both the acceptance/rejection rate during the DR events and the eventual rebound effect after the DR events. The paper [3] is focused on the acceptability of smart technologies and demand management and flexibility strategies, exploring the willingness to change their pattern of use and to accept demand response programs.	[9]
O5	[2]	The paper [2] is based on the analysis of an extended dataset obtained by real users' smart thermostats, thanks to the program Donate Your Data launched by a famous enterprise in the field. Another real dataset from the University of Murcia was used to accomplish the O5, as explained in the section <i>Other related works</i> .	[9]
O6	[1]	The evaluation of the users' thermal comfort is one of the	[5] [7] [10]

		objectives of the paper [1]. Besides, experiments have been conducted also in the offices of the University of Murcia, as explained in the section <i>Other related works</i> .	
O7	[2] [3]	Both papers [2] and [3] support demand response strategies, that are based on the modifications of the pattern of use in response to the needs of the grid and the market.	[4] [6] [8] [9] [11]
O8	[2] [3]	To optimise the effectiveness of the DR programs, both papers [2] and [3] propose different solutions and ideas to apply the strategies on a district level through grouping and clustering.	[8] [10]

## III. Methodology

### III.1 Literature survey and state-of-art

It is clear from the previous sections that this thesis includes several separated topics, being characterised by a strong interdisciplinarity. Therefore, the survey here presented is the ensemble of the highlights from the states of the art of the different topics, regarding thermal comfort, crowdsensing and demand response. Figure 1 explains graphically how the three contributions are intertwined.

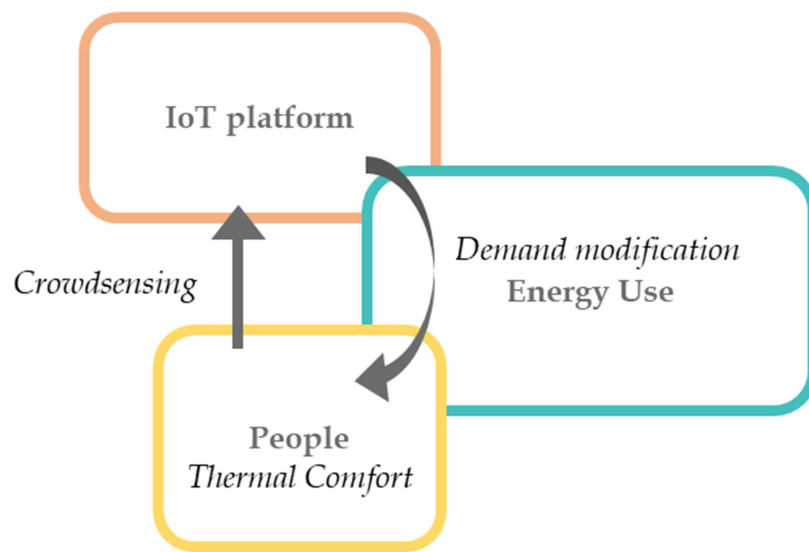


Figure 1 - Interrelation of the three topics studied on the three impact articles composing this thesis.

#### III.1.1 Thermal Comfort

People's thermal satisfaction plays a key role in the research line of this thesis. This is because of the importance to find a balance between energy saving/shifting strategies and users' thermal comfort. According to the National Human Activity Pattern Study (NHAPS), in modern society, people tend to spend 87% of their time indoors [32], which is why studying thermal comfort inside buildings has always been of great importance. A pioneer on thermal comfort research was P.O. Fanger [27], who introduced a Predicted Mean Vote (PMV) model to relate, for the first time, thermal sensation to subjective parameters such as activity and clothing levels [33]. Six parameters have been considered responsible for human thermal comfort: two concerning the individual, namely the activity level/metabolism (what

we are doing, e.g., running or staying still), the clothing insulation (what we wear); and other four related to the environment, namely indoor air velocity, mean radiant temperature, indoor relative humidity and, of course, indoor air temperature. The model was obtained by studies in steady state conditions, through experiments in climate chambers.

Some concerns were raised about the accuracy of the method of Fanger, and the so-called adaptive thermal comfort model can be considered one of the most important milestones in the field. In particular, Nicol and Humphreys [34] stated that a comfort model should include also social factors, while de Dear and Brager [35] related the acceptable and optimum indoor temperature ranges to the climate zone and the external temperature in the case of naturally ventilated buildings.

Today, both models are reflected on ASHRAE 55:2020 [36] and ISO 7730:2005 [37] standards and are accepted and used worldwide, as an attempt to unify the evident differences between the approaches [38].

In non-steady state conditions, hence in transitional conditions, recent studies [39][40] suggested the relation of thermal perception also with psychological and behavioural factors. Hence, the modern perception of thermal comfort is taking into account other parameters, such as:

- Thermal expectation/ thermal memory: past thermal experience generates presupposition about buildings in a specific cultural context.
- Thermal alliesthesia: the desire for positive pleasure, rather than neutrality, when thermally uncomfortable.
- Thermal adaptation/ habituation: prolonged exposure leads to a reduction of the normal thermal response.

Thermal discomfort is demonstrated to have effects on both health and human productivity. Neurobehavioural tests detected productivity losses in office workers exposed to thermal discomfort conditions [41]. The physiological reactions to discomfort can lead to the so-called Sick Building Syndrome (SBS) symptoms [42], which affect among others the perception of the air quality and the mood of the workers.

### III.1.2 IoT and Crowdsensing

IoT allowed a substantially large step forward in the research of balance between thermal comfort and the energy saving [43]. The conjunction of these two is the focus of the thesis. The application of the internet of things can vary on many levels, but in general, it is normally deployed in the form of an IoT platform which maintains the same structure on all cases. The platform is composed by layers that can be summarised in three:

- Cyber-Physical Layer, to acquire data, from fixed devices (environmental data) or wearable and nearable devices (personal and physiological data)
- Data harmonisation and integration Layer, to connect the devices to the control centre
- Application Layer, to implement the services that may include energy management strategy (HVAC terminal or other hardware) or comfort optimisation

In this thesis, it has been considered another way of sensing data: the so called: crowdsensing. Emerged in last years, crowdsensing is an applied research field based on participatory sensing [44]. We use the term participatory to distinguish from another field, called opportunistic crowdsensing, in which data are sensed automatically from a crowd (for instance in commercial centres or public transport). In the case of participatory crowdsensing, the user is directly involved and informed, and they choose to be an active part of the process. An important issue related to crowdsensing is users' privacy.

A normal privacy protection process involves some sort of anonymization, in some cases encryption and also obfuscation of data. Shortly, it must be guaranteed that from data it would not be possible to get to know the identity of the user and that third parties will not be authorized to use the personal data collected. A crowdsensing project has to include a client web and/or an app client mobile to allow direct communication with the end-user. The communication has to be bidirectional, i.e. the user both manages the inputs and receives instructions to improve their energy management. In the first article presented for this thesis, 'A comprehensive survey about thermal comfort under the IoT paradigm: is crowdsensing the new horizon?' [1], these topics are explored in depth. The state of the art of IoT's more traditional applications to the energy efficiency fields (hardware and simulation) are presented, while crowdsensing is presented as a new potential IoT application (Figure 2).

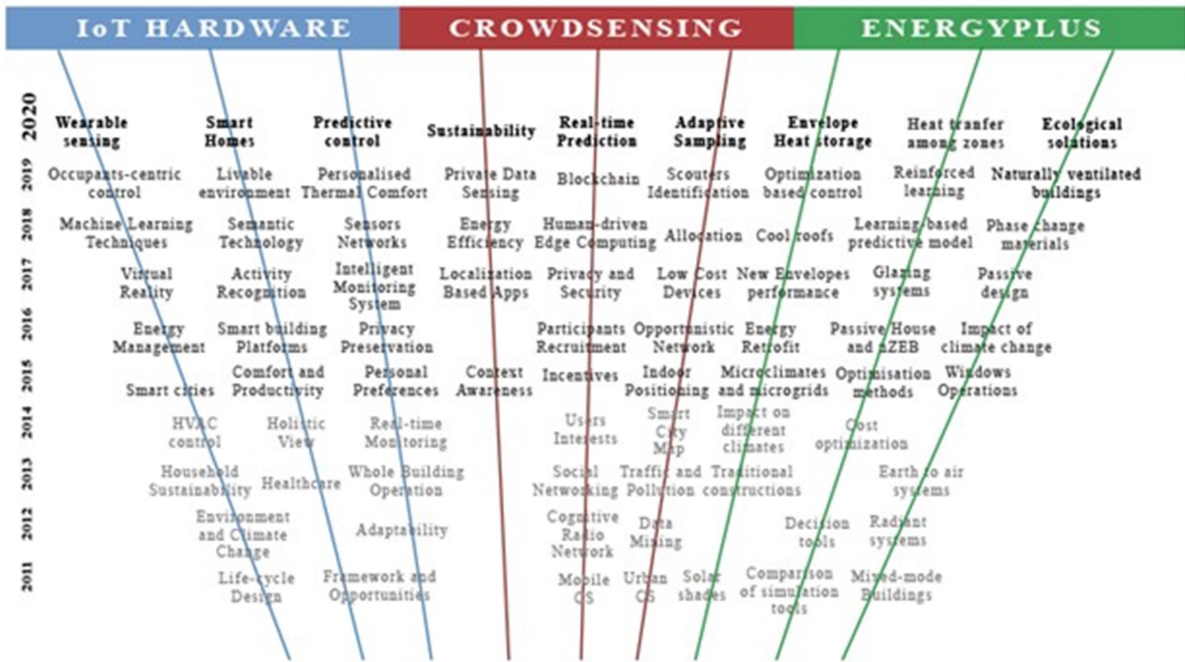


Figure 2 – Main topics covered by the scientific literature about IoT application to the thermal comfort and energy management field in the last decade, from the publication [1].

### III.1.3 Demand Response

Demand modification consist of changing the curves of demand of users to produce a benefit either for them **and/or** for the utility (Figure 3). Within this demand modification, one can find the so-called Demand Response (DR). DR are the ensemble of mechanisms that aim to reshape the peak of consumption, either reducing the consumption during peak times or shifting it to off-peak periods.

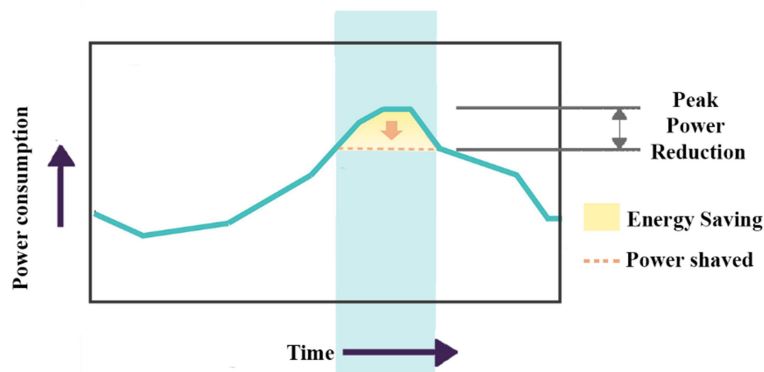


Figure 3 - Sketch of the concept of peak shaving during a demand response event, from the publication [2]



DR programs are classified according to different criteria, depending on the literature:

- According to the party that initiates the action of reducing the peak, Siano [18] differentiated within this first grouping: rate-based programs (the price of electricity varies over time, but the consumption is at users' discretion); event-based DR programs (giving to the program administrator, for instance the utility, some level of control) and demand reduction bids (customers send bids to the utility).
- Palensky et al. [45] proposed a categorization into market DR (real-time pricing, incentives) and physical DR (grid management, emergencies).
- Aalami et al. [46] proposed a distinction between voluntary programs (customers can reject or interrupt them without penalties) and mandatory programs (customers are subject to penalties if they do not curtail when directed).
- Another classification differentiates the DR strategies depending on their aim, i.e.: reduction, characterized by a continuous capability of load adjustment; curtailment, characterised by a discrete availability; shifting of load, characterized by a transfer of consumption to another time.
- According to the necessity of the grid, three categories are distinguished: economic demand response (when the value of electricity is less than the production cost), emergency demand response (insufficient supply to meet the demand), ancillary services demand response (to maintain in real-time the grid stability). But also, Patnam and Pindoriya [47] proposed a distinction between the first two groups (economic-based DR and emergency-based DR), sustaining that the third group can be considered as emergency-based: 'In case of emergencies (generation deficiency or faults), DR can be used as an ancillary service to ensure security and stability'. Based on the function, Wang et al. [48] divided programs whose goal is grid reliability and programs whose goal is grid economy.

Beyond classifications, Table 2 summarises the main DR programs and gives a brief description of each one [49][50][51]. Table 2 is an original and unpublished contribution **that** aimed at presenting a complete state of the art of DR programs for this thesis; hence, it has not been published in other works.

Some programs, such as the TOU tariffs, have been used for decades, but the opening of the electricity markets and the deployment of smart technologies are now leading the way to new opportunities. Direct Load Control (DLC) is probably the most interesting example of new opportunities, particularly in this historical moment characterised by the energy crisis

and the unprecedented rise of energy costs. In DLC, the consumer gives some level of control over its appliances to the utility company, meaning that they allow the third party to turn on and off the appliances or to change the HVAC setpoint temperature during the so-called Demand Response Event (DRE), i.e. in a specific timeframe (for example, one hour), when the electricity has the best price or when the supplier needs to adjust the demand. As an incentive-based program, the end-users receive a monetary incentive for subscribing. The management of the incentives as well as the promotion of the programs are the object of several studies [52][53].

People's acceptance of these strategies is far from trivial. Many studies focus on the benefits in terms of energy management, but a user-centric point of view is, also in this case, less common. Even when the users are included in the studies, technical and economic responses are thorough while psychological aspects of the acceptance are left aside [54].

The consumers' role and engagement can be divided into three categories [55]:

- Participation: decision to enrol in a DR program
- Response: level of response among subscribers
- Persistence: maintaining the engagement (continue to stay enrolled and respond)

Considering the novelty of the topic, persistence analysis is necessarily left to future work. Instead, this work analyses in depth the participation [3] and the response [2] of consumers. Subsections III.2 and III.3 summarise the methodologies used to study both categories, while results can be found in the corresponding publications.

Table 2 - Main characteristics of the Demand Response programs - \*Independent System Operators /Regional Transmission Organizations (ISO/RTO) – Original content

DR program	Description	Typology	Market involved	Timing	Discretion of curtailment	Function
(DLC) Direct Load Control	Customers receive incentives for allowing the utility to control the operation of some equipment.	Event-based (events initiated by the utility or the system operator)	Retail	Can last several hours. Day-ahead notice or short-time notice.	Direct (interruption at users' discretion)	Grid Economy
(A/S) Ancillary service	In exchange for payments from the grid operator, users accept to curtail load in a contingency situation	Event-based (after bidding to the wholesale market providers*)	Wholesale	Can last 10 to 30 minutes. Very short notice (minutes) or no notice.	Mandatory	Grid Reliability
(EDRP) Emergency DR	Customers receive incentives to reduce their consumption during situations of emergency (e.g. severe weather)	Event-based (events initiated by the wholesale market providers*)	Wholesale	Short notice (typically day-ahead or two hours' notice)	Voluntary	Grid Economy
(CAP) Capacity market	In exchange for guaranteed payments, participants agree to provide load reductions when contingencies arise.	Event-based (events initiated by the wholesale market providers*)	Wholesale	Minimum four-hour reduction, two-hour notification	Mandatory (penalties apply if loads are not curtailed)	Grid Economy
(I/C) Interruptible/Curtailable	In exchange for a discounted rate, the largest customers agree to reduce loads on request due to system contingencies.	Event-based (events initiated by the utility or the load-providing entity)	Retail	Customers must curtail within 30 to 60 minutes of being notified.	Mandatory (penalties apply if loads are not curtailed)	Grid Economy
(DB) Demand Bidding	When prices are high, large customers can offer a bid for load reductions.	Event-based (after bidding to the utility)	Wholesale	Day-ahead basis, duration depending on the bid	Mandatory, once the voluntary bid has been accepted	Grid Economy
(TOU) Time Of Use	Fixed rates change during the day depending on the energy use.	Price-based	Retail	Designated in the tariff (no further notice needed)	Voluntary	Grid Economy
(CPP) Critical Peak Pricing	In critical conditions, the price of electricity is substantially raised.	Price-based	Retail	Short notice (typically day-of or day-ahead)	Voluntary	Grid Economy
(RTP) Real-Time Pricing	Prices vary over a short time (e.g. hourly) ranges depending on real-time supply costs.	Price-based	Retail	Short notice (typically day-of or day-ahead)	Voluntary	Grid Economy

### **III.2 End-users' acceptance of energy flexibility strategies**

From the study of the literature emerged that the users' participation in energy flexibility strategies depends on several factors, since different types of customers will have different motivations to get involved (or not) in energy flexibility strategies. As a consequence, results from different case studies are dissimilar or even contrasting. It should be noted that the perception (previous to the acceptance) of energy flexibility strategies is highly linked with the comfort modifications of the users, when the demand is modified changing the operation of the conditioning systems. Although this was a key facet of the research presented on this thesis, we took this opportunity to go beyond DR acceptance for conditioning, and to explore other aspects of the topic.

There are many parameters behind the acceptance of energy flexibility strategies, and the willingness of enrolling in a DR program is just one of them. It was necessary a comprehensive study that took into account all the aspects of this complex discipline. To show an example, many surveys explain directly what a DR program is, but they fail to consider that there is a crucial step before: the more impacting DR program requires domotics to work. What about the acceptance of smart technologies? Are the respondents aware of all the changes that enrolling on a DR program would involve? Another point considered important from the study of the literature concerned the wrong and exaggerated saving expectations of consumers [56].

Considering these lacks in the way of proposing the topic to the consumers, it was necessary to design a questionnaire to include the several factors that affect the acceptance, littered with explanations in user-friendly language and with easy-to-understand examples that could help the consumer to correct their expectation and to increase their energy literacy (concept that has been seen to be crucial for effective energy saving measures [57]). Analysing the existing literature, it emerged that the main works faced the evaluation of the users' acceptance focusing on different aspects, namely awareness [7], flexibility of the pattern of energy use [58], disposition toward IoT technologies [30] and, of course, attitude towards the DR programs and the corresponding incentives [20]. Despite the unquestionable value of all these contributions, they failed to consider the acceptance holistically, as a whole. Hence, the inclusion of all these facets in the same work represented a step forward in the state of the art, since a comprehensive approach was missing. To cover this gap, the questionnaire was designed by considering each one of the abovementioned aspects as a sub-objective. The sub-objectives that compose the work are mapped in Figure 4.

<b>List of sub-objectives</b>	
Evaluation of the consumers' awareness of the topic	
Evaluation of the consumers' attitude toward changing their schedules	
Evaluation of the consumers' attitude toward the use of IoT technologies in their homes	
Evaluation of the consumers' attitude towards DR programs	
Evaluation of the appropriate incentives to subscribe to a DR program	

Figure 4 - List of sub-objectives of the questionnaire from the publication [3]

This direct contact with the consumers allowed me to have an insight into the enablers and barriers behind the decision to participate or not in an energy flexibility program. In particular, through tests of significance, it was possible to catch which concrete aspects of the demographics and background information of the consumers that may have an influence on the decision. This last point is a key factor in the future design of the strategies. As mentioned, energy flexibility is meant to be applied at a district level, indispensable to achieve remarkable changes in energy use. Normally, this division in districts is a matter of avoiding overlapping: if everybody shifts their energy use to the same timeframe, the result will be simply the shifting of the power peak to another time of the day. With district strategies, each group of people will shift to different hours, to obtain a homogenisation of the curve of consumption. However, the energy strategy is often meant to be the same, just applied to different timeframes. With the results of the questionnaire proposed in this thesis, I suggest designing ad hoc strategies for each district, where a district is a group of people

with specific features in common, such as residential situations and house tenure. In my opinion, a change in this sense could improve both participation and persistence.

### **III.3 Non-efficient energy behaviour within energy flexibility strategies**

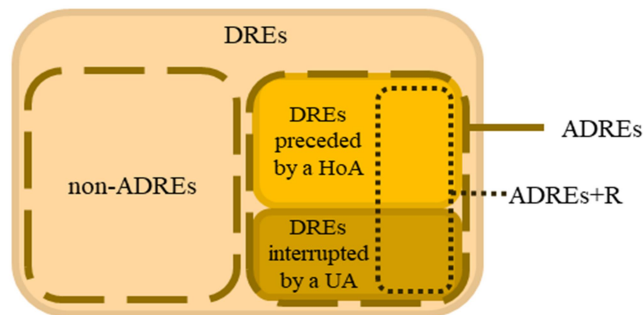
Getting the consumers to participate in energy flexibility strategies is just a first – and crucially important – step. The response once enrolled is a totally different topic. The methodology for this case consists of the analysis of data collected from real users that are enrolled in DLC programs in North America, where these strategies are already a reality. The means to apply the DLC is the smart thermostat, whose setpoint temperature is controlled by a third-party during the time of the DR Event (DRE). The data is collected directly by the manufacturer of the smart thermostat and shared with researchers after receiving permission from the users and anonymising the data.

In the literature, there are two main issues related to the behaviour of the participants experimenting a DRE. As mentioned in Table 2, DLC and other programs are interruptible, which means that the users can stop it if they want to (for example if they feel uncomfortable during the DRE), an occurrence known in the literature as override [59][60]. The interruption causes a missed power reduction, since the duration of the event is shorter than planned. The other phenomenon related to response is the so-called rebound effect [61][62], which is a new peak of consumption, after the end of the DRE, caused by the attempt of users to restore their thermal comfort. The power consumption due to the rebound does not mine the effectivity of the energy shifting, but can dramatically increase the overall consumption of the day. What the literature failed to describe is that some subscribers have a sort of anticipative response to the DRE, changing their normal schedule or pattern of use in the period that precedes the DRE. This is likely to happen because of the day-ahead notification that the consumers receive when a DRE occurs (Table 2). This is a completely new finding to the authors' knowledge, and it was discovered on the data used for this research. This discovery allowed us to map the possible responses of the users to a DRE, as shown in Figure 5.

A step forward was done to deepen the study of the rebound effect, which represented a gap in the literature. Through clustering, similar behaviours in terms of thermostat management have been detected and separated. For each cluster, the quantification of the energy

consumption is done through EnergyPlus simulations. In this way, we managed to obtain the consequences of the non-efficient behaviour of some groups of users, related to several parameters such as the setpoint chosen after the event and the number of interactions with the thermostat.

As in the case of participation, clusters can be used as a useful tool to design optimised DR strategies. In this case, the common ‘errors’ detected as a response to an event led us to suggest the creation of different events with different characteristics, according to the cluster’s tolerance, or even different ways of communicating with people from the same cluster, in order to show them which behaviours are controversial from an energy management perspective.



*Figure 5 - Responses among users enrolled on a DLC program. non-ADREs = events that went as planned by the third party; ADREs = events adjusted by the user; DREs preceded by a HoA = Hold Action, i.e. change of schedule operated by the user as anticipative response; DREs interrupted by a UA = user interruption during the event; ADREs+R = rebound after the event. From the publication [2]*

### III.4 Real-world data used on this thesis

This thesis has a strong people-centric approach. One of the main aims of the research was to take into account the opinions and preferences of the users. The choice of the datasets used for the research followed these principles as well. In particular, it was of primary importance to work with real-world data, i.e. actual data that reflected directly the users’ behaviour.

As explained in the previous subsections III.2 and III.3, the research aimed to investigate the users’ acceptance of energy flexibility strategies for both people that are enrolled in a program and people who do not. In the first case, acceptance can be seen as the willingness to embrace the change in one’s pattern of consumption to respond to the needs of the grid and the environment, In the second case, the acceptance represents the actual change that

the users managed to achieve through their actions and behaviours. As a consequence, the data needed in these two cases had to be quite different.

The dataset used to evaluate the acceptance of users not (yet) enrolled to a DR program was created from scratch. Volunteers were surveyed through a specifically designed questionnaire that faced topics namely change of habits, smart technologies, DR programs, and so forth. The need to create a new dataset is explained in the literature review of the third article of this thesis [3]: previous works faced single aspects of the acceptance, but they failed to present a holistic view of the topic that considered the relationship among the different facets. The result of the survey was the creation of a dataframe of 50 rows and 113 columns, which were used to perform several tests and analyses to understand what really influence the interviewees' points of view.

Differently, the dataset to describe the adherence of people who already enrolled in a program could not be collected through direct opinions. In fact, the research in this case focused on if and how the users' behaviour affects the success of the strategy. Hence, more objective data was needed. It was decided to analyse data collected directly through the smart thermostats installed in participants' homes. The campaign in charge of collecting the data is called Donate Your Data (DYD), and the participants to the campaign allowed the use of their data for research purposes, after a necessary process of anonymisation. The data selected for the research contained 13145 datasets from Canadian and US homes, among which 1398 families signed up to participate in a DR program. In this way, it was possible to quantify the real effect of people's behaviour on the success of the strategy.



## IV. Other related works

The publications composing the heart of this PhD are strictly focused on the role of the users, but the academic path behind the thesis embraced several branches of the energy matter. In this section, other related works are presented, in chronological order.

In the text are included direct references to the objectives listed in Section II, in order to make it easier to understand how these other works are related to the thesis and in particular which aspect we were trying to deepen through the different transversal researches presented in this section.

- Ramallo-González, A.P., Loonen, R., Tomat, V., Zamora, M.A., Surugin, D., Hensen, J., 2020. **Nomograms for de-complexing the dimensioning of off-grid PV systems**, *Renewable Energy* 161, 2020, 162-172. [4]

Regarding the need to make building energy autonomous to unburden the grid (Objective O7), we created dimensioning charts for the sizing of PV systems. Through this contribution, we aimed to simplify the work of professionals and technicians, in order to help spread the use of these systems, which were demonstrated to be a great ally for load shifting in positive energy buildings and zero energy buildings [63][64]. We designed a method based on the normalisation of the main parameters needed to size a PV system, namely the nominal power and the capacity of the battery systems. To make easier the calculation, we also created a fool kit of graphical tools to calculate the normalised parameters. The simulation, performed in Octave, took into account four different electricity profiles, as well as important factors such as the efficiency of the panels, the performance of charging and discharging, the performance of batteries, the weather data, the production losses, and so forth. The final result is a nomograph, related to a specific location, that allows solving the sizing problem at a glance. The nomographs were then validated through two different methods. Finally, we proposed a usability test, i.e. a questionnaire to estimate if respondents understand the method and if they would be willing to include it in their work. 93% of respondents managed to use the chart correctly, indicating the high usability of the tool created.

Considering my expertise and the knowledge I obtained during my PhD thesis, I was able to contribute to this paper the vision of how the different behaviours of the occupants represent different electricity demands. This was highly influential for this

work. In addition to this, I also contributed with a survey of the acceptance of the people to simple dimensioning tools as the ones shown on this paper. I was also able to learn more about the modifications that on-site generation may have on the electricity demands of dwellings what was key to fully understand the field of my thesis.

- Ramallo-González, A.P., Tomat, V., Fernández-Ruiz, P.J., Zamora-Izquierdo, M.A., Skarmeta-Gómez, A.F, 2020. **Conceptualisation of an IoT Framework for Multi-Person Interaction with Conditioning Systems**, *Energies* 2020, 13, 3094. [5]

In conditioned coworking spaces, it is very hard to achieve thermal comfort for all the occupants, because of the limited control that each person has (or perceive to have) over the thermostat and the differences in thermal perception that individual experience. Besides, most people do not fully understand the energy matter, so often it is a matter of communicating with the users in a comprehensible way [65]. To solve these issues, this work proposes an IoT framework that connects the users and the HVAC system. Through an app, each occupant can vote on their thermal preferences, and the algorithm will control the setpoint thermostat temperature as the minimum distance between all the preferences expressed. Besides, the terminals of the HVAC for the case study were equipped with a QR code readable with the app, which helps users to understand its functioning through Augmented Reality. With this publication, we aimed to support the democratisation of the thermostat in workplaces and the crowdsensing paradigm, according to the Objectives O2, O3 and O6 of this thesis. This work is the materialisation (implementation) of the findings of the paper presented as first on this thesis. As the ICT development goes beyond my thesis it was not relevant to make the development as part of my core work, but this paper demonstrates that my work on the definition and conceptualisation of crowdsensing were enough to make it a reality, as a proof of concept.

- Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta-Gómez, A., 2021. **A practical approach for modelling PV off-grid systems in EnergyPlus using post-processing of data to identify black out days**, *Proceedings of the 17th IBPSA Conference*, Bruges, Belgium, Sept. 1-3, 2021 [6]

One of the problems to which we are trying to respond through our research line is out to unburden the power grid (Objective O7), considering the increase in power

demand we are experiencing. The aggregation of a storage system is proposed as a solution to this issue, and it started to be considered a reliable alternative to the classic grid-tied renewable energy systems [66]. The battery backup can be a perfect ally to a flexible use of electricity, in the hybrid connected PV system, or it can allow a total separation from the grid, allowing people to be energetically self-sufficient. This last typology is also socially sustainable, since it is a solution also to energy poverty, in particular in remote areas where there is no easy access to the grid [67][68]. The spread of these systems is increased by the complications in sizing: the additional difficulty due to the insertion of the battery implies that most software programs do not provide specific tools for the calculation. In this work, we proposed a practical approach to model PV off-grid systems, using a widely known software, to make our contribution to the diffusion of the off-grid systems. This paper is the extension of a work that I developed and presented at the 17<sup>th</sup> IBPSA Conference. My expertise in energy simulation allowed me to conceptualise the novel method proposed in this paper. The work has been a good opportunity to deepen my knowledge of renewable energy systems and to try different tools and software to perform the simulation.

- Ramallo-González, A.P., Bardaki, C., Kotsopoulos, D., Tomat, V., González Vidal, A., Fernández Ruiz, P.J., Skarmeta Gómez, A., 2022. **Reducing Energy Consumption in the Workplace via IoT-Allowed Behavioural Change Interventions**, *Buildings* 2022, 12, 708. [7]

This work aimed at increasing the energy literacy of a workplace’s occupants through interventions on their behaviour and to invite them to reduce their energy consumption using IoT technologies. A fully operational IoT platform [69][70] was integrated into two pilot buildings, creating personalised recommendations and advices for the users based on the data collected by the network of sensors. To pursue that, the approach consisted of analysing how the users perceived their energy-saving actions. Hence the perception of the occupants (collected through a survey) was compared with the actual energy data (collected through the sensors). People energy ‘misconduct’ was underlined through several triggers, and the engagement of participants was assessed through a smartphone app that contained several educational activities, such as quizzes, questionnaires, tips and so forth. The energy consumption during the campaigns was compared to the expected

consumption based on the results of the monitoring period that preceded the experiment. The results in terms of savings were considerable, reaching an average of 20% in the winter campaign. The outcomes are in line with what was found in the literature [71][72] concerning behavioural experiments, reinforcing the idea that energy literacy is the key to pursuing long-lasting energy saving. The work covers Objectives O2, O3 and O6 of this thesis. This paper gave me a very good opportunity to contribute and to apply my knowledge about the topic, since behavioural change interventions have been the main core of my master’s thesis and my pre-doctoral experience [1]. The outcomes from the trial allowed me to spot the differences between the simulated potential improvements and the experimental ones.

- Ramallo-González, A.P., Alcañiz-Cascales, T., Tomat, V., Fernández Guillamón, A., Molina, A., Skarmeta-Gómez, A.F, 2022. **A novel method for eliminating the exponential growth of computing optimal demand response events for large-scale appliances re-scheduling**, *Sustainable Energy, Grids and Networks* 32 (2022) 100907. [8] This work provides a methodology for the optimisation of load shifting strategies at a district level. In the literature, the optimisation problem is explored at a building level [73][74], but a step further was required in order to have an effect in unburdening the grid. The multi-objective optimisation problem aimed to: minimise the peak power, the overall cost of the electricity and the distortion, i.e. how much the users are disturbed by the operations. The latter was calculated considering users’ behaviour within energy flexibility strategies, in order to study the real impact on occupants. Considering the complexity of these parameters, it is easy to understand that the solution requires a large computational time. To overcome this issue, we researched an ideal group size that can be seen as an energy community, from the point of view of the aggregator. As a result, it was seen that an optimal group of 32 households allowed to reduce importantly (up to 80%) the computational times for large-scale DR strategies, opening the path toward large-scale and district applications. An important conclusion of this work is that the three relevant objectives are related to each other and non-conflicting. This publication is in line with the Objectives O3, O7 and O8 of the thesis. In this work, the mathematical implementation behind the new method proposed was entirely based on my contribution to the theoretical framework. The analysis of the DR that I

conducted when writing the second article of this thesis [2] was the starting point to understand how to set up the objectives for the optimisation problem.

## IV.1 PHOENIX

PHOENIX is a project included in the H2020 framework, that has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 893079.

The objective of the project is to enhance the smartness of existing buildings through new IoT technologies, hence a portfolio of ICT solutions is proposed and validated through different pilot buildings all across Europe. The objective is to transform the role of building: not a passive consumer anymore, but an active agent capable of optimising its energy management. The improvement proposes are then translated into user-centric new services for the building's occupants, involving also awareness activities to prepare citizens for smart buildings.

The demonstration building that is used within the project as Proof of Concept (PoC) was UMU's pilot building. The building's name is Pleiades, and it is situated in the Espinardo Campus. Through the pilot, our research group had the chance to experiment with energy-saving and flexibility strategies and to study directly the rate of acceptance of the occupants.

For my research line, it has been an enriching experience since the vision of the project matched perfectly with the one of this final work. I had the opportunity to focus on the objectives O4, O5 and O6 of this thesis, i.e. the analysis of users' acceptance, behaviour and thermal comfort during energy flexibility strategies. The work on the pilot building can be considered an incredible added value to the research presented in this thesis, for two main reasons. Firstly, I had the chance to switch from a theoretical level (the analysis of the literature and the data analysis) to a totally practical level, having the opportunity to experiment with what is like to design the strategies and to pose my own questions to the occupants, having direct feedback from them. Secondly, in most of my research, I focused on the residential context [2][3], hence I think that exploring a different context, the workplace, was really needed to achieve a complete vision of the matter.

Publications developed on the framework of PHOENIX:

- Ntafalias, A., Tsakanikas, S., Skarvelis-Kazakos, S., Papadopoulos, P., Skarmeta-Gómez, A.F., González-Vidal, A., Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Marin-Perez, R., Vlachou, M.C., 2022. **Design and implementation of an interoperable architecture for integrating building legacy systems into scalable energy management systems**, *Smart Cities* 2022, 5, 1421-1440 [9]

This work collected the methodology and the results of the trials performed on several pilot buildings. For brevity, the paragraph will be focused on the trials particularly related to this thesis. Within the project, we had the chance to perform DREs in a workplace context, through the remote control of the HVAC systems. The events had three different aims, according to the trial: (1) energy saving, (2) energy shifting on a tariff basis, (3) energy shifting on a renewable production basis. The occupants were involved through direct questionnaires, a way to verify that their thermal comfort was maintained during the experiment and to study their acceptance of the strategy (how it affected productivity, how they felt during the precooling phase, and so on). From what has been said, this work complied with the objectives O4, O5, O6 and O7 of this thesis.

- Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta-Gómez, A., 2023. **Evaluation of cost-effectiveness and energy flexibility potential of different interventions through the SRI score - Evaluation under the IoT paradigm**. In *Cyber-Physical System Solutions for Smart Cities*, IGI Global [10]

One of the scopes of the project was to support the novel initiative of the European Commission: the Smart Readiness Indicator (SRI) [75]. The SRI was introduced since the last revision of the EBPD [76] in order to measure the level of ‘smartness’ in buildings. The assessment is based on three key functionalities, namely optimising energy efficiency and overall in-use performance; adapting operation to the needs of the occupants and adapting to signals from the grid. This is a very large step forward in the definition of an energy flexibility framework: up to now, energy flexibility could be measured only through some measurements related to it, while through the SRI it will be possible for the first time to *quantify* energy flexibility [77].

The work gives information about the basics of the method, based on a list of smart services related to a score per domain and per impact factors. For the eight pilot buildings of the project, the assessment is done both before and after the interventions developed within the project. Many transversal aspects are also

considered, such as the investment needed to increase the score for each case and the usability of the SRI tool, evaluated through a direct questionnaire to the assessors. Finally, a section of the work was dedicated to the relationship between SRI and DR strategies, with a special focus on the devices required to perform DLC. The objectives in common with the thesis were O1, O3 and O8.

- Ye, Y., Ramallo-González, A.P., Tomat, V., Sánchez-Valverde, J., Skarmeta-Gómez, A., 2023. **Smart-Watcher© a solution to automatically assess the smartness of buildings**, *Computers*, 2023, 12 (4) 76 [11]

With this work, we continue our study about the SRI potential. One of the main issues reported in the literature is the lack of objectivity of the method. In fact, the assessor has to assign a functionality level to each smart service, and the final results can vary depending on their subjective decision [78]. This is something that we experienced directly, since in the project we had five different assessors and extra effort was required to work synergically in order to obtain comparable results. In addition to this, we foreseen a necessity of an immense workforce of professionals to do the large number of SRI certificates of the existing building stock. As a solution for both issues, it was proposed in this paper an engine capable of automatise the assessment of the SRI by using Neuronal Processing Language (NPL) [79]. Considering that one of the main objectives of the introduction of the new indicator is to allow buildings to respond to the need of the grid, this work is in line with the objective O7 of this thesis.

- SB4EU – White papers. Interoperability. SmartBuilt4EU White Paper – Task Force 2: Efficient Building Operation [12] and Optimised building costs. SmartBuilt4EU White Paper – Task Force 2: Efficient Building Operation [13].

SB4EU is an H2020 project that supports the spread of a smart building ecosystem in Europe. In particular, they organised several task forces aimed at creating reports, in the form of white papers, collecting the opinion of several experts on the topic discussed. As part of the consortium of PHOENIX, we have been invited to contribute to the task force titled ‘Efficient building operation’, which was a very good occasion to disseminate our results while enriching our knowledge with the lesson learnt by the other experts. In that sense, the participation in the activities and the workshops organised within the projects and the final writing of the white

papers contributed greatly to the definition of the framework for this thesis, hence in the Objective O1 of my research line.

One of the topics of the task force was interoperability, a novel concept that recently capture the attention of the scientific community. It refers to the conception of complex systems that combine IoT architecture with building features. Interoperability among building components and systems involves several fields: energy management, comfort, smart devices, security, control and connectivity. From the energy flexibility point of view, interoperability is essential: the efficiency of the strategies is maximised by the streamlining of building operations (avoiding duplication of efforts, controlling the technical systems and so forth) and it also enables the interaction of the technical building system and the grid.

The other topic covered was optimised building cost, i.e. how to obtain the optimal integration of smart solutions to increase the efficiency of energy management in buildings. The final aim of the work is to achieve a more sustainable way to live in the built environment, but the investment to achieve this scope has long payback periods. Assessing the life cycle, optimisation approaches are proposed, in particular regarding digitalisation and IoT. It is important to highlight once again that one of the main barriers detected in this work is the lack of user involvement, which limits the optimisation potential.



## VI. Conclusions and future work

Considering the energy and technology transition that characterises this historical period, the thesis frames the main challenges that we are asked to face in the near future, giving the theoretical means to improve the design of energy flexibility and energy saving strategies. The contribution of this thesis to the main fields covered is outlined in Figure 6.

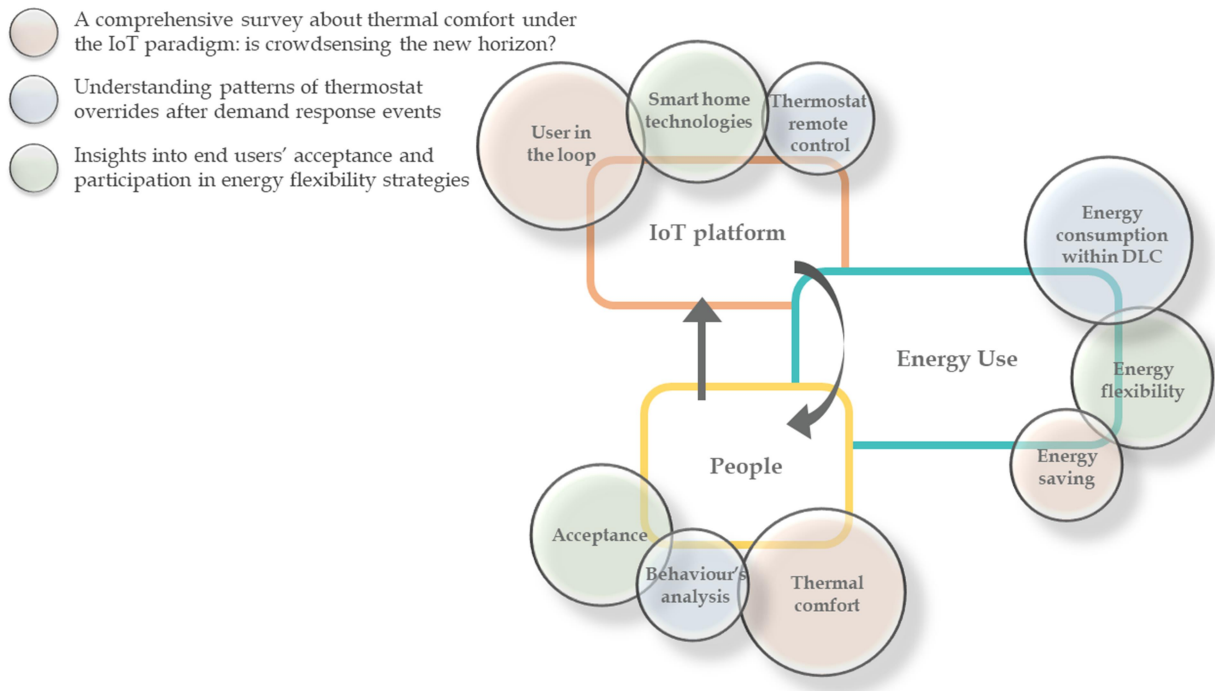


Figure 6 – Contribution of the three impact articles of this thesis on the fields studied, with the specifications of which aspect of each article is related to the main topic.

Having in mind the objectives of this thesis, here are listed the conclusions that represent the main lessons learnt from the research behind the works presented above:

- Strategies of all kinds that affect people's lives must be based on people's opinions and preferences. From the literature, it emerged that the occupants have been traditionally considered passive receivers, but giving them active roles and responsibility in energy-related strategies, with the help and support of IoT technologies, increases both their wellbeing and their use of energy, as emerged from the literature review in [1].
- The one-fits-all formula cannot be applied anymore to the strategies in the residential sector [1]. A spread of smart home technologies is utterly needed to achieve personalised solutions [9], which will increase both the users' acceptance [3] and the

correct execution of the strategies [2]. Computational times can be contained through an application of this principle to a district level [7].

- Linked to the previous point, the districts should not be formed anymore by a neighbourhood, composed of totally different people, but instead it should be formed by users that have similar behaviours (with respect to the energy consumption habits) or at least similar demographics/background, since such characteristics can be predictors of the behaviour, as seen in [3].
- HVAC solutions that involve an IoT platform, guaranteeing continuous communication among all the parts (occupants-building-grid). A two-ways dataflow, that is collecting feedback from the users through an interface and provide them with reports and suggestions, show better results compared to the one-way communication. In that sense, the paradigm of crowdsensing can be applied successfully to the field.
- Participating in energy-related strategies is not enough if the users are not aware of the consequences of their behaviour. The incorrect execution, or users' 'misbehaviour', can reduce the effectiveness of the strategies. This phenomenon is more common than one can think, as demonstrated by the real-world data analysed in [2]: in 38.5% of cases, occupants chose to adjust the strategy. Among them, in 36% of the cases, the success of the DRE is further undermined by additional rebounds.
- In strategies that involve the HVAC systems, the adjustments (previous point) are not merely related to thermal comfort. It was seen in [2] that people who adjust or interrupt the DREs and people who do not are exposed to both similar indoor temperatures and similar delta (or variation of) indoor temperatures during the experiments. This suggests that the change in the physical environment within a DRE cannot be considered a predictor of the adjustments.
- Communication with users with plain language is fundamental for their acceptance of the strategies: in [3] it was seen that simple explanations were enough to raise the users' interest in trying them. On the other hand, the choice of communicating through real-life examples allows having more reliable feedback compared to general questions, confirming again the need for informative plans to guide the consumers.
- Background information, e.g. demographics, home tenure, home situation, presence of children have a significant influence on the different facets of the users' acceptance of the energy-related strategies [3].

For my understanding of the problem and what I have found during my research, future work should focus on two main aspects.

First of all, the need for tailored strategies. The modern world is not meant for labels: each person has their own manner of perceiving the environment and their own preferences. When the strategies for energy saving are designed, users' opinions and needs should be taken into account as a parameter of the energy problem. Thanks to IoT technologies, it is possible to create solutions *ad hoc* for each group of people that behave in similar ways. In that sense, this thesis is meant to have a very practical use: acceptance of energy flexibility strategies has been found to be related to demographics and background features, which suggest as a first step the creation of districts on which operate. Among them, some occupants will be satisfied with the change, while some other will not. This is particularly true for strategies that involve the HVAC system, since the thermal perception of the same environment can be different. Hence, a second grouping should be done based on tolerance, thermal preference and so on.

The second aspect, somehow related to the first one, is the communication with the users. We are facing a major energy crisis, and people still worry about where to find more energy. Not many people are asking 'how can we consume *less*?'. We have posed the wrong question for so long that we are not even capable of questioning whether we are putting the focus in the right direction. In a talk by Professor Omar Massara, I once heard these inspiring words: 'the only sustainable growth is degrowth'. So simple and yet so difficult to understand.

As discussed in the previous sections, most people are not even aware of the magnitude of the problem and of the urgency to start a sustainable energy transition by changing our behaviour, hence it is improbable that users will change their patterns by themselves. Regulations are an important step of this process, since they show the users the right path to follow. That is why this work supported the introduction in the legislation of the Smart Readiness Indicator (SRI), which is an example of how the energy transition can receive an impulse (energy flexibility strategies require a minimum level of technology and networking to work, so this transition is hardly imaginable without the IoT). However, regulations take some time to be accepted, so a direct communication plan is needed to have the spread in our daily lives happening faster.

Communication and engagement plans are crucial for a good result in terms of diffusion and acceptance of the strategies. It is a difficult task to involve people, but nowadays we are in front of a series of drastic revolutions caused by apps and social media. There are endless examples: people that have followed the same patterns for years are now changing their eating/working out/sleeping habits because they are influenced by very effective communication plans. Moreover, people are starting to show interest in environmental themes, climate change, plastic contamination, and so on: this is a good moment to involve the users and take a step toward the so-called switch from consumer to prosumer. Future work should work more on this aspect, it is not enough to propose good strategies if the dissemination of the results is neglected.

# Resumen

---

---

## I. Introducción y motivación

Todos sabemos que nos enfrentamos a una crisis medioambiental. La sociedad está aceptando pasivamente las consecuencias sin apenas más que alguna queja o protesta ocasional. En cierto modo, se disocia el problema de la misma razón por la que se está produciendo.

Según la bibliografía, el 40% del consumo total de energía primaria corresponde al sector de la edificación [14]. De esa parte, el consumo de HVAC (sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación) es responsable de alrededor del 38% [15]. Para dar una idea de las proporciones, la energía que puede reducirse en los edificios de todo el mundo según el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible es comparable a la energía que necesita todo el sector del transporte [16].

Esta situación está empeorando. Nuestro consumo eléctrico aumenta cada año; en parte debido a los nuevos hábitos (patinetes y coches eléctricos, bombas de calor eléctricas, etc.) y

en parte porque tendemos a poseer muchos más aparatos en comparación con los que utilizábamos en décadas pasadas. Aparte del consumo bruto de electricidad, existen otros problemas que están apareciendo en el sistema eléctrico. En determinadas horas del día (por ejemplo, cuando la gente llega a casa del trabajo), varios usuarios finales utilizan sus electrodomésticos al mismo tiempo, creando los llamados picos de demanda. La magnitud de estos picos tiene dos consecuencias principales: por un lado, la energía se encarece al tener que poner en marcha más generadores. Por otro, las redes de nuestras ciudades, construidas hace décadas, se vuelven insuficientes. Por lo tanto, la red no puede soportar nuestras nuevas necesidades, y pueden empezar a producirse apagones o cortes de electricidad, amenazando la estabilidad del suministro eléctrico.

Existen varias soluciones a este problema, como mejorar la infraestructura física que construye la red o dotar a todos los edificios de almacenamiento eléctrico para modificar la demanda. Aún así, una solución sostenible que no implica una gran inversión es el cambio voluntario del uso de la energía por parte del usuario final. Cambiar el uso de la energía significa modificar las pautas de consumo de los usuarios finales: nosotros. Nos referimos a la modificación del uso de la energía por parte de los consumidores con el término Gestión de la Demanda, que implica estrategias tanto técnicas como de comportamiento (cambio a través de la educación de las personas, aumento de la concienciación y compromiso) [17]. La conjunción de las estrategias utilizadas para lograr la modificación del patrón de uso y la reducción de los picos de consumo se conoce como Respuesta a la Demanda (DR, del inglés Demand Response). En el marco de DR, el pico de potencia puede modificarse mediante el recorte del consumo de energía, es decir, un ahorro neto de energía, o mediante el desplazamiento del consumo de energía, con el fin de evitar los picos elevados debidos a la acumulación de sistemas utilizados que provocan el pico, o mediante el recorte y el desplazamiento. [18].

En los últimos años se han puesto en marcha numerosos programas de DR para responder a la necesidad de una cuota de usuarios lo más amplia posible. La categorización de las estrategias de DR se expone en la Sección III. Para el objetivo de esta tesis doctoral, la principal distinción que puede destacarse entre los programas radica en la entidad encargada de la reducción de la demanda punta. En algunos casos, por ejemplo la conocida Tarifa de Uso (ToU, del inglés Tariff of Use), los usuarios son responsables de cambiar sus patrones de uso en función de unas tarifas fijas de electricidad. En otros casos, el consumidor delega la responsabilidad en la compañía eléctrica, dándole el control sobre sus

aparatos (por ejemplo, sobre un termostato inteligente) en un plazo determinado (con el llamado *evento* de respuesta a la demanda) [19].

En este contexto, se plantearon una serie de cuestiones en esta investigación relativas al papel del usuario cuando participa en este tipo de programas de modificación de la demanda.

Los estudios revelan una actitud generalmente positiva hacia la idea de ahorrar energía [20], pero se demostró que los usuarios no son capaces de cambiar sus hábitos si su intención no es lo suficientemente fuerte [21]. En este sentido, existe una teoría cognitiva desarrollada por Ajzen, denominada Teoría del Comportamiento Planificado [22], que se ha utilizado con éxito para predecir y comprender los comportamientos de las personas en contextos específicos. La intención es un factor central en la teoría y se supone que capta los factores motivacionales que influyen en un comportamiento. La intención de un individuo viene determinada por sus creencias conductuales (la percepción sobre las consecuencias de determinadas acciones), sus normas subjetivas (la presión social) y el control conductual percibido (la valoración personal de la dificultad de una acción). Por lo tanto, la intención puede llevar o no al comportamiento.

Además, los seres humanos tienden a buscar de forma natural su comodidad. Esto es especialmente relevante cuando el cambio del patrón de consumo implica a los sistemas eléctricos de calefacción y refrigeración. La comunidad científica coincide en que una de las tareas más difíciles en este tipo de estrategias de gestión energética es encontrar el equilibrio entre la eficiencia energética y el confort térmico de los ocupantes [23][24][25]. En consecuencia, es esencial comprender los mecanismos que subyacen al confort térmico humano, un tema que ha acaparado la atención de los círculos académicos durante décadas, como se explicará detalladamente en la Sección III.1. El confort térmico depende fundamentalmente del intercambio de calor del cuerpo humano con el entorno físico, que incluye el balance térmico y otros mecanismos termofisiológicos como la sudoración y los escalofríos [26]. Tradicionalmente se ha relacionado tanto con parámetros objetivos (relacionados con el entorno físico) como subjetivos (relacionados con los individuos, como los niveles de actividad y de vestimenta) [27]. Sin embargo, estudios modernos han puesto de manifiesto que la percepción del confort térmico también está relacionada con factores psicológicos y de comportamiento, como la expectativa térmica, la adaptación térmica y otros factores complejos. [28].

Por todo ello, la respuesta de las personas a la búsqueda del ahorro energético dista mucho de ser objetiva ni unánime, ya que hay factores psicológicos y de comportamiento implicados tanto en su percepción térmica como en su aceptación a modificar sus hábitos. Por lo tanto, la fórmula única difícilmente puede funcionar, y es necesario encontrar soluciones personalizadas y a medida.

En esta tesis doctoral se propone el Internet de las Cosas (IoT, del inglés Internet of Things) como nexo de unión entre las necesidades de las personas y las del edificio/la red. IoT se refiere a los dispositivos que están interconectados para transferir datos y realizar actuaciones [29]. La transmisión de datos es lo que nos permite hacer inteligente nuestro entorno físico, ya que a través de su análisis es posible mejorar el funcionamiento de dispositivos y aparatos para dar mejores servicios a los usuarios finales, optimizar el funcionamiento y el uso diario de edificios y sistemas. En concreto, a través de dispositivos como termostatos inteligentes, electrodomésticos inteligentes, enchufes inteligentes y contadores inteligentes, podemos obtener datos sobre las preferencias y necesidades de los usuarios, paradigma conocido como *crowdsensing*. Estos datos son considerablemente útiles para crear y sugerir estrategias de optimización del consumo y de concienciación de la población. En ese sentido, IoT y el *crowdsensing* aplicados a la gestión del consumo y el confort térmico permiten considerar la cuestión energética no sólo de forma pasiva desde el punto de vista del propio edificio (o de la red), sino también en su relación con el usuario.

A pesar de las evidentes ventajas que los dispositivos inteligentes pueden añadir a nuestra vida cotidiana, algunas barreras están haciendo que la difusión de estas tecnologías sea más lenta, siendo la preocupación por la privacidad la barrera principal. Por ello, esta tesis explorará no sólo las estrategias existentes en el paradigma de IoT, sino también la disposición de los usuarios a incluir estas estrategias en su vida cotidiana. [30].

El Anexo 67 de la IEA-EBC [31] deja claro que la flexibilidad energética de los edificios debe aplicarse a escala de distrito para obtener un impacto suficiente en la red energética. Esto significa que será necesario agrupar los edificios en *clusters*. Esto se analiza a lo largo de la tesis a dos niveles diferentes. Por un lado, se propone el análisis de las características demográficas que influyen significativamente en el comportamiento de las personas hacia los nuevos dispositivos y métodos. Los facilitadores y motivadores se deducen de un cuestionario directo elaborado ad-hoc para explorar la aceptación de la flexibilidad energética y la respuesta a la demanda por parte de las personas [3]. Este primer análisis puede ser muy útil para que las empresas energéticas creen clusters basados en datos



demográficos. Por otro lado, mediante el análisis de datos de miles de termostatos inteligentes, se pudo estudiar la interacción de los usuarios con el termostato en torno al evento de DR. Mediante técnicas de agrupación (*clustering*), se identifican diferentes categorías de usuarios, en particular en lo que respecta a su comportamiento y su reacción ante las modificaciones de consumo [2]. Estas agrupaciones pueden ser una base valiosa para planificar eventos de respuesta a la demanda que se adapten a cada grupo de ocupantes. En ambos casos, esto puede ser considerablemente útil para predecir cómo reaccionaría un usuario ante un evento dependiendo del cluster al que pertenezca, pero también puede animar a involucrar diferentes formas de comunicación teniendo en cuenta la interacción subjetiva de los usuarios.

Esta obra se estructura como un compendio de tres trabajos de investigación de gran impacto, que componen el cuerpo principal de la tesis propiamente dicha. Para entender qué motivaciones me impulsaron en este camino y cuál es el *file rouge* de los trabajos presentados, se utiliza este resumen extendido como introducción a los mismos. La información propuesta se presentará tanto en inglés como en español.

El primer apartado del resumen se ha utilizado para explicar la justificación del trabajo y el contexto del problema al que se enfrenta la tesis.

La segunda sección contiene los principales objetivos de la investigación y su vinculación con las tres publicaciones que componen la tesis.

La tercera sección resume la metodología utilizada para la tesis, en particular en lo que respecta a la evaluación de la aceptación de los usuarios y el comportamiento energético no eficiente dentro de las estrategias de flexibilidad energética. La sección presenta también los aspectos más destacados del estado del arte.

La cuarta sección presenta los otros trabajos pertinentes que se han desarrollado durante el doctorado. Cada uno de ellos explora matices de los mismos problemas que han contribuido en gran medida a los resultados mostrados en esta tesis.

Finalmente, la quinta sección presenta las principales conclusiones y las potencialidades para futuros trabajos.

## II. Objetivos

De acuerdo con el contexto descrito en la Introducción y con la literatura, se detectó el siguiente problema: se han propuesto muchas estrategias para mejorar la eficiencia energética en los edificios, en particular dentro de un paradigma IoT, pero no pueden tener éxito si el punto de vista y el papel de los usuarios no se enmarcan adecuadamente. Profundizando en el análisis del estado del arte, surgieron varias facetas diferentes de la cuestión, poniendo de manifiesto la complejidad del problema al que nos enfrentamos.

De ahí que la tesis pretenda explorar y analizar el papel de los usuarios en la transición energética y tecnológica que estamos viviendo. Esto conlleva varias cuestiones y retos: hay que considerar, por un lado, cuál es el papel que se otorga a los usuarios dentro de las estrategias de eficiencia y flexibilidad energética y, por otro, cuál es la respuesta de las personas a las estrategias, es decir, cómo influyen en su aceptación factores como su percepción térmica, sus creencias y su conciencia del problema, entre otros.

La finalidad se ha perseguido mediante la definición de los objetivos que se enumeran a continuación:

- O1. Identificar los retos y facetas relacionados con la transición energética y tecnológica.
- O2. Estudiar el papel otorgado a los usuarios en las estrategias de eficiencia energética y flexibilidad dentro del paradigma IoT, hacia una visión del problema centrada en el usuario.
- O3. Analizar el estado del arte de la aplicación de IoT a la eficiencia energética y las estrategias de flexibilidad.
- O4. Evaluar la aceptación de los usuarios a las principales estrategias de eficiencia y flexibilidad energética, en el marco de plataformas IoT.
- O5. Estudiar la interacción de los usuarios finales con las tecnologías inteligentes durante las estrategias de eficiencia energética y flexibilidad.
- O6. Estimar el confort térmico de los usuarios durante las estrategias de eficiencia energética y flexibilidad.
- O7. Apoyar métodos, por ejemplo la modificación de los patrones de uso de los usuarios, para aliviar la carga de la red eléctrica y responder a su necesidades.
- O8. Ofrecer las herramientas cognitivas para optimizar la planificación de eventos de DR a nivel de distrito.

La Tabla 1 muestra la vinculación entre los objetivos y los tres trabajos que componen esta tesis. Además, los objetivos han sido una constante durante toda mi investigación, inspirando también trabajos y publicaciones transversales que se presentarán en la Sección IV - Otros trabajos relacionados. Para dejar clara la relación, se han añadido también dichas publicaciones a la Tabla 1.

Tabla 3 - Objetivos de la tesis

Objetivo	Publicaciones que componen la tesis	Observaciones	Otras publicaciones relacionadas
O1	[1] [2] [3]	Este objetivo es común a los tres trabajos, ya que afrontan el tema del desarrollo sostenible del uso de la energía en el marco de la IoT desde diferentes perspectivas	[10] [12] [13]
O2	[1] [2] [3]	Uno de los puntos comunes de las tres publicaciones es que el papel del usuario es totalmente central. Las obras explican cómo el usuario puede mejorar sus conocimientos energéticos para responsabilizarse de sus actos.	[5] [7]
O3	[1] [2] [3]	La publicación [1] es un artículo de revisión, por lo que se dedica a explorar el estado del arte con un enfoque especial en la inserción de IoT en estrategias de ahorro energético y confort térmico. Los otros dos artículos [2][3] también analizan la literatura y se centran más en el estado del arte de las aplicaciones de IoT en estrategias de respuesta y gestión de la demanda.	[5] [7] [8] [10]
O4	[2] [3]	El documento [2] analiza la aceptabilidad en un marco de respuesta a la demanda, incluyendo tanto la tasa de aceptación/rechazo durante los eventos de DR como el eventual efecto rebote tras los eventos de DR. El documento [3] se centra en la aceptabilidad de las tecnologías inteligentes y las estrategias de gestión de la demanda y flexibilidad, explorando la disposición a cambiar su patrón de uso y a aceptar los programas de respuesta a la demanda.	[9]
O5	[2]	El trabajo [2] se basa en el análisis de un conjunto de datos ampliado obtenido por termostatos inteligentes de usuarios reales, gracias al programa Dona Tus Datos lanzado por una famosa empresa del sector. Para realizar el O5 se utilizó otro conjunto de datos reales de la Universidad de Murcia, como se explica en la sección <i>Otros trabajos relacionados</i> .	[9]

O6	[1]	La evaluación del confort térmico de los usuarios es uno de los objetivos del trabajo [1]. Además, también se han realizado experimentos en las oficinas de la Universidad de Murcia, como se explica en la sección <i>Otros trabajos relacionados</i> .	[5] [7] [10]
O7	[2] [3]	Ambos documentos [2] y [3] apoyan las estrategias de respuesta a la demanda, que se basan en la modificación del patrón de uso en respuesta a las necesidades de la red y del mercado.	[4] [6] [8] [9] [11]
O8	[2] [3]	Para optimizar la eficacia de los programas de DR, ambos documentos [2] y [3] proponen diferentes soluciones e ideas para aplicar las estrategias a nivel de distrito mediante la agrupación y el clustering.	[8] [10]

## III. Metodología

### III.1 Estudio bibliográfico y estado del arte

De las secciones anteriores se desprende claramente que esta tesis incluye varios temas separados, caracterizados por una fuerte interdisciplinariedad. Por lo tanto, el estudio que aquí se presenta es el conjunto de los aspectos más destacados del estado del arte de los diferentes temas, en relación con el confort térmico, el crowdsensing y la respuesta a la demanda. La Figura 1 explica gráficamente cómo se entrelazan las tres contribuciones.

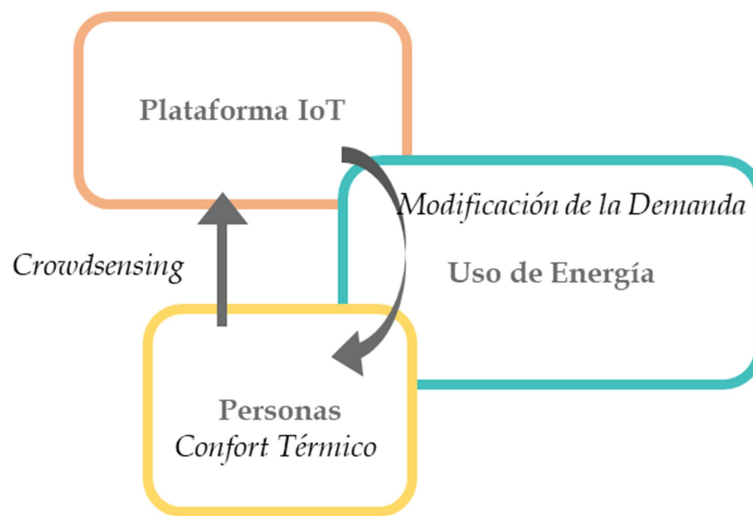


Figura 7 - Interrelación de los tres temas estudiados en los tres artículos de impacto que componen esta tesis.

#### III.1.1 Confort Térmico

La satisfacción térmica de las personas desempeña un papel clave en la línea de investigación de esta tesis. Esto se debe a la importancia de encontrar un equilibrio entre las estrategias de ahorro/transferencia de energía y el confort térmico de los usuarios. Según el National Human Activity Pattern Study (NHAPS), en la sociedad moderna, las personas tienden a pasar el 87% de su tiempo en interiores [32], por lo que el estudio del confort térmico en el interior de los edificios siempre ha sido de gran importancia. Un pionero en la investigación del confort térmico fue P.O. Fanger [27], que introdujo un modelo de predicción del voto medio (PMV, del inglés Predicted Mean Vote) para relacionar, por primera vez, la sensación térmica con parámetros subjetivos como los niveles de actividad y

de ropa [33]. Se han considerado seis parámetros responsables del confort térmico humano: dos relativos al individuo, es decir, el nivel de actividad/metabolismo (lo que estamos haciendo, por ejemplo, correr o permanecer quietos), el aislamiento de la ropa (lo que llevamos puesto); y otros cuatro relacionados con el entorno, es decir la velocidad del aire interior, la temperatura radiante media, la humedad relativa interior y, por supuesto, la temperatura del aire interior. El modelo se obtuvo mediante estudios en condiciones estacionarias, a través de experimentos en cámaras climáticas.

Surgieron algunas dudas sobre la precisión del método de Fanger, y el llamado modelo de confort térmico adaptativo puede considerarse uno de los hitos más importantes en este campo. En particular, Nicol y Humphreys [34] afirmaron que un modelo de confort debería incluir también factores sociales, mientras que de Dreier y Brager [35] relacionaron los rangos de temperatura interior aceptables y óptimos con la zona climática y la temperatura exterior en el caso de edificios con ventilación natural.

En la actualidad, ambos modelos se reflejan en las normas ASHRAE 55:2020 [36] e ISO 7730:2005 [37] y se aceptan y utilizan en todo el mundo, en un intento de unificar las evidentes diferencias entre los enfoques [38].

En condiciones no estacionarias, es decir, en condiciones de transición, estudios recientes [39][40] sugieren la relación de la percepción térmica también con factores psicológicos y de comportamiento. De ahí que la percepción moderna del confort térmico tenga en cuenta otros parámetros, como:

- Expectativa térmica/memoria térmica: la experiencia térmica pasada genera presuposiciones sobre los edificios en un contexto cultural específico.
- Alestesia térmica: deseo de placer positivo, en lugar de neutralidad, cuando se siente incomodidad térmica.
- Adaptación térmica/ habituación: la exposición prolongada provoca una reducción de la respuesta térmica normal.

Está demostrado que el malestar térmico tiene efectos tanto sobre la salud como sobre la productividad humana. Pruebas neurocomportamentales detectaron pérdidas de productividad en trabajadores de oficina expuestos a condiciones de incomodidad térmica [41]. Las reacciones fisiológicas a la incomodidad pueden dar lugar a los denominados síntomas del síndrome del edificio enfermo (SEE) [42], que afectan, entre otras cosas, a la percepción de la calidad del aire y al estado de ánimo de los trabajadores.

### III.1.2 IoT y Crowdsensing

El IoT permitió un avance sustancialmente grande en la investigación del equilibrio entre el confort térmico y el ahorro energético [43]. La conjunción de ambos es el objetivo de esta tesis. La aplicación del internet de las cosas puede variar en muchos niveles, pero en general, normalmente se despliega en forma de una plataforma IoT que mantiene la misma estructura en todos los casos. La plataforma se compone de capas que pueden resumirse en tres:

- Capa ciberfísica, para adquirir datos de dispositivos fijos (datos ambientales) o dispositivos portátiles y cercanos (datos personales y fisiológicos).
- Capa de armonización e integración de datos, para conectar los dispositivos al centro de control
- Capa de aplicación, para implementar los servicios que pueden incluir la estrategia de gestión de la energía (terminal HVAC u otro hardware) o la optimización del confort.

En esta tesis, se ha considerado también otra forma de adquisición de datos: el llamado: crowdsensing. Surgido en los últimos años, el crowdsensing es un campo de investigación aplicada basado en la adquisición participativa de datos [44]. Utilizamos el término participativo para distinguirlo de otro campo, denominado crowdsensing oportunista, en el que los datos se adquieren automáticamente de una multitud (por ejemplo, en centros comerciales o transportes públicos). En el caso del crowdsensing participativo, el usuario está directamente implicado e informado, y elige ser parte activa del proceso. Una cuestión importante relacionada con el crowdsensing es la privacidad de los usuarios.

Un proceso normal de protección de la privacidad implica algún tipo de anonimización, en algunos casos encriptación y también ofuscación de los datos. En definitiva, se debe garantizar que a partir de los datos no se pueda llegar a conocer la identidad del usuario y que no se autorice a terceros a utilizar los datos personales recogidos. Un proyecto de crowdsensing tiene que incluir un cliente web y/o una aplicación móvil para permitir la comunicación directa con el usuario final. La comunicación tiene que ser bidireccional, es decir, el usuario gestiona los inputs y al mismo tiempo recibe instrucciones para mejorar su gestión energética. En el primer artículo presentado para esta tesis, 'A comprehensive survey about thermal comfort under the IoT paradigm: is crowdsensing the new horizon?' [1], se exploran estos temas en profundidad. Se presenta el estado del arte de las aplicaciones más tradicionales de IoT a los campos de la eficiencia energética (hardware y simulación),

mientras que el crowdsensing se presenta como una nueva aplicación potencial de IoT (Figura 2).

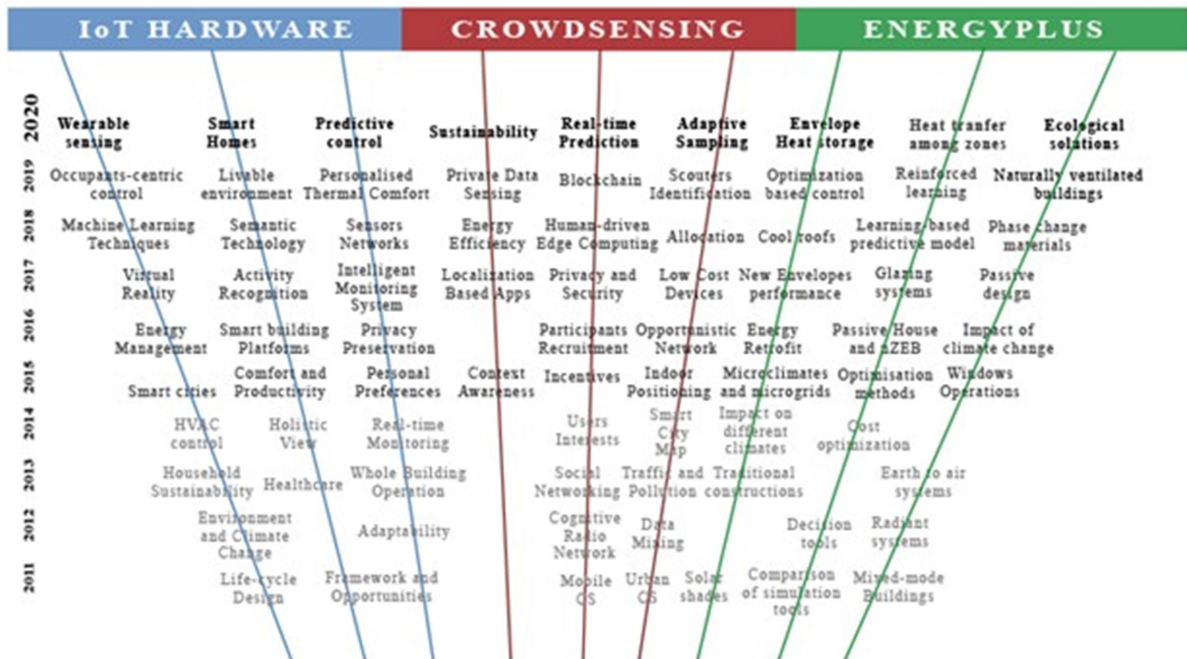


Figura 8 – Principales temas tratados por la literatura científica sobre la aplicación de IoT al campo del confort térmico y la gestión energética en la última década, extraído de la publicación [1].

### III.1.3 Respuesta a la Demanda

La modificación de la demanda consiste en cambiar las curvas de demanda de los usuarios para producir un beneficio para ellos y/o para la empresa eléctrica (Figura 3). Dentro de este marco, se encuentra la llamada Respuesta a la Demanda (DR). La DR es el conjunto de mecanismos que tienen como objetivo remodelar el pico de consumo, ya sea reduciendo el consumo durante las horas punta o desplazándolo a periodos valle.



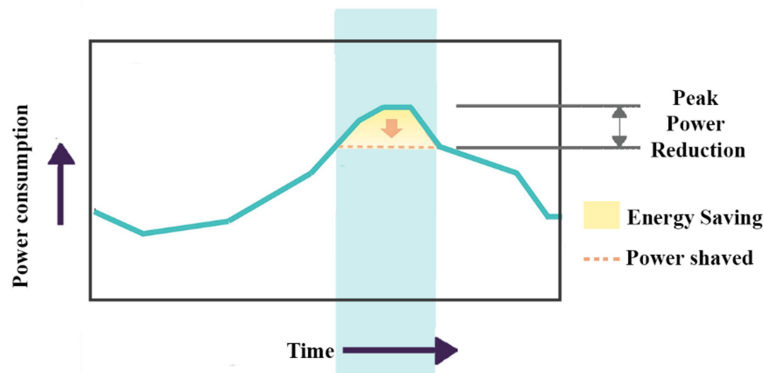


Figura 9 Esquema del concepto de reducción de picos durante un evento de respuesta a la demanda, extraído de la publicación [2]

Los programas de DR se clasifican según distintos criterios, dependiendo de la bibliografía:

- Según la parte que inicia la acción de reducir el pico, Siano [18] diferenció dentro de esta primera agrupación: los programas basados en tarifas (el precio de la electricidad varía con el tiempo, pero el consumo queda a discreción de los usuarios); los programas de DR basados en eventos (que otorgan al administrador del programa, por ejemplo la empresa eléctrica, cierto nivel de control) y las ofertas de reducción de la demanda (los clientes envían ofertas a la empresa eléctrica).
- Palensky et al. [45] propusieron una clasificación en DR de mercado (precios en tiempo real, incentivos) y DR física (gestión de la red, emergencias).
- Aalami et al. [46] propusieron una distinción entre programas voluntarios (los clientes pueden rechazarlos o interrumpirlos sin penalizaciones) y programas obligatorios (los clientes están sujetos a penalizaciones si no reducen cuando se les indica).
- Otra clasificación diferencia las estrategias de DR en función de su objetivo, es decir: reducción, caracterizada por una capacidad continua de ajuste de la carga; restricción, caracterizada por una disponibilidad discreta; desplazamiento de la carga, caracterizada por una transferencia del consumo a otro momento.
- Según la necesidad de la red, se distinguen tres categorías: respuesta de la demanda económica (cuando el valor de la electricidad es inferior al coste de producción), respuesta de la demanda de emergencia (suministro insuficiente para satisfacer la demanda), respuesta de la demanda de servicios auxiliares (para mantener en tiempo real la estabilidad de la red). Además, Patnam and Pindoriya [47] propusieron una distinción entre los dos primeros grupos (DR económica y DR de emergencia), sosteniendo que el tercer grupo puede considerarse de emergencia: 'En caso de

emergencia (deficiencia de generación o fallos), la DR puede utilizarse como servicio auxiliar para garantizar la seguridad y la estabilidad'. Basándose en la función, Wang et al. [48] dividieron los programas cuyo objetivo es la fiabilidad de la red y los programas cuyo objetivo es la economía de la red.

Más allá de las clasificaciones, el cuadro 2 resume los principales programas de DR y ofrece una breve descripción de cada uno de ellos [49][50][51]. La tabla 2 es una contribución original e inédita, destinada a presentar un estado completo de los programas de DR para esta tesis; por lo tanto, no se ha publicado en otros trabajos.

Algunos programas, como las tarifas TOU, se utilizan desde hace décadas, pero la apertura de los mercados eléctricos y el despliegue de tecnologías inteligentes abren ahora el camino a nuevas oportunidades. El Control Directo de la Carga (DLC, del inglés Direct Load Control) es probablemente el ejemplo más interesante de nuevas oportunidades, sobre todo en este momento histórico caracterizado por la crisis energética y el aumento sin precedentes de los costes de la energía. En el DLC, el consumidor cede cierto nivel de control sobre sus electrodomésticos a la compañía eléctrica, lo que significa que permite a la tercera parte encender y apagar los electrodomésticos o cambiar la temperatura de consigna de la calefacción, ventilación y aire acondicionado durante el llamado Evento de Respuesta a la Demanda (DRE), es decir, en un marco temporal específico (por ejemplo, una hora), cuando la electricidad tiene el mejor precio o cuando el proveedor necesita ajustar la demanda. Como programa basado en incentivos, los usuarios finales reciben un incentivo monetario por suscribirse. La gestión de los incentivos, así como la promoción de los programas, son objeto de varios estudios [52][53].

La aceptación de estas estrategias por parte de los ciudadanos dista mucho de ser trivial. Muchos estudios se centran en los beneficios en términos de gestión energética, pero un punto de vista centrado en el usuario es, también en este caso, menos común. Incluso cuando se incluye a los usuarios en los estudios, se profundiza en las respuestas técnicas y económicas, mientras que se dejan de lado los aspectos psicológicos de la aceptación [54].

El papel y el compromiso de los consumidores pueden dividirse en tres categorías [55]:

- Participación: decisión de inscribirse en un programa de DR
- Respuesta: nivel de respuesta entre los abonados
- Persistencia: mantenimiento del compromiso (seguir inscrito y responder)

Dada la novedad del tema, el análisis de la persistencia se deja necesariamente para futuros trabajos. En su lugar, este trabajo analiza en profundidad la participación [3] y la respuesta

[2] de los consumidores. Las subsecciones III.2 y III.3 resumen las metodologías utilizadas para estudiar ambas categorías, mientras que los resultados pueden encontrarse en las publicaciones correspondientes.

Tabla 4 - Principales características de los programas de respuesta a la demanda - \*Operadores de Sistemas Independientes/Organizaciones Regionales de Transmisión (ISO/RTO) - Contenido original

Programa de DR	Descripción	Tipología	Mercado implicado	Tiempos	Discrecionalidad de la reducción	Función
(DLC) Control directo de la carga	Los clientes reciben incentivos por permitir a la empresa controlar el funcionamiento de algunos equipos.	Basado en eventos (eventos iniciados por la compañía eléctrica o el operador del sistema)	Minorista	Puede durar varias horas. Aviso con un día de antelación o a corto plazo.	Directo (interrupción a discreción del usuario)	Economía de red
(A/S) Servicio auxiliar	A cambio de pagos del operador de la red, los usuarios aceptan reducir la carga en una situación de contingencia.	Basado en eventos (previa licitación a los proveedores del mercado mayorista*)	Mayorista	Puede durar de 10 a 30 minutos. Con muy poca antelación (minutos) o sin antelación.	Obligatorio	Estabilidad de la red
(EDRP) DR de emergencia	Los clientes reciben incentivos para reducir su consumo en situaciones de emergencia (por ejemplo, condiciones meteorológicas adversas).	Basado en eventos (eventos iniciados por los proveedores del mercado mayorista*)	Mayorista	Con poca antelación (normalmente un día antes o con dos horas de antelación)	Voluntario	Economía de red
(CAP) Mercado de capacidad	A cambio de pagos garantizados, los participantes se comprometen a reducir la carga cuando surjan contingencias.	Basado en eventos (eventos iniciados por la empresa de servicios públicos o la entidad proveedora de carga*)	Mayorista	Reducción mínima de cuatro horas, notificación de dos horas	Obligatorio (se aplican sanciones si no se reducen las cargas)	Economía de red
(I/C) Interrumpible/Cortable	A cambio de una tarifa con descuento, los mayores clientes se comprometen a reducir sus cargas cuando se les solicite debido a contingencias del sistema.	Basado en eventos (eventos iniciados por la empresa de servicios públicos o la entidad proveedora de carga)	Minorista	Los clientes deben interrumpir el suministro entre 30 y 60 minutos después de recibir la notificación.	Obligatorio (se aplican sanciones si no se reducen las cargas)	Economía de red
(DB) Licitación por demanda	Cuando los precios son altos, los grandes clientes pueden ofertar reducciones de carga.	Basado en eventos (tras la licitación a la empresa de servicios públicos)	Mayorista	Día anterior, duración en función de la oferta	Obligatorio, una vez aceptada la oferta voluntaria	Economía de red
(TOU) Tiempo de uso	Las tarifas fijas cambian durante el día en función del consumo de energía.	Basado en precios	Minorista	Designado en la tarifa (no es necesario ningún otro aviso)	Voluntario	Economía de red
(CPP) Precios de los picos críticos	En condiciones críticas, el precio de la electricidad aumenta considerablemente.	Basado en precios	Minorista	Con poca antelación (normalmente el mismo día o con un día de antelación)	Voluntario	Economía de red
(RTP) Precios en tiempo real	Los precios varían en intervalos de tiempo cortos (por ejemplo, cada hora) en función de los costes de suministro en tiempo real.	Basado en precios	Minorista	Con poca antelación (normalmente el mismo día o con un día de antelación)	Voluntario	Economía de red

### **III.2 La aceptación de los usuarios finales a las estrategias de flexibilidad energética**

Del estudio de la bibliografía se desprende que la participación de los usuarios en las estrategias de flexibilidad energética depende de varios factores, ya que los distintos tipos de clientes tendrán diferentes motivaciones para implicarse (o no) en las estrategias de flexibilidad energética. En consecuencia, los resultados de los distintos estudios de casos son disímiles o incluso opuestos. Cabe señalar que la percepción (previa a la aceptación) de las estrategias de flexibilidad energética está muy vinculada a las modificaciones del confort de los usuarios, cuando la demanda se modifica cambiando el funcionamiento de los sistemas de acondicionamiento. Esta fue, por tanto, una faceta clave de la investigación presentada en esta tesis. Aunque ésta fue una faceta clave de la investigación presentada en esta tesis, aprovechamos esta oportunidad para ir más allá de la aceptación del DR por acondicionamiento, y explorar otros aspectos del tema.

Hay muchos parámetros detrás de la aceptación de las estrategias de flexibilidad energética, y la voluntad de inscribirse en un programa de DR es sólo uno de ellos. Era necesario un estudio exhaustivo que tuviera en cuenta todos los aspectos de esta compleja disciplina. Por poner un ejemplo, muchas encuestas explican directamente qué es un programa de DR, pero no tienen en cuenta que hay un paso previo crucial: el programa de DR más impactante requiere domótica para funcionar. ¿Qué pasa con la aceptación de las tecnologías inteligentes? ¿Son conscientes los encuestados de todos los cambios que implicaría inscribirse en un programa de DR? Otro punto que considero importante del estudio de la literatura se refiere a las expectativas de ahorro erróneas y exageradas de los consumidores [56].

Teniendo en cuenta estas carencias en la forma de proponer el tema a los consumidores, consideré que era necesario diseñar un cuestionario que incluyera los diversos factores que afectan a la aceptación, repleto de explicaciones en un lenguaje amigable y con ejemplos fáciles de entender que pudieran ayudar al consumidor a corregir sus expectativas y a aumentar su alfabetización energética (concepto que se ha visto que es crucial para que las medidas de ahorro energético sean efectivas [57]). Analizando la literatura existente, se puso de manifiesto que los principales trabajos afrontaban la evaluación de la aceptación de los usuarios centrándose en diferentes aspectos, es decir, la concienciación [7], la flexibilidad del patrón de uso de la energía [58], la disposición hacia las tecnologías IoT [30] y, por supuesto, la actitud hacia los programas de DR y los incentivos correspondientes [20]. A pesar del

incuestionable valor de todas estas contribuciones, no han considerado la aceptación de forma holística, como un todo. Por ello, la inclusión de todas estas facetas en un mismo trabajo suponía un avance en el estado del arte, ya que faltaba un enfoque integral. Para cubrir esta laguna, el cuestionario se diseñó considerando cada uno de los aspectos mencionados como un subobjetivo. Los subobjetivos que componen el trabajo se esquematizan en la Figura 4.

<b>List of sub-objectives</b>	
Evaluation of the consumers' awareness of the topic	
Evaluation of the consumers' attitude toward changing their schedules	
Evaluation of the consumers' attitude toward the use of IoT technologies in their homes	
Evaluation of the consumers' attitude towards DR programs	
Evaluation of the appropriate incentives to subscribe to a DR program	

*Figura 10 - Lista de subobjetivos del cuestionario extraída de la publicación [3].*

Este contacto directo con los consumidores resultó en el conocimiento de los factores que facilitan y obstaculizan la decisión de participar o no en un programa de flexibilidad energética. En particular, a través de pruebas de significación estadísticas, fue posible captar qué aspectos concretos de la demografía y los antecedentes de los consumidores pueden influir en la decisión. Este último punto es un factor clave para el futuro diseño de las estrategias. Como ya se ha mencionado, la flexibilidad energética debe aplicarse a nivel de distrito, algo indispensable para lograr cambios notables en el uso de la energía. Normalmente, esta división en distritos es una cuestión de evitar solapamientos: si todo el mundo desplaza su uso de la energía a la misma franja horaria, el resultado será simplemente el desplazamiento del pico de energía a otro momento del día. Con las estrategias de distrito, cada grupo de personas se desplazará a horas diferentes, para obtener una homogeneización de la curva de consumo. Sin embargo, a menudo se pretende que la estrategia energética sea la misma, sólo que aplicada a diferentes franjas horarias. Con los resultados del cuestionario propuesto en esta tesis, sugiero diseñar estrategias ad hoc para cada distrito, donde un distrito es un grupo de personas con características específicas en común, como la situación residencial y la tenencia de la vivienda. En mi opinión, un cambio en este sentido podría mejorar tanto la participación como la persistencia.

### III.3 Comportamiento energético no eficiente dentro de las estrategias de flexibilidad energética

Conseguir que los consumidores participen en estrategias de flexibilidad energética es sólo un primer paso, de crucial importancia. La respuesta una vez inscritos es un tema totalmente distinto. La metodología para este caso consiste en el análisis de datos recogidos de usuarios reales inscritos en programas de DLC en Norteamérica, donde estas estrategias ya son una realidad. El medio para aplicar el DLC es el termostato inteligente, cuya temperatura de consigna es controlada por el proveedor durante el tiempo del Evento DR (DRE). Los datos son recogidos directamente por el fabricante del termostato inteligente y compartidos con los investigadores tras recibir el permiso de los usuarios y anonimizar los datos.

En la literatura, hay dos cuestiones principales relacionadas con el comportamiento de los participantes que experimentan un DRE. Como se menciona en la Tabla 2, el DLC y otros programas son interrumpibles, lo que significa que los usuarios pueden detenerlo si lo desean (por ejemplo, si se sienten incómodos durante la DRE), un hecho conocido en la literatura como interrupción (*override*) [59][60]. La interrupción provoca una reducción de potencia omitida, ya que la duración del evento es inferior a la prevista. El otro fenómeno relacionado con la respuesta es el llamado efecto rebote [61][62], que es un nuevo pico de consumo, tras el fin de la DRE, provocado por el intento de los usuarios de restablecer su confort térmico. El consumo de energía debido al rebote no mina la eficacia del desplazamiento del consumo, pero puede aumentar drásticamente el consumo global del día. Lo que la literatura no describe es que algunos abonados tienen una especie de respuesta anticipativa a la DRE, cambiando su horario normal o patrón de uso en el periodo que precede a la DRE. Es probable que esto ocurra debido a la notificación anticipada que reciben los consumidores cuando se produce un DRE (Tabla 2). Este es un hallazgo completamente nuevo para el conocimiento de los autores, y fue descubierto en los datos utilizados para esta investigación. Este descubrimiento nos permitió trazar un mapa de las posibles respuestas de los usuarios ante una DRE, como se muestra en la Figura 5.

Se ha dado un paso adelante para profundizar en el estudio del efecto rebote, que representaba una laguna en la bibliografía. A través del clustering se han detectado y separado comportamientos similares en cuanto a la gestión del termostato. Para cada cluster, la cuantificación del consumo energético se realiza mediante simulaciones con EnergyPlus. De esta forma, conseguimos obtener las consecuencias del comportamiento no eficiente de

algunos grupos de usuarios, relacionadas con varios parámetros como la consigna elegida tras el evento y el número de interacciones con el termostato.

Al igual que en el caso de la participación, los clusters pueden utilizarse como una herramienta útil para diseñar estrategias de DR optimizadas. En este caso, los ‘errores’ comunes detectados como respuesta a un evento nos llevaron a sugerir la creación de distintos eventos con características diferentes, según la tolerancia del cluster, o incluso distintas formas de comunicarse con las personas de un mismo cluster, para mostrarles qué comportamientos son controvertidos desde el punto de vista de la gestión energética.

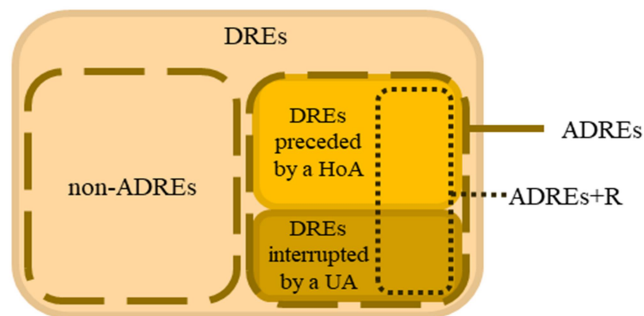


Figura 11 - Respuestas entre los usuarios inscritos en un programa DLC. non-ADREs = eventos que se desarrollaron según lo previsto por el proveedor; ADREs = eventos ajustados por el usuario; DREs precedidas por una HoA = Hold Action, es decir, cambio de horario operado por el usuario como respuesta anticipativa; DREs interrumpidas por una UA = interrupción del usuario durante el evento; ADREs+R = rebote después del evento. Extraída de la publicación [2]

### III.4 Datos reales utilizados en esta tesis

Esta tesis tiene un marcado enfoque centrado en las personas. Uno de los principales objetivos de la investigación era tener en cuenta las opiniones y preferencias de los usuarios. La elección de los conjuntos de datos utilizados para la investigación también siguió estos principios. En particular, era primordial trabajar con datos del mundo real, es decir, datos reales que reflejaran directamente el comportamiento de los usuarios.

Como se ha explicado en los apartados III.2 y III.3 anteriores, el objetivo de la investigación era estudiar la aceptación de las estrategias de flexibilidad energética por parte de los usuarios, tanto para las personas inscritas en un programa como para las que no lo están. En el primer caso, la aceptación puede verse como la voluntad de aceptar el cambio en el patrón de consumo propio para responder a las necesidades de la red y del medio ambiente. En el segundo caso, la aceptación representa el cambio real que los usuarios consiguen a través de sus acciones y comportamientos. Por consiguiente, los datos necesarios en estos dos casos tenían que ser bastante diferentes.



El conjunto de datos utilizado para evaluar la aceptación de los usuarios (aún) no inscritos en un programa de DR se creó desde cero. Se encuestó a los voluntarios mediante un cuestionario diseñado específicamente que abordaba temas como el cambio de hábitos, las tecnologías inteligentes, los programas de DR, etc. La necesidad de crear un nuevo conjunto de datos se explica en la revisión bibliográfica del tercer artículo de esta tesis [3]: los trabajos anteriores abordaban aspectos individuales de la aceptación, pero no presentaban una visión holística del tema que tuviera en cuenta la relación entre las distintas facetas. El resultado de la encuesta fue la creación de un marco de datos de 50 filas y 113 columnas, que se utilizó para realizar varias pruebas y análisis con el fin de comprender qué influye realmente en los puntos de vista de los entrevistados.

A diferencia, el conjunto de datos para describir la adherencia de las personas que ya se inscribieron en un programa no pudo recopilarse mediante opiniones directas. De hecho, la investigación en este caso se centró en determinar si el comportamiento de los usuarios afecta al éxito de la estrategia y cómo lo hace. Por lo tanto, se necesitaban datos más objetivos. Se decidió analizar los datos recogidos directamente a través de los termostatos inteligentes instalados en los hogares de los participantes. La campaña encargada de recoger los datos se llama Dona Tus Datos (DYD, del inglés Donate Your Data), y los participantes en la campaña permitieron el uso de sus datos con fines de investigación, tras un necesario proceso de anonimización. Los datos seleccionados para la investigación contenían 13145 conjuntos de datos de hogares canadienses y estadounidenses, entre los cuales 1398 familias se inscribieron para participar en un programa de DYD. De este modo, fue posible cuantificar el efecto real del comportamiento de las personas en el éxito de la estrategia.

## IV. Otras publicaciones relacionadas

Las publicaciones que componen el núcleo de este doctorado se centran estrictamente en el papel de los usuarios, pero el recorrido académico de la tesis abarcó varias ramas de la materia energética. En esta sección se presentan, por orden cronológico, otros trabajos relacionados.

En el texto se incluyen referencias directas a los objetivos enumerados en la Sección II, con el fin de facilitar la comprensión de cómo estos otros trabajos están relacionados con la tesis y, en particular, en qué aspecto tratábamos de profundizar a través de las diferentes investigaciones transversales presentadas en esta sección.

- Ramallo-González, A.P., Loonen, R., Tomat, V., Zamora, M.A., Surugin, D., Hensen, J., 2020. **Nomograms for de-complexing the dimensioning of off-grid PV systems**, *Renewable Energy* 161, 2020, 162-172. [4]

En relación con la necesidad de dotar de autonomía energética a los edificios para aliviar la red (Objetivo O7), creamos gráficos de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos. Con esta contribución, pretendíamos simplificar el trabajo de profesionales y técnicos, con el fin de ayudar a difundir el uso de estos sistemas, que demostraron ser un gran aliado para el desplazamiento de carga en edificios de energía positiva y edificios de energía cero [63][64]. Diseñamos un método basado en la normalización de los principales parámetros necesarios para dimensionar un sistema fotovoltaico, es decir, la potencia nominal y la capacidad de los sistemas de baterías. Para facilitar el cálculo, también creamos un kit de herramientas gráficas para calcular los parámetros normalizados. La simulación, realizada en Octave, tuvo en cuenta cuatro perfiles eléctricos diferentes, así como factores importantes como la eficiencia de los paneles, el rendimiento de la carga y descarga, el rendimiento de las baterías, los datos meteorológicos, las pérdidas de producción, etc. El resultado final es una nomografía, relacionada con una ubicación específica, que permite resolver el problema de dimensionamiento de un vistazo. Las nomografías se validaron mediante dos métodos diferentes. Por último, propusimos una prueba de usabilidad, es decir, un cuestionario para estimar si los encuestados entendían el método y si estarían dispuestos a incluirlo en su trabajo. El 93% de los encuestados consiguió utilizar el gráfico correctamente, lo que indica la gran facilidad de uso de la herramienta creada.

Teniendo en cuenta mi experiencia y los conocimientos que obtuve durante mi tesis doctoral, pude aportar a este trabajo la visión de cómo los diferentes comportamientos de los ocupantes representan diferentes demandas de electricidad. Esto fue muy influyente para este trabajo. También contribuí con una encuesta sobre la aceptación de la gente a herramientas de dimensionamiento sencillas como las que se muestran en este artículo. También pude aprender más sobre las modificaciones que la generación in situ puede tener en las demandas de electricidad de las viviendas, lo que fue clave para comprender plenamente el campo de mi tesis.

- Ramallo-González, A.P., Tomat, V., Fernández-Ruiz, P.J., Zamora-Izquierdo, M.A., Skarmeta-Gómez, A.F, 2020. **Conceptualisation of an IoT Framework for Multi-Person Interaction with Conditioning Systems**, *Energies* 2020, 13, 3094. [5]

En los espacios de coworking acondicionados, es muy difícil lograr el confort térmico para todos los ocupantes, debido al control limitado que cada persona tiene (o percibe tener) sobre el termostato y a las diferencias de percepción térmica que experimentan los individuos. Además, la mayoría de las personas no entienden del todo la cuestión energética, por lo que a menudo se trata de comunicarse con los usuarios de forma comprensible [65]. Para resolver estos problemas, este trabajo propone un marco IoT que conecta a los usuarios y el sistema HVAC. A través de una aplicación móvil, cada ocupante puede votar sus preferencias térmicas, y el algoritmo controlará la temperatura de consigna del termostato como la distancia mínima entre todas las preferencias expresadas. Además, los terminales del HVAC para el caso de estudio estaban equipados con un código QR legible con la aplicación, que ayuda a los usuarios a entender su funcionamiento a través de la Realidad Aumentada. Con esta publicación, pretendemos apoyar la democratización del termostato en los lugares de trabajo y el paradigma del crowdsensing, de acuerdo con los Objetivos O2, O3 y O6 de esta tesis. Este trabajo es la materialización (implementación) de los hallazgos del artículo presentado como primero en esta tesis. Como el desarrollo de las ICT va más allá de mi tesis no era relevante hacer el desarrollo como parte de mi trabajo principal, pero este artículo demuestra que mi trabajo en la definición y conceptualización del crowdsensing fueron suficientes para hacerlo realidad, como una prueba de concepto.

- Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta-Gómez, A., 2021. **A practical approach for modelling PV off-grid systems in EnergyPlus using post-processing of data to identify black out days**, *Proceedings of the 17th IBPSA Conference*, Bruges, Belgium, Sept. 1-3, 2021 [6]

Uno de los problemas a los que intentamos dar respuesta a través de nuestra línea de investigación es aliviar la red eléctrica (Objetivo O7), teniendo en cuenta el aumento de la demanda de energía que estamos experimentando. La agregación de un sistema de almacenamiento se propone como solución a esta cuestión, y empieza a considerarse una alternativa fiable a los clásicos sistemas de energías renovables conectados a la red [66]. La batería de respaldo puede ser un aliado perfecto para un uso flexible de la electricidad, en el sistema fotovoltaico híbrido conectado, o puede permitir una separación total de la red, permitiendo a las personas ser energéticamente autosuficientes. Esta última tipología es también socialmente sostenible, ya que es una solución también a la pobreza energética, en particular en zonas remotas donde no hay fácil acceso a la red [67][68]. La difusión de estos sistemas se ve incrementada por las complicaciones en el dimensionamiento: la dificultad adicional debida a la inserción de la batería implica que la mayoría de los programas de software no proporcionen herramientas específicas para el cálculo. En este trabajo, proponemos un enfoque práctico para modelar sistemas fotovoltaicos aislados de la red, utilizando un software ampliamente conocido, para hacer nuestra contribución a la difusión de los sistemas aislados de la red. Este artículo es la ampliación de un trabajo que desarrollé y presenté en la 17ª Conferencia IBPSA. Mi experiencia en simulación energética me permitió conceptualizar el novedoso método propuesto en este trabajo. El trabajo ha sido una buena oportunidad para profundizar en mi conocimiento de los sistemas de energías renovables y probar diferentes herramientas y software para realizar la simulación.

- Ramallo-González, A.P., Bardaki, C., Kotsopoulos, D., Tomat, V., González Vidal, A., Fernández Ruiz, P.J., Skarmeta Gómez, A., 2022. **Reducing Energy Consumption in the Workplace via IoT-Allowed Behavioural Change Interventions**, *Buildings* 2022, 12, 708. [7]

Este trabajo tuvo como objetivo aumentar los conocimientos energéticos de los ocupantes de un lugar de trabajo mediante intervenciones sobre su comportamiento e invitarles a reducir su consumo de energía utilizando tecnologías IoT. En dos

edificios piloto se integró una plataforma IoT plenamente operativa [69][70] que creaba recomendaciones y consejos personalizados para los usuarios a partir de los datos recogidos por la red de sensores. Para ello, el enfoque consistió en analizar cómo percibían los usuarios sus acciones de ahorro energético. Así, la percepción de los ocupantes (recogida mediante una encuesta) se comparó con los datos energéticos reales (recogidos a través de los sensores). La ‘mala conducta’ energética de las personas se puso de relieve a través de varios desencadenantes, y el compromiso de los participantes se evaluó a través de una aplicación para móviles inteligentes que contenía varias actividades educativas, como cuestionarios, pruebas, consejos, etc. El consumo de energía durante las campañas se comparó con el consumo previsto según los resultados del periodo de seguimiento que precedió al experimento. Los resultados en términos de ahorro fueron considerables, alcanzando una media del 20% en la campaña de invierno. Los resultados están en línea con lo encontrado en la literatura [71][72] relativa a experimentos de comportamiento, reforzando la idea de que la alfabetización energética es la clave para perseguir un ahorro de energía duradero. El trabajo cubre los objetivos O2, O3 y O6 de esta tesis. Este trabajo me brindó una muy buena oportunidad para contribuir y aplicar mis conocimientos sobre el tema, ya que las intervenciones para el cambio de comportamiento han sido el núcleo principal de mi tesis de máster y de mi experiencia predoctoral [1]. Los resultados del ensayo me permitieron detectar las diferencias entre las posibles mejoras simuladas y las experimentales.

- Ramallo-González, A.P., Alcañiz-Cascales, T., Tomat, V., Fernández Guillamón, A., Molina, A., Skarmeta-Gómez, A.F, 2022. **A novel method for eliminating the exponential growth of computing optimal demand response events for large-scale appliances re-scheduling**, *Sustainable Energy, Grids and Networks* 32 (2022) 100907. [8] Este trabajo proporciona una metodología para la optimización de estrategias de cambio de carga a nivel de distrito. En la literatura, el problema de la optimización se explora a nivel de edificio [73][74], pero era necesario dar un paso más para conseguir un efecto en la descarga de la red. El problema de optimización multiobjetivo pretendía: minimizar la potencia pico, el coste global de la electricidad y la distorsión, es decir, cuánto molestan las operaciones a los usuarios. Esta última se calculó teniendo en cuenta el comportamiento de los usuarios dentro de las estrategias de flexibilidad energética, con el fin de estudiar el impacto real sobre los

ocupantes. Teniendo en cuenta la complejidad de estos parámetros, es fácil comprender que la solución requiere un gran tiempo de cálculo. Para superar este problema, investigamos un tamaño de grupo ideal que pueda considerarse como una comunidad energética, desde el punto de vista del agregador. Como resultado, se vio que un grupo óptimo de 32 hogares permitía reducir de forma importante (hasta un 80%) los tiempos computacionales para estrategias de DR a gran escala, abriendo el camino hacia aplicaciones a gran escala y en distritos. Una conclusión importante de este trabajo es que los tres objetivos relevantes están relacionados entre sí y no entran en conflicto. Esta publicación está en línea con los objetivos O3, O7 y O8 de la tesis. En este trabajo, la implementación matemática que subyace al nuevo método propuesto se ha basado íntegramente en mi aportación al marco teórico. El análisis del DR que realicé al escribir el segundo artículo de esta tesis [2] fue el punto de partida para entender cómo plantear los objetivos del problema de optimización.

## **IV.1 PHOENIX**

PHOENIX es un proyecto incluido en el marco H2020, que ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 893079.

El objetivo del proyecto es mejorar la inteligencia de los edificios existentes a través de nuevas tecnologías IoT, por lo que se propone y valida una cartera de soluciones ICT a través de diferentes edificios piloto en toda Europa. El objetivo es transformar el papel del edificio: que deje de ser un consumidor pasivo para convertirse en un agente activo capaz de optimizar su gestión energética. Las mejoras propuestas se traducen en nuevos servicios centrados en el usuario para los ocupantes del edificio, incluyendo también actividades de sensibilización para preparar a los ciudadanos para los edificios inteligentes.

El edificio de demostración que se utiliza dentro del proyecto como Prueba de Concepto fue el edificio piloto de la UMU. El edificio se llama Pleiades y está situado en el Campus de Espinardo. A través del piloto, nuestro grupo de investigación tuvo la oportunidad de experimentar con estrategias de ahorro energético y flexibilidad y de estudiar directamente la tasa de aceptación de los ocupantes.

Para mi línea de investigación, ha sido una experiencia enriquecedora ya que la visión del proyecto encajaba perfectamente con la de este trabajo de tesis. Tuve la oportunidad de centrarme en los objetivos O4, O5 y O6 de esta tesis, es decir, el análisis de la aceptación, comportamiento y confort térmico de los usuarios durante las estrategias de flexibilidad energética. El trabajo en el edificio piloto puede considerarse un increíble valor añadido a la investigación presentada en esta tesis, por dos razones principales. En primer lugar, tuve la oportunidad de pasar de un nivel teórico (el análisis de la literatura y el análisis de datos) a un nivel totalmente práctico, teniendo la oportunidad de experimentar lo que es diseñar las estrategias y plantear mis propias preguntas a los ocupantes, teniendo un feedback directo de ellos. En segundo lugar, en gran parte de mi investigación me he centrado en el contexto residencial [2][3], por lo que creo que explorar un contexto diferente, el lugar de trabajo, era realmente necesario para alcanzar una visión completa de la cuestión.

Publicaciones desarrolladas en el marco de PHOENIX:

- Ntafalias, A., Tsakanikas, S., Skarvelis-Kazakos, S., Papadopoulos, P., Skarmeta-Gómez, A.F., González-Vidal, A., Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Marin-Perez, R., Vlachou, M.C., 2022. **Design and implementation of an interoperable architecture for integrating building legacy systems into scalable energy management systems**, *Smart Cities* 2022, 5, 1421-1440 [9]

Este trabajo recogió la metodología y los resultados de los ensayos realizados en varios edificios piloto. Por brevedad, el párrafo se centrará en los ensayos especialmente relacionados con esta tesis. Dentro del proyecto, tuvimos la oportunidad de realizar DREs en un contexto laboral, a través del control remoto de los sistemas de climatización. Las pruebas tenían tres objetivos diferentes, según el ensayo: (1) ahorro de energía, (2) cambio de energía en función de la tarifa, (3) cambio de energía en función de la producción renovable. Los ocupantes participaron mediante cuestionarios directos, una forma de comprobar que su confort térmico se mantenía durante el experimento y de estudiar su aceptación de la estrategia (cómo afectaba a la productividad, cómo se sentían durante la fase de preenfriamiento, etc.). Por lo expuesto, este trabajo cumplió con los objetivos O4, O5, O6 y O7 de esta tesis.

- Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta-Gómez, A., 2023. **Evaluation of cost-effectiveness and energy flexibility potential of different interventions through**

**the SRI score - Evaluation under the IoT paradigm.** In *Cyber-Physical System Solutions for Smart Cities*, IGI Global [10]

Uno de los ámbitos del proyecto era apoyar la novedosa iniciativa de la Comisión Europea: el Smart Readiness Indicator (SRI) [75]. El SRI se introdujo en la última revisión de la EBPD [76] para medir el nivel de ‘inteligencia’ de los edificios. La evaluación se basa en tres funcionalidades clave, es decir, la optimización de la eficiencia energética y del rendimiento global en uso, la adaptación del funcionamiento a las necesidades de los ocupantes y la adaptación a las señales de la red. Se trata de un gran paso adelante en la definición de un marco de flexibilidad energética: hasta ahora, la flexibilidad energética sólo podía medirse a través de algunas mediciones relacionadas con ella, mientras que a través del SRI será posible por primera vez *cuantificar* la flexibilidad energética [77].

El trabajo ofrece información sobre los fundamentos del método, basado en una lista de servicios inteligentes relacionados con una puntuación por dominio y por factores de impacto. Para los ocho edificios piloto del proyecto, la evaluación se realiza tanto antes como después de las intervenciones desarrolladas en el marco del proyecto. También se consideran muchos aspectos transversales, como la inversión necesaria para aumentar la puntuación en cada caso y la usabilidad de la herramienta SRI, evaluada mediante un cuestionario directo a los evaluadores. Por último, se ha dedicado un apartado del trabajo a la relación entre las estrategias SRI y DR, con especial atención a los dispositivos necesarios para realizar DLC. Los objetivos comunes a la tesis fueron O1, O3 y O8.

- Ye, Y., Ramallo-González, A.P., Tomat, V., Sánchez-Valverde, J., Skarmeta-Gómez, A., 2023. **Smart-Watcher© a solution to automatically assess the smartness of buildings**, *Computers* 2023, 12 (4) 76 [11]

Con este trabajo, continuamos nuestro estudio sobre el potencial de la SRI. Uno de los principales problemas señalados en la literatura es la falta de objetividad del método. De hecho, el evaluador tiene que asignar un nivel de funcionalidad a cada servicio inteligente, y los resultados finales pueden variar en función de su decisión subjetiva [78]. Esto es algo que experimentamos directamente, ya que en el proyecto contábamos con cinco evaluadores diferentes y fue necesario un esfuerzo adicional para trabajar de forma sinérgica con el fin de obtener resultados comparables. Además, preveíamos la necesidad de una inmensa plantilla de profesionales para



realizar el gran número de certificados SRI del parque de edificios existente. Como solución a ambas cuestiones, se propuso en este trabajo un motor capaz de automatizar la evaluación del SRI mediante el uso del Lenguaje de Procesamiento Neuronal (NPL, del inglés Neuronal Processing Language) [79]. Teniendo en cuenta que uno de los principales objetivos de la introducción del nuevo indicador es permitir que los edificios respondan a la necesidad de la red, este trabajo está en línea con el objetivo O7 de esta tesis.

- SB4EU – White papers. Interoperability. SmartBuilt4EU White Paper – Task Force 2: Efficient Building Operation [12] and Optimised building costs. SmartBuilt4EU White Paper – Task Force 2: Efficient Building Operation [13].

SB4EU es un proyecto de H2020 que apoya la difusión de un ecosistema de edificios inteligentes en Europa. En concreto, han organizado varios grupos de trabajo destinados a crear informes, en forma de libros blancos (más comúnmente llamados white papers), que recojan la opinión de varios expertos sobre el tema tratado. Como parte del consorcio de PHOENIX, se nos invitó a contribuir al grupo de trabajo titulado ‘Funcionamiento eficiente de los edificios’, lo que constituyó una excelente ocasión para difundir nuestros resultados al tiempo que enriquecíamos nuestros conocimientos con las lecciones aprendidas por los demás expertos. En este sentido, la participación en las actividades y los talleres organizados en el marco de los proyectos y la redacción final de los libros blancos contribuyeron en gran medida a la definición del marco de esta tesis, por lo tanto en el Objetivo O1 de mi línea de investigación.

Uno de los temas del grupo de trabajo fue la interoperabilidad, un concepto novedoso que ha captado recientemente la atención de la comunidad científica. Se refiere a la concepción de sistemas complejos que combinan la arquitectura IoT con las características de los edificios. La interoperabilidad entre los componentes y sistemas de los edificios afecta a varios campos: gestión de la energía, confort, dispositivos inteligentes, seguridad, control y conectividad. Desde el punto de vista de la flexibilidad energética, la interoperabilidad es esencial: la eficiencia de las estrategias se maximiza mediante la racionalización de las operaciones del edificio (evitando la duplicación de esfuerzos, controlando los sistemas técnicos, etc.) y también permite la interacción del sistema técnico del edificio y la red.

El otro tema tratado fue el coste optimizado del edificio, es decir, cómo obtener la integración óptima de soluciones inteligentes para aumentar la eficiencia de la gestión energética en los edificios. El objetivo final del trabajo es lograr una forma más sostenible de vivir en el entorno construido, pero la inversión para alcanzar este alcance tiene largos periodos de amortización. Evaluando el ciclo de vida, se proponen enfoques de optimización, en particular en relación con la digitalización y el IoT. Es importante destacar una vez más que una de las principales barreras detectadas en este trabajo es la falta de implicación de los usuarios, lo que limita el potencial de optimización.

## V. Conclusiones y trabajos futuros

Considerando la transición energética y tecnológica que caracteriza este periodo histórico, la tesis enmarca los principales retos a los que se nos pide que nos enfrentemos en un futuro próximo, proporcionando los medios teóricos para mejorar el diseño de estrategias de flexibilidad energética y ahorro de energía. Las contribuciones de esta tesis en los campos estudiados se esquematizan en la Figura 6.

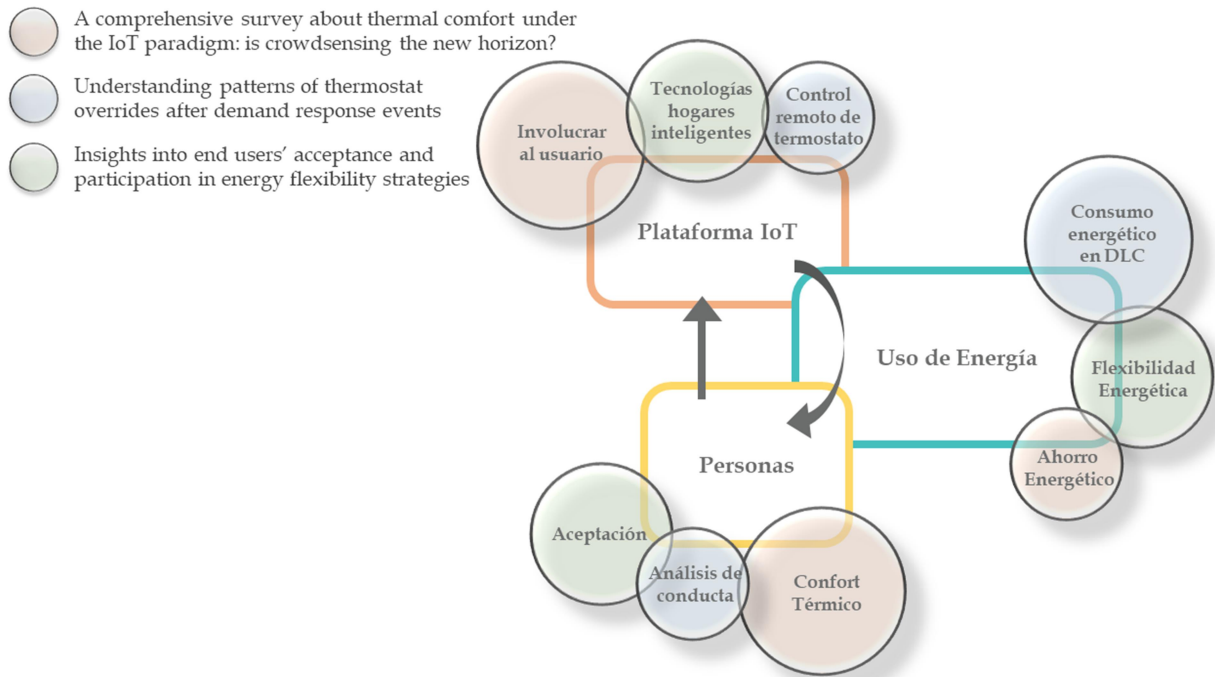


Figura 12 – Contribución de los tres artículos de impacto de esta tesis en los campos estudiados, con las especificaciones de qué aspecto de cada artículo está relacionado con el tema principal.

Teniendo en cuenta los objetivos de esta tesis, a continuación se enumeran las conclusiones que representan las principales lecciones aprendidas de la investigación que sustenta los trabajos presentados anteriormente:

- Las estrategias de todo tipo que afectan a la vida de las personas deben basarse en sus opiniones y preferencias. De la bibliografía se desprende que los ocupantes han sido considerados tradicionalmente receptores pasivos, pero otorgarles funciones activas y responsabilidad en las estrategias relacionadas con la energía, con la ayuda y el apoyo de las tecnologías IoT, aumenta tanto su bienestar como su uso de la energía, tal y como se desprende de la revisión bibliográfica realizada en [1].

- La fórmula única ya no puede aplicarse a las estrategias del sector residencial [1]. La difusión de tecnologías domésticas inteligentes es absolutamente necesaria para lograr soluciones personalizadas [9], lo que aumentará tanto la aceptación de los usuarios [3] como la correcta ejecución de las estrategias [2]. Los tiempos de cálculo pueden contenerse aplicando este principio a nivel de distrito [7].
- En relación con el punto anterior, los distritos ya no deberían estar formados por un vecindario, compuesto por personas totalmente diferentes, sino que deberían estar formados por usuarios que tengan comportamientos similares (con respecto a los hábitos de consumo de energía) o al menos características demográficas similares, ya que dichas características pueden ser predictores del comportamiento, como se ha visto en [3].
- Las soluciones de HVAC que incluyen una plataforma IoT garantizan una comunicación continua entre todas las partes (ocupantes-edificio-red). Un flujo de datos bidireccional, es decir, recoger las opiniones de los usuarios a través de una interfaz y proporcionarles informes y sugerencias, muestra mejores resultados en comparación con la comunicación unidireccional. En este sentido, el paradigma del crowdsensing puede aplicarse con éxito en este campo.
- Participar en estrategias relacionadas con la energía no es suficiente si los usuarios no son conscientes de las consecuencias de su comportamiento. La ejecución incorrecta, o el ‘mal comportamiento’ de los usuarios, puede reducir la eficacia de las estrategias. Este fenómeno es más común de lo que se cree, como demuestran los datos del mundo real analizados en [2]: en el 38,5% de los casos, los ocupantes optaron por ajustar la estrategia. Entre ellos, en el 36% de los casos, el éxito de la DRE se ve aún más mermado por los rebotes adicionales.
- En las estrategias que implican a los sistemas HVAC, los ajustes (punto anterior) no están relacionados únicamente con el confort térmico. En [2] se observó que las personas que ajustan o interrumpen las DRE y las que no lo hacen están expuestas tanto a temperaturas interiores similares como a deltas (o variaciones de) temperaturas interiores similares durante los experimentos. Esto sugiere que el cambio en el ambiente físico dentro de una DRE no puede considerarse un predictor de los ajustes.
- La comunicación con los usuarios con un lenguaje sencillo es fundamental para que acepten las estrategias: en [3] se vio que unas explicaciones sencillas bastaban para despertar el interés de los usuarios por probarlas. Por otra parte, la elección de

comunicar mediante ejemplos de la vida real permite tener un feedback más fiable en comparación con las preguntas generales, lo que confirma una vez más la necesidad de planes informativos para guiar a los consumidores.

- Los antecedentes, como los datos demográficos, la tenencia de la vivienda, la situación del hogar o la presencia de niños, influye significativamente en las distintas facetas de la aceptación de las estrategias relacionadas con la energía por parte de los usuarios [3].

Por lo que yo entiendo del problema y lo que he descubierto durante mi investigación, el trabajo futuro debería centrarse en dos aspectos principales.

En primer lugar, la necesidad de estrategias a medida. El mundo moderno no está hecho para las etiquetas: cada persona tiene su propia manera de percibir el entorno y sus propias preferencias. A la hora de diseñar las estrategias de ahorro energético, deben tenerse en cuenta las opiniones y necesidades de los usuarios como parámetro del problema energético. Gracias a las tecnologías IoT, es posible crear soluciones ad hoc para cada grupo de personas que se comportan de forma similar. En ese sentido, esta tesis pretende tener una utilidad muy práctica: se ha comprobado que la aceptación de estrategias de flexibilidad energética está relacionada con características demográficas y de entorno, lo que sugiere como primer paso la creación de distritos sobre los que operar. Entre ellos, algunos ocupantes estarán satisfechos con el cambio, mientras que otros no. Esto es especialmente cierto en el caso de las estrategias que afectan al sistema de climatización, ya que la percepción térmica de un mismo ambiente puede ser diferente. De ahí que deba hacerse una segunda agrupación basada en la tolerancia, la preferencia térmica, etc.

El segundo aspecto, en cierto modo relacionado con el primero, es la comunicación con los usuarios. Nos enfrentamos a una gran crisis energética y la gente sigue preocupada por dónde encontrar más energía. No son muchos los que se preguntan ‘cómo podemos consumir menos’. Llevamos tanto tiempo planteando la pregunta equivocada que ni siquiera somos capaces de cuestionarnos si estamos poniendo el foco en la dirección correcta. En una charla del profesor Omar Massara, escuché una vez estas inspiradoras palabras: ‘el único crecimiento sostenible es el decrecimiento’. Tan simple y, sin embargo, tan difícil de entender.

Como se ha comentado en los apartados anteriores, la mayoría de la gente ni siquiera es consciente de la magnitud del problema y de la urgencia de iniciar una transición energética

sostenible cambiando nuestro comportamiento, por lo que es improbable que los usuarios cambien sus pautas por sí mismos. Las normativas son un paso importante de este proceso, ya que muestran a los usuarios el camino correcto a seguir. Por ello, este trabajo apoyó la introducción en la legislación del Smart Readiness Indicador (SRI), que es un ejemplo de cómo la transición energética puede recibir un impulso (las estrategias de flexibilidad energética requieren un nivel mínimo de tecnología y conexión en red para funcionar, por lo que esta transición es difícilmente imaginable sin el IoT). Sin embargo, las normativas tardan algún tiempo en ser aceptadas, por lo que se necesita un plan de comunicación directa para que la difusión en nuestra vida cotidiana se produzca con mayor rapidez.

Los planes de comunicación y compromiso son cruciales para obtener un buen resultado en términos de difusión y aceptación de las estrategias. Es una tarea difícil implicar a la gente, pero hoy en día estamos ante una serie de revoluciones drásticas causadas por las aplicaciones y los medios sociales. Hay infinidad de ejemplos: personas que han seguido los mismos patrones durante años ahora están cambiando sus hábitos de alimentación/entrenamiento/sueño porque están influenciados por planes de comunicación muy eficaces. Además, la gente empieza a interesarse por temas medioambientales, cambio climático, contaminación por plásticos, etc.: es un buen momento para implicar a los usuarios y dar un paso hacia el llamado cambio de consumidor a prosumidor. Los trabajos futuros deberían trabajar más este aspecto, no basta con proponer buenas estrategias si se descuida la difusión de los resultados.

## Bibliography - Bibliografía

---

### Publications

- [1] Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta Gómez, A.F., 2020. A comprehensive survey about thermal comfort under the IoT paradigm: is crowdsensing the new horizon?, *Sensors* 2020, 20, 4647.
- [2] Tomat, V., Vellei, M., Ramallo-González, A.P., González-Vidal, A., Le Dréau, J., Skarmeta-Gómez, A., 2022. Understanding patterns of thermostat overrides after demand response events, *Energy and Buildings* 271 (2022) 112312.
- [3] Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta-Gómez, A., Georgopoulos, G., Ntafalias, A., 2023. Insights into End Users' Acceptance and Participation in Energy Flexibility Strategies, *Buildings* 2023, 13(2), 461.
- [4] Ramallo-González, A.P., Loonen, R., Tomat, V., Zamora, M.A., Surugin, D., Hensen, J., 2020. Nomograms for de-complexing the dimensioning of off-grid PV systems, *Renewable Energy* 161, 2020, 162-172.

- [5] Ramallo-González, A.P., Tomat, V., Fernández-Ruiz, P.J., Zamora-Izquierdo, M.A., Skarmeta-Gómez, A.F, 2020. Conceptualisation of an IoT Framework for Multi-Person Interaction with Conditioning Systems, *Energies* 2020, 13, 3094.
- [6] Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta-Gómez, A., 2021. A practical approach for modelling PV off-grid systems in EnergyPlus using post-processing of data to identify black out days, *Proceedings of the 17th IBPSA Conference, Bruges, Belgium, Sept. 1-3, 2021.*
- [7] Ramallo-González, A.P., Bardaki, C., Kotsopoulos, D., Tomat, V., González Vidal, A., Fernandez Ruiz, P.J., Skarmeta Gómez, A., 2022. Reducing Energy Consumption in the Workplace via IoT-Allowed Behavioural Change Interventions, *Buildings* 2022, 12, 708.
- [8] Ramallo-González, A.P., Alcañiz-Cascales, T., Tomat, V., Fernández Guillamón, A., Molina, A., Skarmeta-Gómez, A.F, 2022. A novel method for eliminating the exponential growth of computing optimal demand response events for large-scale appliances re-scheduling, *Sustainable Energy, Grids and Networks* 32 (2022) 100907
- [9] Ntafalias, A., Tsakanikas, S., Skarvelis-Kazakos, S., Papadopoulos, P., Skarmeta-Gómez, A.F., González-Vidal, A., Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Marin-Perez, R., Vlachou, M.C., 2022. Design and implementation of an interoperable architecture for integrating building legacy systems into scalable energy management systems, *Smart Cities* 2022, 5, 1421-1440.
- [10] Tomat, V., Ramallo-González, A.P., Skarmeta-Gómez, A., 2023. Evaluation of cost-effectiveness and energy flexibility potential of different interventions through the SRI score - Evaluation under the IoT paradigm. In *Cyber-Physical System Solutions for Smart Cities*, IGI Global, ISBN10: 1668477564.
- [11] Ye, Y., Ramallo-González, A.P., Tomat, V., Sánchez-Valverde, J., Skarmeta-Gómez, A., 2023. Smart-Watcher© a solution to automatically assess the smartness of buildings, *Computers* 2023, 12 (4) 76.
- [12] Interoperability. SmartBuilt4EU White Paper – Task Force 2: Efficient Building Operation. Available online at <https://smartbuilt4eu.eu/publications/> (accessed on 14/10/2022)
- [13] Optimised building costs. SmartBuilt4EU White Paper – Task Force 2: Efficient Building Operation. Available online at <https://smartbuilt4eu.eu/publications/> (accessed on 14/10/2022)



## References

- [14] Cao, X. Dai, X., Liu, J., 2016. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, *Energy Build.* 128 (2016) 198–213.
- [15] González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J.F., Maestre, I.R., Yan, D., 2022. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers, *Energy Reports*, 8 (2022) 626-637.
- [16] Summary Report Energy Efficiency in Buildings. World Business Council for Sustainable Development. Available online at: [http://docs.wbcsd.org/2007/10/EEB\\_FactsTrends-Summary.pdf](http://docs.wbcsd.org/2007/10/EEB_FactsTrends-Summary.pdf) (accessed on 14/10/2022)
- [17] Guelpa, E., Verda, V., 2021. Demand response and other demand side management techniques for district heating: A review, *Energy* 219 (1021) 119440.
- [18] Siano, P., 2014. Demand response and smart-grids – A survey, *Renewable and Sustainable Energy Review* 30 (2014) 461-478.
- [19] Chai, Y., Xiang, Y., Liu, J., Gu, C., Zhang, W., Xu, W., 2019. Incentive-based demand response model for maximizing benefits of electricity retailers, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7, 1644-1650 (2019).
- [20] Tantau, A., Puskás-Tompos, A., Fratila, L., Stanciu, C., 2021. Acceptance of Demand Response and Aggregators as a Solution to Optimize the Relation between Energy Producers and Consumers in order to Increase the Amount of Renewable Energy in the Grid, *Energies* 2021,14, 3441.
- [21] White, L.V., Sintov, N.D., 2018. Inaccurate consumer perceptions of monetary savings in a demand-side response programme predict programme acceptance, *Nature Energy*, *Nature*, 3 (12) 1101-1108.
- [22] Ajzen, I, 1991. The Theory of Planned Behaviour, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 1991, 50, 179–211.
- [23] Wei, S., Jones, R., de Wilde, P, 2014. Driving factors for occupant-controlled space heating in residential buildings. *Energy Build.* 2014, 70, 36–44.
- [24] Anvari-Moghaddam, A., Monsef, H., Rahimi-Kian, A., 2015. Optimal smart home energy management considering energy saving and a comfortable lifestyle, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6 (1) 324 – 332.
- [25] Ramallo-González, A.P., González-Vidal, A., Fernandez-Ruiz, P.J., Skarmeta-Gómez, A.F, 2019. The development of an IoT Infrastructure to Perform Behavioural Change Towards Low Energy Habits. In *Proceedings of the 16th IBPSA Conference, Rome, Italy, 2–4 September 2019*.

- [26] Höpfe, P.R. Heat balance modelling. *Experientia* 1993, 49, 741–746.
- [27] Fanger, P.O., 1970. *Thermal comfort*, Danish technical press, Copenhagen, 1970.
- [28] Vellei, M., Le Dréau, J., 2019. A novel model for evaluating dynamic thermal comfort under demand response events, *Building and Environment* 160 (2019) 106215.
- [29] Madakam, S.; Ramaswamy, R.; Tripathi, S. Internet of Things (IoT): A Literature Review. *J. Comput. Commun.* 2015, 3, 164.
- [30] McKenna, E., Richardson, I., Thomson, M., 2012. Smart meter data: Balancing consumer privacy concerns with legitimate applications, *Energy Policy*, 41, 807-814, 2012.
- [31] IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings; Energy in buildings and Communities Programme: Darmstadt, Germany, 2019.
- [32] Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., Engelmann, W. H., 2001. The National Human Activity Pattern Survey (NHAOS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants, *Journal of exposure analysis and environmental epidemiology*, 2001, 11(3):231-52.
- [33] Van Hoof, J., 2008. Forty years of Fanger’s model of thermal comfort: comfort for all?, *Indoor Air* 18 (2008) 3.
- [34] Nicol, J. F., Humphreys, M. A., 1973. Thermal comfort as part of a self-regulating system, *Building research & practice* 1(3) 174-179.
- [35] De Dear, R., Schiller Brager, G., 2001. The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment, *Int J Biometeorol* (2001) 45:100-108.
- [36] ASHRAE, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy,” ANSI/ASHRAE Stand. 55-2020, 2020.
- [37] ISO, “Ergonomics of the Thermal Environment–Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria,” ISO 7730-2005; ISO Copyr. Office Geneva, Switz., 2005.
- [38] Grignon-Massé, L., Adnot, J., Rivière, P., 2008. A preliminary attempt to unify the different approaches of summer comfort evaluation in the European context, IEECB'08: Fifth International Conference on Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings, 2008.
- [39] Yang, L., Yan, H., Lam,., 2014. Thermal comfort and building energy consumption implications – A review, *Applied Energy* 115 (2014) 164-173.
- [40] S. Barlow and D. Fiala, 2007. Occupant comfort in UK offices – How adaptive comfort theories might influence future low energy office refurbishment strategies, *Energy Build.* 7 (39) (2007) 837–846.
- [41] Lan, L., Wargocki, P., Lian, Z., 2011. Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort, *Energy and Buildings*, 43 5 (2011) 1057-1062.
- [42] Lan, L., Wargocki, P., Wyon, D. P., Lian, Z., 2011. Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance, *Indoor Air* 21 (2011) 5.

- [43] Pan, J., Jain, R., Paul, S., Vu, T., Saifullah, A., & Sha, M. (2015). An Internet of Things Framework for Smart Energy in Buildings: Designs, Prototype, and Experiments. *IEEE Internet of Things Journal*, 2(6), 527–537.
- [44] Cottafava, D., Magariello, S., Ariano, R., Arrobio, O., Baricco, M., Barthelmes, V.M., Baruzzo, G., Bonansone, M., Console, L., Contin, L., Corgnati, S.P., Dotta, S., Fabi, V., Gambino, P., Gerlero, I., Giovannoli, A., Grillo, P., Guaschino, G., Pandolfo, P., Malano, M., Mana, D., Matassa, A., Monterzino, L., Mosca, S., Nuciari, M., Olivetta, E., Padovan, D., Pantó, E., Rapp, A., Sanseverino, M., Sciuolo, A., Sella, S., Simeoni, R., Tartaglino, A., Vernerio, F., (2019). Crowdsensing for a sustainable comfort and energy saving, *Energy and Buildings*, 186 (2019) 208-220.
- [45] Palensky, P. and Dietrich, D. (2011). Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(3): pp 381 – 388
- [46] Aalami, H.A., Parsa Moghaddam, M., Yousefi, G.R., 2010. Demand Response modeling considering Interruptible/Curtailable loads and capacity market programs, *Applied Energy*, 87 (2010) 243-250
- [47] Patnam, B., Pindoriya, N., 2021. Demand response in consumer-centric electricity market: Mathematical models and optimization problems, *Electric Power Systems Research* (2021) 106923, 193.
- [48] Wang, H., Wang, S., Tang, R., 2019. Development of grid-responsive buildings: Opportunities, challenges, capabilities and applications of HVAC systems in non-residential buildings in providing ancillary services by fast demand responses to smart grids, *Applied Energy* (2019) 697-712, 250.
- [49] Assessment of Demand Response and Advanced Metering Staff Report, Docket AD06-2-000 August 2006 (Revised December 2008).
- [50] Li, D., Chiu, W.Y., Sun, H., 2017. Demand Side Management in Microgrid Control Systems, Chapter 7, Microgrid, *Advanced Control Method and Renewable Energy System Integration*, 2017, 203-230.
- [51] National Action Plan for Energy Efficiency (2010). Coordination of Energy Efficiency and Demand Response. Prepared by Charles Goldman (Lawrence Berkeley National Laboratory), Michael Reid (E Source), Roger Levy, and Alison Silverstein.
- [52] Lackes, R., Siepermann, M., Vetter, G., 2018. 26th European Conference on Information Systems: Beyond Digitization – Facets of Socio-Technical Change, ECIS 2018. Portsmouth, 23 June 2018 through 28 June 2018, 143975
- [53] Xu, X., Chen, C., Zhu, X., Hu, Q., 2018. Promoting acceptance of direct load control programs in the United States: Financial incentive versus control option, *Energy*, 147, 1278-1287

- [54] Stener, K., Frederiks, E.R., Hobman, E.V., Cook, S., 2017. Willingness to participate in direct load control: The role of consumer distrust, *Applied Energy*, 189, 76-88.
- [55] Realising the potential of Demand-Side Response to 2025 - A focus on Small Energy Users - Summary report. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. London, UK. November 2017
- [56] Commission for Energy Regulation, Electricity smart metering customer behaviour trials (CBT) findings report. Information paper. CER11080a, 2011.
- [57] Mogles, N., Walker, I., Ramallo-González, A.P., Lee, J., Natarajan, S., Padget, J., Gabe-Thomas, E., Lovett, T., Ren, G., Hyniewska, S., O'Neill, E., Hourizi, R., Coley, D., 2017. How smart do smart meters need to be?, *Building and Environment*, (2017), 439-450, 125.
- [58] Annala, S., Viljainen, S., Tuunanen, J., Honkapuro, S., 2014. Does Knowledge Contribute to the Acceptance of Demand Response?, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2(1), pp 51-60, 2014.
- [59] Kane, M., Sharma, K., 2019. Data-driven Identification of Occupant Thermostat-Behavior Dynamics, *ArXiv*. (2019)
- [60] Sarran, L., Gunay, H.B., O'Brien, W., Hviid, C.A., Rode, C., 2021. A data-driven study of thermostat overrides during demand response events, *Energy Policy*, 153 (2021) 112290
- [61] Conejo, A.J., Morales, J.M., Baringo, L., 2010. Real-time demand response model, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1 (3) 5607339, 236-242.
- [62] Chen, W., Wang, X., Petersen, J., Tyagi, R., Black, J., 2013. Optimal Scheduling of Demand Response Events for Electric Utilities, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1949-3053 (2013).
- [63] Vieira, F.M., Moura, P.S., de Almeida, A.T., 2017. Energy storage system for selfconsumption of photovoltaic energy in residential zero energy buildings, *Renewable Energy* 103 (2017) 308-320.
- [64] Dumont, O., Carmo, C., Georges, E., Quoilin, S., Lemort, V., 2017. Economic assessment of electric energy storage for load shifting in positive energy building, *Int. J. Energy Environ. Eng.* 8 (1) (2017) 25-35.
- [65] Feldmeier, M., Paradiso, J.A., 2010. Personalized HVAC control system. *Internet of Things (IoT)*. *IEEE Communications Magazine*, 29 November 2010–1 December 2010.
- [66] O'Shaughnessy, E., Cutler, D., Ardani, K., Margolis, R., 2018. Solar plus: Optimization of distributed solar PV through battery storage and dispatchable load in residential buildings, *Applied Energy*, 213 (1) (2018) 11-21.
- [67] Coelho, S., Sanches-Pereira, A., Tudeschini, L., G., Escobar, J., Poveda, M., Coluna, N., Collin, A., Rovere, E.L., Trindade, A., Pereira, O., 2015. Biomass residues as electricity generation source in low HD source in regions of Brazil, *The XI Latin-American congress on electricity generation and transmission - CLAGTEE 2015*, p. 1-8.
- [68] Bekele, G., Tadesse, G., 2012. Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia, *Applied Energy*, 97 (2012) 5-15.

- [69] Fotopoulou, E., Zafeiropoulos, A., Terroso-Sáenz, F., Simsek, U., González-Vidal, A., Tsiolis, G., Gouvas, P., Liapis, P., Fensel, A., Skarmeta, A, 2017. Providing personalized energy management and awareness services for energy efficiency in smart buildings. *Sensors* 2017, 17, 2054
- [70] Chen, W., Zhou, K., Yang, S., Wu, C, 2017. Data quality of electricity consumption data in a smart grid environment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 75, 98–105.
- [71] Azar, E., Menassa, C, 2014. Framework to evaluate energy-saving potential from occupancy interventions in typical commercial buildings in the United States. *J. Comput. Civ. Eng.* 2014, 28, 63–78
- [72] Mogles, N., Padget, J., Gabe-Thomas, E., Walker, I., Lee, J.H, 2018. A computational model for designing energy behaviour change interventions. *User Model. User-Adapt. Interact.* 2018, 28, 1–34
- [73] Pavithra, N., Priya, E.B., 2017. Residential demand response using genetic algorithms, in: 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT, (01) 2017, pp. 1–4.
- [74] Javadi, M.S., Gough, M., Lotfi, M., Nezhad, A.E., Santos, S.F., Catalão, J.P.S., 2020. Optimal self-scheduling of home energy management system in the presence of photovoltaic power generation and batteries, *Energy* (2020) 118568.
- [75] European Commission. Final report on the technical support to the development of a smart readiness indicator for buildings. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.
- [76] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 Amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency; L156/75; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2018
- [77] Li, R., Satchwell, A.J., Finn, D., Christensen, T.H., Kummert, M., Le Dréau, J., Lopes, R.A., Madsen, H., Salom, J., Henze, G., Wittchen, K., 2022. Ten questions concerning energy flexibility in buildings, *Building and Environment* 223 (2022) 109461.
- [78] Fokaides, P.A., Panteli, C., Panayidou, A., 2020. How are the smart readiness indicators expected to affect the energy performance of buildings: first evidence and perspectives, *Sustainability* (2020) 12, 9496
- [79] Chowdhary, K. (2020). Natural language processing. *Fundamentals of artificial intelligence*, 603-649.



## **Publications composing the PhD Thesis**

## A comprehensive survey about thermal comfort under the IoT paradigm: is crowdsensing the new horizon?



<b>Authors</b>	Valentina Tomat, Alfonso P. Ramallo-González, Antonio Skarmeta-Gómez
<b>Journal</b>	Sensors
<b>JIF</b>	3.847 Q1
<b>Publisher</b>	MDPI
<b>DOI</b>	10.3390/s20164647
<b>Status</b>	Published

### Abstract

This paper presents a review of technologies under paradigm 4.0 applied to the study of thermal comfort and, implicitly, energy efficiency. The research is based on the analysis of the Internet of Things (IoT) literature, presenting a comparison among several approaches adopted. The central objective of the research is to outline the path that has been taken throughout the last decade towards a people-centric approach, discussing how users switched from being passive receivers of IoT services to being an active part of them. Based on existing studies, the authors performed what was a necessary and unprecedented grouping of the IoT applications to thermal comfort into three categories: the thermal comfort studies with IoT hardware, in which the approach focuses on physical devices, the mimicking of IoT sensors and comfort using Building Simulation Models, based on the dynamic modelling of the thermal comfort through IoT systems, and Crowdsensing, a new concept in which people can express their sensation proactively using IoT devices. Analysing the trends of the three categories, the results showed that Crowdsensing has a promising future in the investigation through the IoT, although some technical steps forward are needed to achieve a satisfactory application to the thermal comfort matter.

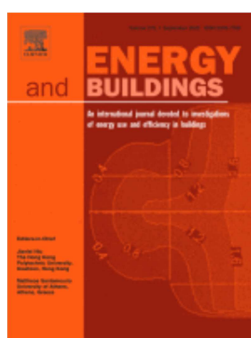
### Keywords

IoT; Crowdsensing; thermal comfort



---

## Understanding patterns of thermostat overrides after demand response events



<b>Authors</b>	Valentina Tomat, Marika Vellei, Alfonso P. Ramallo-González, Aurora González-Vidal, Jérôme Le Dréau, Antonio Skarmeta-Gómez
<b>Journal</b>	Energy and Buildings
<b>JIF</b>	7.201 Q1
<b>Publisher</b>	Elsevier
<b>DOI</b>	10.1016/j.enbuild.2022.112312
<b>Status</b>	Published

### Abstract

Demand Response (DR) strategies represent an innovative option to optimise energy management. In particular, smart thermostats have captured the attention of the scientific community for their effectiveness in achieving energy-saving and peak-shaving by lowering HVAC consumption during critical hours of the year. One way of achieving this aim is to leave the control of the smart thermostat to a third party for the duration of the DR event in the so-called Direct Load Control (DLC) configuration. Most research focuses on thermostat overrides during DR events; in this work, we use real-world data from the Donate Your Data dataset to analyse the interaction of users with the thermostat around the DR event. In particular, this work focuses on users that interact with the thermostat before (anticipative behaviour) or during the DR evt (reactive behaviour), leading to lower efficiency of the load control. Through clustering techniques, different categories of users are identified, and some significant cases are simulated on a building energy simulation tool to quantify the missed power reduction and the impact on energy. The study highlights that the behaviour of some users can reduce or even nullify the efficacy of the DLC strategy. In light of the findings and to prevent this issue, we suggest the need for tailored DR events for different archetypes of users as identified in this work through clustering.

### Keywords

Thermal comfort; Occupant behaviour; Demand response; Rebound; Space cooling; Clustering

---

## Insights into End Users' Acceptance and Participation in Energy Flexibility Strategies



<b>Authors</b>	Valentina Tomat, Alfonso P. Ramallo-González, Antonio Skarmeta-Gómez, Giannis Georgopoulos, Panagiotis Papadopoulos
<b>Journal</b>	Buildings
<b>JIF</b>	3.324 Q2
<b>Publisher</b>	MDPI
<b>DOI</b>	10.3390/buildings13020461
<b>Status</b>	Published

### Abstract

Ahead of the energy crisis, several countermeasures to reduce the energy demand require an active change in the end users' energy patterns. There are strategies known as demand response (DR) programs that have been tested in recent years, and they have showed us that users' behaviours can considerably reduce their effectiveness. This is due to a lack of sufficient knowledge, which leads to a lack of acceptance and participation. The key aim of this research is to detect which aspects influence acceptance of energy flexibility strategies the most. Through a series of tools, such as direct questionnaires, brief and user-friendly explanations, and analysis of variance, these aspects are studied by delving into specific topics such as smart home technologies, change in habits and patterns of energy use, and DR programs. In the literature, these topics have been studied separately, but they all contribute to the global acceptance: a comprehensive vision of the matter is the novelty of this work. The key findings are encouraging: 72% of the respondents demonstrated their willingness to enrol in a DR program. A reluctance to change habits was shown, in particular, among the age range 26–40, while women were more environmentally aware and more likely to participate in energy flexibility strategies. The modality of direct load control (which gives control to the utility company) is confirmed to be harder to be accepted (from 13 to 27% less acceptance depending on the category), with people who share a flat being the most likely to try it, and people who live with their parents being the less inclined ones. Acceptance increased when we provided plain language explanations, as seen in the case of smart home technologies:

97% of people who never tried them were declared to be willing to test smart technologies after a simple elucidation that was included in the questionnaire, showing that a right approach to the users led to a greater show of interest. This research highlights that the users' background and demographics characteristics (namely age, gender, educational level, home situation, home tenure, presence of children, and average income) should be taken into account when it comes to designing new energy flexibility strategies, since differences in the acceptance among groups have been found. The work also presents insights on the payback periods of legacy equipment in the EU energy context, demonstrating that a timely intervention can require half the time compared to that of the period prior to the crisis.

### **Keywords**

demand response; demand side management; demand flexibility; IoT; users' acceptance