

UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO / EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA

INGENIARITZA ENERGETIKOA SAILA

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

MODELIZADO Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA / TÉRMICA  
DE UN EDIFICIO DE OFICINAS, DESARROLLADO A  
TRAVÉS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES

**TESIS DOCTORAL**

Autor: Jose M<sup>a</sup> Santos Herrero

Directores: Dr. Ing. Ivan Flores Abascal  
Dr. Ing. José Manuel López Guede

Bilbao – España / Spain

Enero 2023



## Agradecimientos

En primer lugar y de manera especial agradecer a mis directores de tesis, Dr. Ing. Ivan Flores Abascal y Dr. Ing. Jose Manuel Lopez Guede, por su paciencia, aportación de conocimientos, dirección científica y personal, así como su gran ayuda para el desarrollo y realización de esta tesis. Agradecer al Dr. Ing. José María Sala, como tutor y quien me dio la oportunidad de iniciar este Programa de Doctorado.

Mi más sincero agradecimiento a todos los miembros del equipo de Investigación *ENEDI* y en especial a los miembros del proyecto Europeo *A2PBEER (Affordable and Adaptable Public Building through Energy Efficient Retrofitting)*, entre otros a los Dr. Ing. Aitor Erkoreka, Koldobika Martin, Eduardo Garcia, Jon Teres, y Luis del Portillo quienes monitorizaron y facilitaron datos e información del edificio del Rectorado de la Universidad del País Vasco, situado en la localidad de Leioa (Vizcaya) y sobre el que hemos enfocado nuestra investigación.

Además agradecer la colaboración y apoyo de todos los integrantes del programa *Erasmus+ 2016 - 2018*, entre muchos otros los Dr. Ing. Jose Antonio Ramos Hernanz, Ortzi Akizu Gardoki, Unai Fernandez Gamiz, Leyre Torre Tojal, Aitor Bastarrika, Ekaitz Zulueta, Javier Sancho, Iñigo Aramendia, Daniel Teso, Asier González González, Erol Kurt, Francesco Cottone, Eleonora Guseinoviene, Robert Beloiu, Nicu Bizon, etc... así como a los distintos participantes en dicho programa, porque han abierto un poquito más nuestras mentes aportándonos nuevos conocimientos y creando lazos de amistad a través de experiencias inolvidables. Con algunos de ellos hemos coincidido posteriormente en Congresos Internacionales, lo que nos ha permitido estrechar dichos lazos de amistad y disfrutar de grandes momentos entre buenos amigos.

Por ultimo pero no por ello menos importante, agradecer con todo mi corazón a mi pareja Elena, por su paciencia y aliento que me han ayudado a compaginar mis estudios de Doctorado con mi vida profesional y personal, para hacer más llevadero el esfuerzo. También a mis padres, Jose Maria y Fe, así como a mi hermana Susana porque han sido un estímulo para alcanzar este reto.

Muchas gracias a tod@s!!!!!!



## Resumen Tesis Doctoral

En la actualidad, la mayoría de áreas de la actividad humana deben revisarse con el objetivo de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que estas actividades son las que producen la mayoría de estas emisiones. En concreto, el sector de la construcción es una de las principales actividades responsables. Para minimizar la huella ecológica y garantizar la suficiencia energética, la Unión Europea creó el concepto *nearly-Zero Energy Buildings* (nZEB).

Han transcurrido más de diez años desde que se aprobó esta Directiva Europea y se ha considerado interesante revisar el estado actual en torno a este concepto, considerando los nuevos avances en desarrollo informático que ya son aplicables en este campo. En consecuencia, se han revisado investigaciones recientes publicadas en revistas indexadas de renombre y conferencias internacionales. Esta tesis explica el concepto nZEB y revisa trabajos de investigación enfocados en lograrlo. Se detecta una brecha de investigación, por lo que se revisan conceptos y tecnologías existentes como las herramientas de *Building Energy Performance Simulation* (BEPS) y el *Model Predictive Control* (MPC), y las investigaciones relevantes donde se han aplicado que se incluyen en un Estado del Arte específico para cada concepto, considerando que estas herramientas podrían aplicarse en la climatización de edificios para lograr el nZEB. Tras este profundo análisis, se ha razonado que las posibilidades para optimizar el consumo energético son enormes combinando adecuadamente de manera holística herramientas BEPS para el modelizado y simulación, así como MPC para estrategias de control.

Por tanto se concluye que no solo existen estrategias clásicas o convencionales que inciden especialmente en la mejora de las características de aislamiento de la envolvente de un edificio sino que existen otras opciones muy interesantes tanto tecnológica como económicamente. Por ello se ha abierto una línea de investigación donde se ha desarrollado un sistema basado en *Artificial Neural Networks* (ANN) y se ha aplicado a un edificio de oficinas: el edificio del Rectorado de la Universidad del País Vasco (ubicado en Leioa – Vizcaya, Norte de España). A fin comprobar sobre un caso real el proceso de modelizado, simulación, procesamiento y análisis de datos, comparando los resultados obtenidos para justificar la conclusión de que es una opción factible con gran potencial para facilitar el objetivo de lograr nZEB, especialmente en los edificios públicos de oficinas existentes. Es decir, sería posible gestionar un sistema de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) utilizando Fuentes de Energía Renovable (RES) de forma eficaz mediante ANN, reduciendo los problemas de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial y consiguiendo ahorros energéticos considerables.

## Abstract of PhD Thesis

Nowadays, most areas of human activity should be reviewed with the aim of reducing CO<sub>2</sub> emissions, since these activities are producing the majority of these emissions. Specifically, the building sector is one of the main responsible activities. In order to minimize the ecological footprint and ensure energy sufficiency, European Union created the nearly-Zero Energy Building (nZEB) concept.

More than ten years have elapsed since this European Directive was defined and it has been considered it worth to review the current state around this concept, considering the new advances in computer development that are already applicable to this field. Accordingly, recent researches published in reputed indexed journals and international conferences have been reviewed. This thesis explains the nZEB concept and reviews research articles focused on achieving it. A research gap is detected, so enabling concepts and technologies as Building Energy Performance Simulation (BEPS) tools and Model Predictive Control (MPC) are recalled, and relevant researches where used are included in a specific state-of-the-art for each concept, considering that these tools could be applied in building air conditioning to achieve nZEB. After this deep analysis, it has been reasoned that the possibilities to optimize the energy consumption are huge combining properly in a holistic way BEPS tools for modelling and simulation, as well as MPC for control strategies.

It is therefore concluded, not only are there classic or conventional strategies particularly affect improving the insulation characteristics of a building envelope also but there are other options very interesting both technologically and economically. For this reason, a line of research has been opened where a system based on Artificial Neural Networks (ANN) has been developed and applied to an office building: the Rectorate building of the University of the Basque Country (located in Leioa – Vizcaya, North of Spain). In order to check the data modelling, simulation, processing and analysis process on a real case, comparing the results obtained to justify the conclusion that it is a feasible option with great potential to facilitate the target of achieving nZEB, especially in existing public office buildings. In other words, it would be possible to manage a Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system using Renewable Energy Sources (RES) in an effective means through ANN, reducing CO<sub>2</sub> emissions problems worldwide and reaching considerable energy savings.



## **Contribuciones destacadas para esta Tesis:**

### **Artículos de investigación de esta tesis en publicaciones científicas JCR:**

*Scientific Report*

Editorial: *SPRINGER NATURE*

Categoría: **JCR - Q1**

***Energy and thermal modelling of an office building to develop an artificial neural networks model.*** Publicado: 31 Mayo 2022

J.M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores, E. Zulueta

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-12924-9>

*Renewable and Sustainable Energy Reviews*

Editorial: *ELSEVIER*

Categoría: **JCR - Q1**

***Modeling, simulation and control tools for nZEB: A state-of-the-art review.*** Publicado: 3 Marzo 2021

J.M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110851>

*Journal of Energy Systems*

Editorial: *DERGIPARK*

Categoría: **JCR - Q4**

***A short review on the use of renewable energies and model predictive control in buildings.*** Publicado: 11 Diciembre 2017

J.M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores

<https://doi.org/10.30521/jes.346653>



## **Participaciones sobre esta investigación en Congresos Internacionales:**

### ▪ **IV. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS**

28-31 August 2016, Istanbul (Turkey)

AN ONGOING REVIEW ON BUILDING ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT SYSTEMS.

J. M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores, J.M. Sala

### ▪ **V. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS**

27-30 August 2017, Sarajevo (Bosnia and Herzegovina).

A SHORT REVIEW ON THE USE OF RENEWABLE ENERGIES AND MODEL PREDICTIVE CONTROL IN BUILDINGS CLIMATIZATION.

J. M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores

### ▪ **VI. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS**

25-27 June 2018, Istanbul (Turkey)

MPC AS A STRATEGY FOR THE ACHIEVEMENT OF nZEBs.

J. M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores

### ▪ **2nd International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment.**

25-27 July 2018, Oviedo (Spain)

ANALYSIS OF NEW STRATEGIES TO REACH NEARLY ZERO ENERGY BUILDINGS (nZEBs).

J. M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores

### ▪ **VII. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS**

10-12 June 2019, Madrid (Spain)

METHODOLOGY OF ENERGY SIMULATION APPLIED TO AN OFFICE BUILDING.

J. M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores



MODELING THE OPERATIVE TEMPERATURE OF OFFICE BUILDINGS.

J.M. Lopez-Guede, J. M. Santos-Herrero, I. Flores, E. Zulueta, U. Fernandez-Gamiz

▪ **10. EUROPEAN CONFERENCE on RENEWABLE ENERGY SYSTEMS**

07-09 May 2022, Istanbul (Turkey)

AN ONGOING REVIEW ON TOOLS FOR nZEB.

J. M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores, U. Fernandez-Gamiz, J. A. Ramos-Hernanz, E. Zulueta

ENERGY RELATED BUILDING MODELING AND SIMULATION.

J. M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores, J. A. Ramos-Hernanz, E. Zulueta, U. Fernandez-Gamiz

## Índice general

<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Resumen Tesis Doctoral</b> .....	v
<b>Abstract of PhD Thesis</b> .....	vi
<b>Contribuciones</b> .....	viii
<b>Índice general</b> .....	xi
<b>Índice de figuras y gráficos</b> .....	xiv
<b>Índice de tablas</b> .....	xvii
<b>Abreviaturas</b> .....	xix
<b>1.- Introducción:</b> Antecedentes, motivaciones y definición de la problemática	<b>21</b>
1.1.- Antecedentes clave. Definición de la problemática .....	22
1.2.- Justificación de la investigación .....	24
1.3.- Metodología aplicada en la investigación .....	26
1.4.- Objetivo y esquema de la Tesis .....	28
1.5.- Conclusión .....	31
<b>2.- Estado del Arte:</b> Resumen y análisis de publicaciones estudiadas	<b>32</b>
2.1.- Introducción .....	33
2.2.- Revisión de la Literatura: Resumen y análisis realizado .....	35
2.2.1.- Concepto nZEB .....	35
2.2.2.- Revisión de literatura sobre modelizado y simulación de edificios .....	41
2.2.3.- Concepto MPC .....	48
2.2.4.- Revisión de literatura MPC aplicada en climatización de edificios .....	50
2.2.5.- Factores determinantes en MPC para la climatización de edificios .....	53
2.3.- Conclusiones del Estado del Arte realizado .....	56
<b>3.- Metodología:</b> Procedimiento de investigación e hipótesis planteadas	<b>60</b>
3.1.- Introducción .....	61
3.2.- Justificación de la metodología aplicada .....	63
3.3.- Metodología aplicada en la investigación .....	67
3.4.- Conclusiones respecto a la metodología .....	68

## Indice general

<b>4.- Configuración Experimental: Planteamiento y desarrollo realizado</b>	<b>70</b>
4.1.- Introducción .....	71
4.2.- Planteamiento y desarrollo realizado .....	72
4.2.1.- Proceso de modelizado del edificio objeto .....	73
4.2.2.- Proceso de simulación del edificio objeto .....	82
4.2.3.- Proceso de tratamiento de datos reales del edificio objeto .....	89
4.2.4.- Comparativa de los resultados obtenidos en el caso práctico .....	94
4.3.- Generación de un modelo basado en ANN del edificio objeto .....	102
4.4.- Conclusiones del caso práctico estudiado .....	107
<b>5.- Conclusiones: Análisis de datos obtenidos y conclusiones alcanzadas</b>	<b>108</b>
5.1.- Introducción .....	109
5.2.- Análisis de datos obtenidos .....	110
5.3.- Conclusiones alcanzadas .....	116
5.4.- Implicaciones de la teoría .....	126
5.5.- Limitaciones de la investigación .....	129
5.6.- Próximas investigaciones planteadas .....	131
 <b>Bibliografía</b>	 <b>133</b>
 <b>Anexos:</b>	 <b>142</b>
<b>A.- Documentación relevante para el desarrollo del modelizado del edificio</b>	143
<b>B.- Proceso ilustrativo de caracterización del edificio objeto con TRNSYS</b>	164
<b>C.- Artículo de investigación tesis en publicación científica JCR - Q4: JES</b>	167
<b>D.- Artículo de investigación tesis en publicación científica JCR - Q1: RSER</b>	176
<b>E.- Artículo de investigación tesis en publicación científica JCR - Q1: SREP</b>	189



## Índice de figuras y gráficos

1.1.	Numero citas indicadas en <i>Google Scholar</i> de nZEB, BEPS y MPC ....	26
1.2.	Edificio del Rectorado de la Universidad del País Vasco .....	29
1.3.	Esquema de bloques con la estructura de la Tesis .....	30
2.1.	Ejemplo para explicar gráficamente el concepto de MPC .....	49
3.1.	Monitorización del proyecto <i>A2PBEER</i> sobre el edificio bajo estudio ...	69
4.1.	Fotografía aérea del exterior del edificio bajo estudio .....	73
4.2.	Imagen del plano de la 3ª planta del edificio bajo estudio .....	74
4.3.	Proceso grafico para ubicar geoespacialmente la envolvente .....	75
4.4.	Dibujo 3D del edificio bajo estudio realizado con <i>Sketchup</i> .....	76
4.5.	Modelizado 3D del edificio con el plug-in <i>Sketchup-TRNSYS17</i> .....	78
4.6.	Horarios de ocupación y uso considerados en días laborables .....	80
4.7.	Número de equipos informáticos considerados en días laborables .....	80
4.8.	% uso iluminación y sistema HVAC en días laborables en el edificio ....	81
4.9.	Ejemplo de modelizado de PV y HP en el edificio bajo estudio .....	83
4.10.	Proyecto definido para obtener una simulación del edificio objeto .....	83
4.11.	Conexión entre componentes TRNSYS17: Building–Type65a .....	84
4.12.	Resultados de una simulación anual del edificio bajo estudio .....	85
4.13.	Resultados de una simulación del edificio en formato ASCII .....	86
4.14.	Tratamiento y presentación de datos por cada planta del edificio .....	87
4.15.	Formato aplicado para el procesamiento de los datos del edificio .....	88
4.16.	Gráficas temperatura ambiente con datos simulación y reales .....	90
4.17.	Ubicación estación meteorológica <i>Eukalmet</i> y edificio bajo estudio .....	91
4.18.	Gráficas consumo energético con datos simulación y reales .....	93
4.19.	Gráficas temperatura operativa con datos simulación y reales .....	94
4.20.	Formato aplicado para el procesamiento de los datos del edificio .....	96
4.21.	Gráficos de temperaturas ambiente: datos de simulación y reales .....	97
4.22.	Gráficos de temperaturas operativa: datos de simulación y reales .....	99
4.23.	Gráficas de consumo de energía: datos de simulación y reales .....	100

## Indice de figuras y gráficos

5.1.	Web para visualizar graficas de la investigación a través <i>Power BI</i> .....	110
5.2.	Año 2019: Consumo energético real contra datos estimados por ANN ..	111
5.3.	Año 2019: Consumo energético real por planta contra estimación ANN .	112
5.4.	Año 2019: Temperatura operativa real planta contra estimación ANN ...	113
5.5.	Graficas temperatura operativa por planta Real vs ANN: semana 14/1 ..	117
5.6.	Graficas de consumo de energía Real vs ANN: semana 49/1 .....	118
5.7.	Graficas de consumo de energía Real vs ANN: semana 14/1 .....	121
5.8.	Graficas de consumo de energía Real vs ANN: semana 49/3 .....	122
5.9.	Graficas de consumo de energía Real vs ANN: semana 14/3 .....	123
5.10.	Graficas consumo por plantas Real vs ANN: semana 14/3 5:00-16:00 ..	124
5.11.	Graficas con datos promedios para obtener previsión a 18 semanas ....	128

### **Anexo B:**

B.1.	Caracterización de la envolvente del edificio en <i>TRNBuild</i> .....	164
B.2.	Caracterización de techo y superficies acristaladas en <i>TRNBuild</i> .....	164
B.3.	Caracterización de Infiltración y Ventilación en <i>TRNBuild</i> .....	165
B.4.	Caracterización de la Ocupación y Uso del edificio en <i>TRNBuild</i> .....	165
B.5.	Caracterización de ganancias y requerimientos confort en <i>TRNBuild</i> ...	165
B.6.	Caracterización de la calefacción y refrigeración en <i>TRNBuild</i> .....	166
B.7.	Captura de pantalla del fichero ASCII generado tras el modelizado .....	166





## Indice de Tablas

2.1.	Revisión y análisis de la literatura sobre nZEB .....	39
2.2.	Revisión y análisis de literatura sobre herramientas BEPS .....	43
2.3.	Revisión y análisis de la literatura sobre MPC .....	51
4.1.	Comparativa Superficies (m <sup>2</sup> ) por cada planta del edificio en estudio .....	74
4.2.	Superficies acristaladas (m <sup>2</sup> ) según tipo por cada planta del edificio .....	77
4.3.	Previsiones de uso del edificio objeto en un día laborable .....	79
4.4.	Definición de estructura ANN por cada planta y tiempo computacional ..	105
4.5.	Criterios de calibración horaria de la FEMP, la IPMVP y ASHRAE .....	106
5.1.	Datos calibración, precisión y resultados del modelo ANN: año 2019 ....	114



## Abreviaturas

ANN	...	Artificial Neural Networks
BAS	...	Building Automation System
BEPS	...	Building Energy Performance Simulation
EPBD	...	Energy Performance of Buildings Directive
ETL	...	Extract - Transform - Load
FLC	...	Fuzzy Logic Controller
GHG	...	Greenhouse Gas emissions
GIS	...	Geographic Information Systems
HP	...	Heat Pump
HVAC	...	Heating, Ventilation and Air Conditioning
LCC	...	Life Cycle Cost
MBE	...	Mean Bias Error
MLR	...	Multiple Linear Regression
MPC	...	Model Predictive Control
MS	...	European Union Member States
MSE	...	Mean Square Error
nZEB	...	nearly-Zero Energy Building
PCM	...	Phase Change Material
PID	...	Proportional-Integral-Derivative
PV	...	PhotoVoltaic system

## Abreviaturas

REHVA ...	Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations
RES ...	Renewable Energy Source
RMSE ...	Root Mean Square Error
STPV ...	Photovoltaic semi-transparent materials
TDNN ...	Time Delayed Neural Networks
TMY ...	Typical Meteorological Year
WSN ...	Wireless Sensor Network
WWR ...	Window to Wall Ratio



# Capítulo 1

## Introducción:

Antecedentes, motivaciones y  
definición de la problemática.

# Capítulo 1

## 1.- Introducción

### 1.1.- Antecedentes clave. Definición de la problemática.

La actual situación socioeconómica provocada por el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania, ha puesto aún más de manifiesto, la importancia de realizar un uso racional de la energía en todos sus niveles. Los distintos gobiernos de los países europeos, han tomado medidas políticas para minimizar el consumo energético en edificios públicos y locales comerciales. Sin embargo, las razones para reducir el consumo energético, no deberían ser únicamente geopolíticas. Existen múltiples motivos que justifican la necesidad de optimizar nuestro consumo energético, no solo por fundamentos económicos, medioambientales, sociales o simplemente racionales, sino también morales. Sin embargo, cualquier medida de control para obtener un ahorro energético, debería ser tomada en base a criterios científicos, aplicando para ello los conocimientos y herramientas disponibles en la actualidad.

La creciente preocupación en nuestros días, por el efecto invernadero y la evidencia de sus consecuencias sobre el cambio climático que se está padeciendo a nivel mundial, nos obliga a considerar su análisis para definir medidas para combatirlo. Este efecto invernadero, se debe en gran parte a las emisiones crecientes de CO<sub>2</sub>, por tanto minimizar las fuentes que originan dichos gases se ha convertido en una prioridad. Esta necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hace que sea necesario revisar la mayoría de las áreas de actividad humana, ya que somos la fuente principal de estas emisiones. En particular, el sector de la construcción es uno de sus principales responsables.

En la Directiva sobre eficiencia energética de edificios, denominada en inglés como *Energy Performance of Buildings Directive*, EPDB 2010/31/EU [1] se indicaba “Los edificios representan el 40% del consumo total de energía en la Unión. El sector se

*está expandiendo, lo que está destinado a aumentar su consumo de energía. Por lo tanto, la reducción del consumo de energía y el uso de energía de fuentes renovables en el sector de los edificios constituyen medidas importantes necesarias para reducir la dependencia energética de la Unión y las emisiones de gases de efecto invernadero*". En esta directiva, la Comisión Europea estableció el concepto nZEB (*nearly-Zero Energy Buildings*), traducido al castellano como "Edificios de consumo casi nulo", es decir edificios cuyo balance energético sea casi nulo y en su artículo 9 establece que los Estados miembros de la Unión Europea, cuyas siglas en inglés corresponden a *European Union Member States (MS)*, deben garantizar que todos los edificios nuevos, a partir del 31 de diciembre. 2020, tendrá que alcanzar los estándares nZEBs. Esto implica que estas construcciones deberán tener un alto rendimiento energético para alcanzar un balance energético casi nulo a través de una generación de energía in situ o cercana mediante Fuentes de Energía Renovable RES (*Renewable Energy Source*), como se define en su Art.2.

Dicha EPBD 2010/31 / EU [1] es una revisión de la EPBD 2002/91/EC [2], donde la Unión Europea intentó abordar este problema enfocando sus esfuerzos en mejorar el rendimiento energético de los edificios estableciendo los requisitos mínimos para los componentes de los edificios y los propios edificios, estableciendo el nZEB como un objetivo político. De hecho, para evitar un mayor aumento de los niveles de emisiones de Gases de Efecto Invernadero o GHG (*Greenhouse Gas emissions*), la Unión Europea decidió emitir varias directivas para sus MS con el objetivo de fomentar la reducción del consumo de energía y promover el uso de RES. Inicialmente se definió un marco para todos los MS con el fin de:

- ✓ reducir los GHG en un 20% en comparación con los niveles de 1990 en cada MS,
- ✓ aumentar la participación de RES en la combinación de energía de la Unión Europea al 20% (y una proporción de biocombustibles del 10% en combustibles para transporte),
- ✓ alcanzar el objetivo de eficiencia energética del 20% para 2020, reduciendo el consumo de energía primaria a través de la implementación de instrumentos y tecnologías de eficiencia energética.

Esto fue denominado objetivo 20/20/20. La legislación europea estableció con ella un marco transversal de ambiciosos objetivos para lograr altos rendimientos energéticos en los edificios. Posteriormente, las nuevas directivas han continuado en la misma dirección y han alcanzado objetivos aún más ambiciosos, como en 2012 con la EPBD 2012/27/EU [3] sobre eficiencia energética, que enfatizan aspectos clave como las redes inteligentes. También destaca otro nuevo marco, el 2013/2135(INI) [4] emitido en enero de 2014, donde se establecían objetivos en términos de clima y energía con horizonte 2030. Esta nueva directiva es aún más ambiciosa respecto a la anterior, ya que pretende reducir en un 40% los GHG con respecto a los niveles de 1990, así como mejorar la eficiencia energética en un 30% para lograr un objetivo vinculante de al menos el 27% de las energías renovables en toda la Unión Europea.

## 1.2.- Justificación de la investigación.

Estos marcos normativos europeos sobre la EPBD significan un cambio real en la forma actual de diseño (dentro de la disciplina de la arquitectura) y la construcción (a nivel de ingeniería), con sus correspondientes soluciones técnicas para la iluminación y el sistema HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*), es decir la gestión de la calefacción, ventilación y aire acondicionado del edificio. Alcanzar dichos estándares nZEB son un desafío importante, al que nos enfrentaremos en los próximos años y para el cual, se deben aplicar todos los sistemas disponibles a nuestro alcance para lograr dicho objetivo.

Cada edificio es único, no solo por su ubicación sino también por su orientación, geometría, dimensiones y distribución de las zonas, su caracterización según el tipo de construcción, los materiales de construcción utilizados en su envolvente, las condiciones circundantes o el uso de cada uno de sus espacios. Obviamente la envolvente del edificio es uno de los factores más importantes porque incluye las propiedades de los materiales de paredes y techos, las infiltraciones o el aislamiento de dicha envolvente, el ratio de superficies acristaladas contra opacas o WWR (*Window to Wall Ratio*), la ventilación natural, la orientación, la configuración del edificio, las áreas iluminadas por el día, la forma y la altura del



edificio, tal y como es explicado por Susorova et al. [5] y Lin et al. [6]. Por ejemplo, el reemplazar las ventanas para mejorar su aislamiento, como muestra en su estudio Aste et al. [7] o el uso de materiales de cambio de fase PCM (*Phase Change Material*) en el techo, tal como se desarrolló en la investigación de Chung et al. [8], mejoran el rendimiento térmico. De hecho, cualquier otra mejora sobre el aislamiento térmico de la envolvente de un edificio, es muy interesante, ya que pueden reducir las pérdidas térmicas del propio edificio. Pero en muchas situaciones, no siempre es posible realizar estas actuaciones bien por limitaciones físicas o económicas. Por fortuna, actualmente contamos con herramientas suficientes para realizar un modelizado correcto de cualquier edificio, pudiendo desarrollar una simulación apropiada así como analizar su eficiencia energética sin incurrir en elevados costes económicos y con un alto grado de correlación con la realidad.

Algunos ejemplos de estas herramientas de simulación del comportamiento energético del edificio o BEPS (*Building Energy Performance Simulation*), son *IDA-ICE*, *EnergyPlus*, *CPLEX* o *TRNSYS*. Estos *software* permiten analizar el rendimiento de energía en edificios tras su modelación y realizar distintas simulaciones sobre su consumo energético. Para el uso de estas aplicaciones son requeridos los datos históricos de las condiciones climatológicas y la información geoespacial de la ubicación de cada edificio, así como las condiciones operacionales en base al uso real del edificio, a condiciones estándar o en base a la legislación vigente. También es necesario contar con una previsión de los datos de ocupación, lo que podría ser una dificultad importante a la hora de establecer los patrones de uso del edificio.

Se debe tener en consideración que la climatización de edificios supone aproximadamente un 40% de su consumo energético total y puesto que se adoptan soluciones “estacionales” o bajo demanda, dicho consumo llega a ser entre un 30% y un 50% superior al requerido si se adoptase un sistema en función de sus necesidades “reales”, lo cual tiene un fuerte impacto sobretodo en edificios de uso público. Por todo ello, como mejor opción para presentar un enfoque del modelizado a través de un software BEPS y plantear nuestras hipótesis de trabajo, se ha establecido tomar como edificio objeto un edificio público de oficinas.

### 1.3.- Metodología aplicada en la investigación.

En primer lugar se ha desarrollado una labor de documentación, la cual ha servido para elaborar un Estado del Arte en base a artículos de investigación publicados en prestigiosas revistas científicas y congresos internacionales, que se centraban en los 3 temas analizados, incluido el concepto MPC (*Model Predictive Control*) explicado más adelante:

- ✓ edificios nZEB ..... *nZEB buildings*
- ✓ herramientas BEPS ... *BEPS Tools*
- ✓ edificio MPC ..... *MPC Building*

Dichos artículos se han elegido desde el año 2010, en base al número de las citas indicadas en *Google Scholar* (<https://scholar.google.com/>), dado fue un punto de inflexión como puede observarse en la gráfica representada en la Figura 1.1:

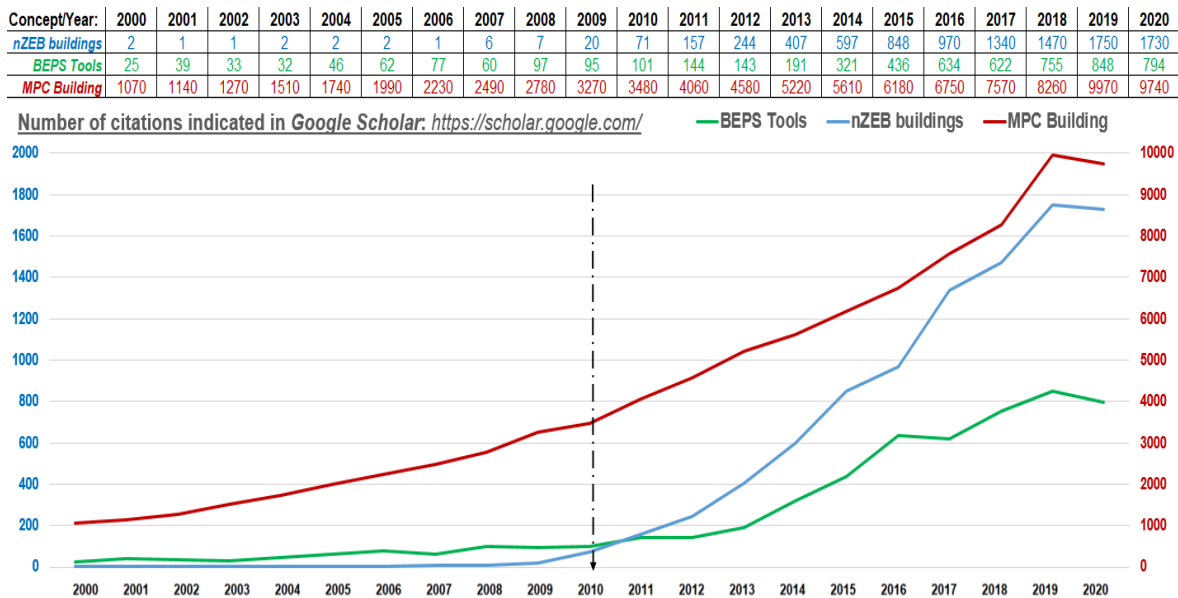


Figura 1.1. Numero citas indicadas en *Google Scholar* de nZEB, BEPS y MPC.

Sobre estos tres conceptos revisados en este trabajo: nZEB, BEPS y MPC, se ha profundizado desde un punto de vista teórico con el fin de obtener una visión global.

De esta forma, se han identificado los factores que pueden tener una mayor influencia y se han planteado posibles alternativas para disponer de datos de entrada que pudieran ser aplicados en un hipotético algoritmo.

Primeramente, se han considerado las condiciones climatológicas externas al edificio, las cuales en los países desarrollados son relativamente de fácil acceso a través de las bases de datos disponibles de organizaciones gubernamentales e Institutos Meteorológicos Nacionales o incluso de las propias estaciones meteorológicas ubicadas en aeropuertos o en algunas ciudades. También es posible utilizar aplicaciones, que permiten calcular la radiación solar incidente en superficies planas orientadas arbitrariamente en cualquier ubicación geográfica, por ejemplo, *Meteonorm* (<http://meteotest.ch>), y complementar esta información con otros parámetros climáticos, como temperaturas, nubosidad, radiación infrarroja, luminancia, presión atmosférica, grados diurnos de calentamiento, velocidad y dirección del viento, etc. En segundo lugar, se requiere la ubicación lo más exacta posible del edificio y su información geoespacial. Para ello existen herramientas como el Sistema de Información Geográfica o GIS (*Geographic Information Systems*), que nos permite obtener todos los datos requeridos. Y en tercer lugar, las consignas de confort demandadas que pueden estar establecidas o en su defecto sean las aplicadas en base a la legislación vigente.

Sin embargo, una de las mayores incertidumbres se presenta respecto a los datos de uso u ocupación esperados. Se trata de una información que genera una gran perturbación como lo indica Oldewurtel et al. [9], dado es muy complejo garantizar su fiabilidad al 100% solo a través de los cronogramas y pronósticos dados. Es factible tener disponibilidad de datos reales implementando una red de sensores que permita obtener datos en tiempo real de ocupación y condiciones climáticas (temperatura, humedad,...). De hecho hay investigaciones, como la descrita por Reena et al. [10] y Vaccarini et al. [11] donde se han empleado una red de sensores inalámbricos o WSN (*Wireless Sensor Network*) para conocer dicha información. Esta tecnología ayudaría notablemente a controlar la climatización englobándolo dentro del concepto de sistema de automatización de edificio o BAS (*Building Automation System*). Pero en el caso de un edificio de nueva construcción, no existe la disponibilidad de dichos datos y habría que plantear estimaciones. Por su parte, en el caso de edificios existentes donde no existe un sistema WSN, es necesario un periodo de recopilación de información para que se puedan realizar unas previsiones razonables en base al histórico de datos recopilados en función

del día de la semana, la hora del día, etc... Esta es otra de las razones por las que se ha considerado como edificio tipo, un edificio público de oficinas, cuyos horarios, previsiones de ocupación y uso pueden ser consideradas con un grado aceptable de fiabilidad.

Tras realizar este ejercicio teórico, se ha decidido aplicar a un caso real. En el desarrollo de esta tesis, se explican todos los pasos requeridos para realizar el modelizado de un edificio, concretamente se ha tomado como referencia un edificio público de oficinas: el Rectorado de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), ubicado en Leioa (Vizcaya) en el norte de España, y del cual se disponía de una importante batería de datos tras su rehabilitación entre los años 2015 y 2019.

Teniendo establecida una hoja de ruta con los factores influyentes e información abundante del edificio bajo estudio, se ha buscado una herramienta BEPS que permitiese su modelizado y simulación. Tras un análisis de las distintas opciones existentes, se ha seleccionado la aplicación *TRNSYS* versión 17 y con ella se han podido definir los factores críticos del sistema en un formato estandarizado.

Durante este proceso, se han detectado los inconvenientes y dificultades que supone este arduo trabajo que requiere un proceso de calibración con toma de datos reales para ganar precisión. Esto ha llevado a plantear la posibilidad de desarrollar un algoritmo a través de redes neuronales artificiales o ANN (*Artificial Neural Networks*) para obtener un modelo del edificio que permita replicar las temperaturas operativas de cada planta, así como su consumo energético.

#### **1.4.- Objetivo y esquema de la Tesis.**

Para contrastar los planteamientos expuestos en los apartados anteriores, se han aplicado dichos conceptos al edificio público objeto: el Rectorado de la Universidad del País Vasco. Para dicho trabajo se ha partido de las mediciones reales recogidas durante el periodo de su rehabilitación entre los años 2015 y 2019, con objeto de desarrollar un modelo y su correspondiente simulación, a fin de obtener una

predicción de la temperatura operativa y estimación del consumo energético de las distintas plantas de oficinas con un grado de precisión aceptable. Para ello, en el modelizado se han tenido en consideración los factores que tienen influencia en el comportamiento térmico del edificio.

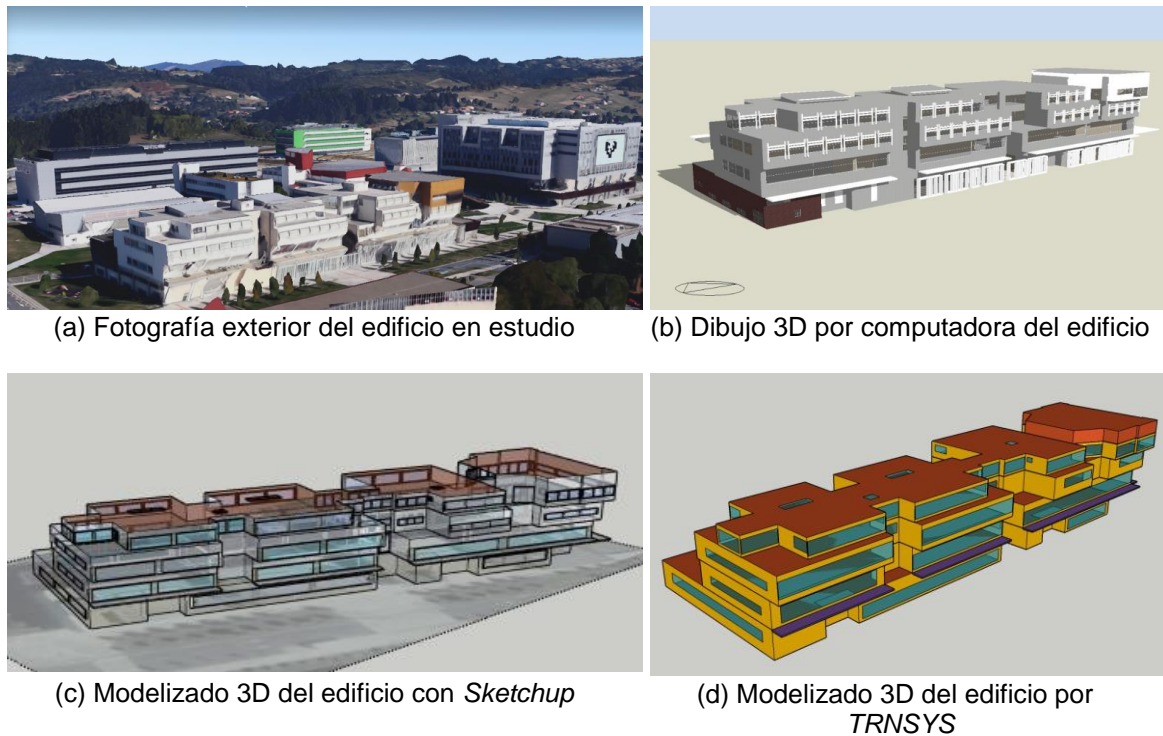


Figura 1.2. Edificio del Rectorado de la Universidad del País Vasco.

El objetivo es desarrollar un algoritmo que, disponiendo de unas previsiones de ocupación, factores de uso del inmueble y condiciones atmosféricas externas, permita estimar el consumo y temperaturas del edificio, para ayudar a la toma de decisiones a posteriori. Es decir, desarrollar un modelo basado en ANN, que permita obtener estimaciones aceptables de temperaturas operativas y consumo energético de cada planta de un edificio público de oficinas, porque ello podrá servir para optimizar la gestión de su sistema HVAC a través de un MPC.

La tesis se encuentra estructurada en cinco capítulos, donde se expone una primera parte teórica y posteriormente se pone en práctica con objeto de justificar y demostrar dicha teoría. El primer capítulo explica las inquietudes que nos llevan a analizar la situación actual y la necesidad de hacer frente al problema para mejorar la eficiencia energética en edificios públicos. En el segundo capítulo se

expone un Estado del Arte basado en distintas publicaciones relacionadas sobre el tema que han sido sintetizadas y analizadas. El tercer capítulo se centra en explicar el procedimiento de investigación e hipótesis planteada, justificando la metodología aplicada para optimizar el consumo energético en un edificio público tipo. El cuarto capítulo se dedica a explicar el proceso de modelizado y simulación, con todos los pasos realizados para llevar a cabo la hipótesis expuesta, sobre un edificio real que se ha elegido como referencia. En el capítulo quinto se analizan las estimaciones obtenidas a través de un modelo ANN en base a dicho edificio tipo, se muestran los resultados obtenidos y las correspondientes conclusiones de esta tesis, para la mejora de la eficiencia energética en los edificios públicos de oficinas. Y por último, se recoge la bibliografía utilizada y un apartado de Anexos, con aspectos que por extensión o interés ayudan para comprender esta tesis (como por ejemplo la información del modelo del edificio) y las publicaciones más destacadas a las que ha dado lugar esta tesis.

**Tesis:** Modelizado y simulación energética / térmica de un edificio de oficinas.

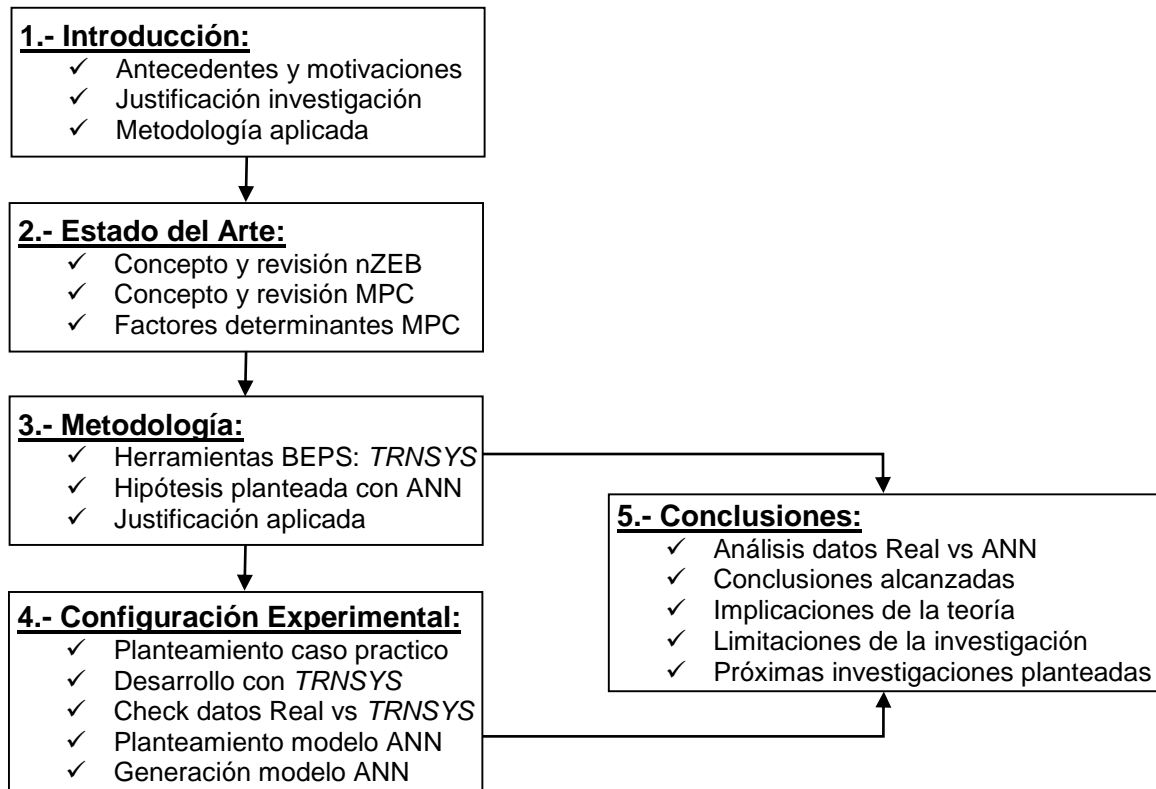


Figura 1.3. Esquema de bloques con la estructura de la Tesis.

## 1.5.- Conclusión.

Tenemos una obligación moral como sociedad civilizada de cuidar nuestro planeta y garantizar su futuro para próximas generaciones. Es por ello, que todos los esfuerzos que se realicen para minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub> (que producen el efecto invernadero) y los desarrollos que permitan optimizar el uso de la energía, especialmente si su origen son combustibles fósiles, son cruciales. En el ámbito de la construcción se plantean varias opciones para alcanzar los estándares nZEB. Las estrategias más clásicas afectan especialmente a mejorar las características de aislamiento de la envolvente de un edificio, pero existen otras opciones muy interesantes tanto a nivel tecnológico como económico. Por todo ello, en este trabajo se considera que existe una brecha de investigación que puede permitir un avance interesante en la gestión energética a fin de facilitar el objetivo de alcanzar edificios nZEB, especialmente en edificios públicos de oficinas existentes, aplicando modelos ANN para su modelizado y simulación, complementando los actuales desarrollos con herramientas BEPS clásicas o en lugar de éstos.

# Capítulo 2

## Estado del Arte:

Resumen y análisis de publicaciones estudiadas.



## Capítulo 2

### 2.- Estado del Arte

#### 2.1.- Introducción.

La degradación ambiental, con su consecuente riesgo de desastres naturales, requiere una acción rápida porque nosotros, los seres humanos, somos los principales culpables de esta situación. El objetivo más importante es disminuir los gases de CO<sub>2</sub> producidos, porque nuestro planeta se enfrenta a un cambio climático sin precedentes y con consecuencias imprevistas por el efecto invernadero.

De entre todas las actividades humanas, el sector de la construcción es uno de los principales responsables dado el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> que genera. Según la EPBD 2010/31 / UE [1] sobre rendimiento energético, los edificios representan el 40% del consumo total de energía en la Unión Europea. Además, es un sector que se está expandiendo, con lo que probablemente aumentará su consumo de energía. Por tanto, la reducción del consumo de energía y el uso de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la edificación, constituyen medidas relevantes, necesarias para reducir la dependencia energética de la Unión Europea y las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta directiva estableció un nuevo término, el nZEB, publicado por el Parlamento Europeo y cuyo concepto es explicado más ampliamente, en el subapartado 2.2.1.

En cuanto a la utilización de herramientas BEPS y sistemas MPC para ayudar a la consecución de nZEB, diversos autores como Adhikari, Aste, Attia, Barthelmes, Becchio, Cellura, Cornaro, Guillén, Kang, Karlessi, Keltsch, Kurnitski, Loukaidou, Monteiro, Murano, Péan o Zangheri con sus correspondientes equipos, han revisado en diferentes artículos dichos conceptos: nZEB - BEPS – MPC, y han analizado los principales factores a tener en consideración. Por ejemplo, la ubicación de cada edificio y también su entorno, que incluye condiciones de

topografía, vegetación, distancia entre edificios y el uso de espacios abiertos, son factores muy importantes y deben ser tenidos en cuenta por los arquitectos en la fase de diseño. Tampoco hay que olvidar las condiciones climáticas a las que se verá sometida la propia edificación, que podrían cambiar muy rápidamente en función de la estación del año y el momento del día. Con la implementación de estrategias pasivas adecuadas durante la fase de diseño, los siguientes pasos, como la definición del sistema HVAC y sus posibles alternativas de control, serán mucho más efectivos.

Para determinar las estrategias activas, es fundamental considerar un análisis económico: por ejemplo, evaluando la selección del tipo de sistema HVAC y las RES (en castellano, Fuentes de Energía Renovables) más apropiadas, para asegurar los niveles de confort requeridos, así como para reducir el impacto del clima dentro del edificio. Además, el comportamiento de la ocupación es otro punto crucial. Un conjunto tan variado de factores, aconseja la definición de estrategias de forma multidisciplinar, de manera que se puedan alcanzar altos niveles de eficiencia energética a fin de lograr los estándares nZEB.

Por las razones anteriores, teniendo en cuenta los diferentes avances tecnológicos actualmente disponibles, los BEPS y el MPC también podrían mejorar la eficiencia de la gestión del edificio. El uso de estas herramientas en la actualidad, no está muy extendido en la mayoría de inmuebles, y sin embargo, pueden tener un gran potencial. Su costo económico puede ser relativamente bajo para obtener resultados satisfactorios, si lo comparamos con otros enfoques pasivos mencionados anteriormente. Como posteriormente se demuestra en el apartado 2.2.4, se puede afirmar que el MPC es una herramienta interesante, ya que su uso permite optimizar el consumo energético de los edificios. Por ejemplo, para gestionar el enfriamiento o la calefacción mediante pronósticos de ocupación y clima, accesibles desde varias aplicaciones de modelizado existentes o servicios meteorológicos.

Una de las principales contribuciones de esta tesis, es hacer una revisión integral del estado del arte sobre el alcance de los nZEB y los MPC, proporcionando un marco estructurado para comprender y profundizar dichos conceptos. En este

capítulo, se realiza una exposición sobre la distinta bibliografía existente a fin de explicar e ilustrar los conceptos nZEB, BEPS y MPC, para concluir sobre el potencial de la aplicación de las ANN o Redes Neuronales Artificiales, dentro de las herramientas BEPS y MPC.

## **2.2.- Revisión de la Literatura: Resumen y análisis realizado.**

En la recopilación documental de esta tesis se ha ido elaborando un Estado de Arte siguiendo un proceso secuencial, iniciándolo con el concepto nZEB y una revisión de la Literatura sobre dicho concepto, con el fin de obtener una visión global y detectar si existe alguna brecha de investigación. Esto ha permitido concluir que las herramientas BEPS tienen un potencial interesante en este campo, consecuentemente se ha realizado otra revisión de la Literatura sobre modelizado y simulación de edificios con dichas herramientas. Este análisis ha posibilitado detectar el interés por el concepto MPC, donde también se han analizado los principales factores que tienen influencia en un sistema MPC aplicados a la climatización de inmuebles. Finalizando este periplo con una revisión de la Literatura MPC aplicada expresamente a la climatización de edificios.

### **2.2.1.- Concepto nZEB.**

Como se indica en el Capítulo 1 de Introducción, la EPBD 2010/31 / EU [1] estableció el concepto denominado nZEB y estableció en su Art.9 que los MS (*European Union Member States*) deben asegurar que todas las nuevas construcciones de edificios, después del 31 de diciembre de 2020, deben alcanzar todos los principios clave de los nZEB. Esto significa que estos nuevos edificios contarán con sistemas de alta eficiencia energética, ya que la bajísima demanda energética que requiere un nZEB, tendrá que ser cubierta principalmente por la producción de energía cercana o in situ a partir de RES, tal y como establece su Art.2.

La EPBD 2010/31 / EU [1] es una actualización de la EPBD 2002/91 / EC [2]. Los MS intentaron abordar este desafío general, centrando sus esfuerzos en todos los

componentes que afectan al rendimiento de un edificio e introduciendo unos requisitos mínimos para mejorar el rendimiento energético, estableciendo nZEB como un objetivo de política. De hecho, para evitar un mayor crecimiento en los niveles de emisiones de GHG, los MS decidieron emitir varias directivas con el objetivo de fomentar la reducción del consumo de energía y promover el uso de RES. Inicialmente se definió un marco para todos los MS con el fin de:

- reducir los gases de efecto invernadero al menos un 20% por debajo de los niveles de 1990 para 2020,
- aumentar la participación de las RES en el mix energético general al 20% dentro de los MS (y una participación de los biocombustibles del 10% en los combustibles para el transporte),
- alcanzar el objetivo de eficiencia energética del 20% para 2020, reduciendo el consumo de energía primaria, mediante la implementación de instrumentos y tecnologías de eficiencia energética.

Esto se denominó Objetivo 20/20/20. La declaración de política europea incluía unas directrices transversales de objetivos desafiantes, para lograr una alta eficiencia energética en los edificios. Posteriormente, las nuevas directrices se mantuvieron en consonancia con la misma política de trabajo y plantearon objetivos aún más ambiciosos, como los previstos sobre rendimiento energético en la directiva EPBD 2012/27/EU [3] en 2012, que subraya cuestiones clave tales como las redes inteligentes. Otro factor clave fue destacado en enero de 2014, dentro de la directiva 2013/2135(INI) [4], donde se establecieron objetivos en términos de energía y clima de cara al 2030. Esta nueva directriz busca disminuir en un 40% los GHG en comparación con los niveles alcanzados en 1990, así como mejorar el rendimiento energético en un 30% para alcanzar un objetivo vinculante de al menos el 27% de las fuentes de energía renovables en todos los MS.

Estos marcos regulatorios europeos sobre la EPBD suponen un cambio real de la forma actual de diseñar (dentro de la disciplina de Arquitectura) y edificar (a nivel de Ingeniería) con sistemas técnicos: desde el HVAC a la iluminación. Además, se definió una metodología sobre niveles de coste óptimo para los estándares de eficiencia energética, tanto para edificios nuevos como existentes. Instruyendo a

los MS, sobre la forma de establecer estándares mínimos y mantenerlos alejados de los altos costos de inversión.

Varias investigaciones analizan y sugieren ciertas mejoras reportadas desde otro ángulo más técnico, a nivel de ingeniería, comparando las ventajas de diferentes sistemas HVAC usando RES, como Kurnitski, Kang o Karlessi que con sus correspondientes equipos han revisado estos aspectos en diferentes artículos [12-14]. O con otro enfoque a nivel de usuario final, siguiendo distintas estrategias de confort, como Péan et al. [15]. U otros autores como Guillén, Keltsch, Cellura, Monteiro, Becchio, Adhikari junto con sus equipos, que han otorgado más relevancia a las cuestiones económicas [16-21] y examinan el retorno económico de diversas alternativas tratando de buscar la mejor solución a nivel de costo-efectividad. Todas estas investigaciones, si bien son muy interesantes y meritorias, ya que abren la oportunidad de seguir desarrollándose en su campo, se considera están limitadas porque no abordan la cuestión desde un punto de vista más holístico, con un enfoque multidisciplinar, teniendo en cuenta que distintas áreas pueden ayudar a mejorar la eficiencia energética. Una gestión más global debería ayudar a alcanzar la consecución del objetivo de una forma más rápida, económica y sencilla.

El concepto nZEB está estudiado en muchas investigaciones, pero como se ha indicado, lo hacen desde puntos de vista parciales de disciplinas específicas: desarrollo de nuevos materiales aislantes térmicos, viabilidad económica, soluciones a nivel de ingeniería, soluciones arquitectónicas, comparativas, etc.

Una recopilación de estos artículos, se explican brevemente y se enumeran en la Tabla 2.1, incluyendo la siguiente información:

- Autor (año publicación) y título del artículo.
- Tipo de edificio analizado (vivienda residencial o edificio público).
- Contribución y estrategia a nivel de envolvente del edificio (características, comparativas o nuevas estrategias pasivas).
- Si se consideró el comportamiento de ocupación o el análisis de los requisitos de confort.



- Tipo de Sistema HVAC, destacando el uso de fuentes renovables (Solar Térmica, Sistemas Fotovoltaicos: en inglés PV (*Photovoltaic system*) o Bomba de Calor: en inglés HP (*Heat Pump*) y también el tipo de emisor (suelo o paneles radiante, *fancoil* o radiador).
- Cómo se definió la gestión energética del edificio, si han utilizado alguna red WSN, si aplicó MPC o algún programa de simulación, indicando en este caso cual se utilizó.
- Y finalmente, país o región donde se implementaron.

Tabla 2.1. Revisión y análisis de la literatura sobre nZEB

Ref.	Autores	Título del artículo	Tipo Edificio		Envolvente Edificio		Ocupación		Tipo Sistema HVAC		Gestión energética del edificio			País / Región
			Vivienda	Publico	Contribución	Estrategia Pasiva:	Conducta	Requisito	Fuente Renovable	Emisor	WSN	MPC	Programa Simulación	
[12]	Kurnitski et al. (2011)	“Cost optimal and nearly zero energy performance ...”	Si	No	Comparativa sistema HVAC	Aislante y ventanas	---	---	Solar térmica, HP vs Caldera	Suelo radiante	No	No	IDA-ICE	Estonia
[13]	Kang et al. (2017)	“Development of an nZEB Life Cycle Cost Assessment”	No	Si	Comparativa sistema HVAC	Aislante y ventanas	---	---	---	---	---	---	Energyplus	Corea
[14]	Karlessi et al. (2017)	“The concept of smart and nZEB buildings”	Si	Si	Comparativa Edificio Intelig.	Inercia térmica	---	Si	Solar térmica, HP & PVs	Suelo radiante	No	Si	MyLeaf, Idea Fresco	Grecia, Creta, Italia
[15]	Péan et al. (2017)	“Impact of Demand-Side Management on Thermal”	Si	No	Análisis eficiencia	Inercia térmica	Estrategia confort	Criterio confort	HP & PVs	Radiador	No	Si	TRNSYS	España
[16]	Guillén et al. (2017)	“Comfort settings and energy demand for residential nZEB”	Si	No	Análisis eficiencia	---	---	Confort térmico	---	---	No	No	TRNSYS	Francia, España, Italia
[17]	Keltsch et al. (2017)	“nZEB Standard for Non-Residential buildings”	No	Si	Análisis eficiencia	Inercia térmica	No	No	Geo, Solar, HP y PV	---	No	No	No	Alemania
[18]	Cellura et al. (2017)	“Redesign of a Rural Building in a Heritage Site”	No	Si	Análisis eficiencia	Materiales aislantes	Si	Si	HP y PVs	Fan coil	No	No	TRNSYS	Italia
[19]	Monteiro et al. (2013)	“Application of the nZEB methodology in retrofiting”	Si	No	Análisis eficiencia	Envolvente térmica	---	---	Solar térmica, HP y PVs	---	No	No	No	Portugal
[20]	Becchio et al. (2015)	“Cost optimality assessment of a single-family house”	Si	No	Análisis eficiencia	Materiales aislantes	---	---	Ventilación, HP y PVs	Suelo radiante	No	No	Energyplus	Italia
[21]	Adhikari et al. (2012)	“Net Zero Energy Buildings: Expense or Investment?”	Si	No	Análisis eficiencia	---	---	---	HP de tierra y PVs	Suelo radiante	No	No	Energyplus	Italia
[22]	Loukaidou et al. (2017)	“nZEBs: Cost-Optimal Analysis of Building”	Si	Si	Características Envlovente	Aislante y ventanas	Si	No	Caldera y HP	---	No	No	Energyplus	Chipre
[23]	Aste et al. (2017)	“Multi-functional Integrated System for Energy retrofit”	Si	No	Características envolvente	Aislante y ventanas	Si	No	HP Aire-Agua y PVs	Suelo radiante	No	No	Energyplus TRNSYS	Italia
[24]	Barthelmes et al. (2014)	“The Influence of Energy Targets and Economic ...”	Si	No	Comparativa aislamiento	Materiales aislantes	---	---	HP Agua y Ventilacion	Paneles radiante	No	No	Energyplus	Italia
[25]	Murano et al. (2017)	“The significant imbalance of nZEB energy need”	Si	Si	Características envolvente	Aislante y sombreado	---	---	---	---	No	No	Design Builder	Italia
[26]	Cornaro et al. (2017)	“Outdoor Characterization of PCMs and Assessment”	No	Si	Características envolvente	PCM	Si	Si	No (caldera+ enfriador)	Fan coil	No	No	IDA-ICE environment	Italia
[27]	Cornaro et al. (2017)	“Energy Saving Assessment of Semi-Transparent PVs”	No	Si	Características envolvente	STPV	No	No	PVs	---	No	No	IDA-ICE (EQUA)	Italia
[28]	Paoletti et al. (2017)	“nZEBs: An Overview of the Main Construction Features”	Si	Si	Análisis eficiencia	Materiales aislantes	---	---	Solar térmica, PVs	---	No	No	No	Europa
[29]	Attia et al. (2017)	“Overview and future challenges of nZEB design”	Si	Si	Desafios de diseño	Refrigeración pasiva	---	---	Solar térmica, HP y PVs	Si	---	---	---	Sur Europa
[30]	Zangheri et al. (2017)	“Identification of cost-optimal and nZEB refurbishment”	Si	Si	Evaluación comparativa	---	---	Niveles Confort	Sistema PVs	---	---	---	---	Europa

Una sinopsis de los artículos de investigación mostrados en la Tabla 2.1, es la siguiente: Kurnitski et al. [12] determinaron los niveles de rendimiento energético óptimos y nZEB según la definición de la REHVA (*Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations*); Kang et al. [13] desarrollaron un método para optimizar la sostenibilidad económica del Coste del Ciclo de Vida, denominado en inglés como LCC (*Life Cycle Cost*), para implementar tecnologías de ahorro de energía en las primeras etapas del diseño de edificios; Karlessi et al. [14] demostraron los fundamentos del proceso de diseño integrado y vincularon el método con tecnologías de construcción inteligente y además también presentaron algunas metodologías de eficiencia energética y otras soluciones pioneras implementadas a nivel de construcción; Péan et al. [15] llevaron a cabo un trabajo de simulación para analizar el impacto de una estrategia de control de la gestión energética del lado de la demanda en una vivienda nZEB reformada; Guillén et al. [16] realizaron simulaciones para comprobar el éxito de los criterios de confort en relación al consumo energético en la climatización de viviendas nZEB siguiendo el estándar *Passivhaus* (Casa Pasiva); Keltsch et al. [17] investigaron el potencial de la norma nZEB mediante el estudio de diez casos de edificios no residenciales con diversos usos en Baviera; Cellura et al. [18] explicaron la experiencia de rediseñar un edificio rural ya existente ubicado en Sicilia, realizaron una auditoría energética en este edificio y se indagó a fondo sobre sus consumos energéticos para validar un modelo orientado a la consecución del objetivo nZEB; Monteiro et al. [19] evaluaron la correcta implementación del proceso nZEB en la actualización de una casa típica portuguesa construida en 1950; Becchio et al. [20] introdujeron una guía para diseñar soluciones de sistemas técnicos de referencia y envolvente de edificios para nZEB residenciales; Adhikari et al. [21] mostraron que un edificio de energía cero puede suponer un coste de inversión asequible, especialmente si se integra con instalaciones fotovoltaicas; Loukaidou et al. [22] realizaron pruebas en diferentes edificios de celdas de ensayo para un análisis de rentabilidad de las características de la envolvente del edificio; Aste et al. [23] evaluaron la eficiencia energética de un sistema multifuncional integrado diseñado para satisfacer los requisitos de HVAC utilizando RES en edificios residenciales; Barthelmes et al. [24] analizaron un edificio tipo de una casa unifamiliar de nueva construcción a partir de la fase de diseño preliminar del proyecto, utilizando la metodología de costo óptimo;



Murano et al. [25] investigaron en qué condiciones y en qué medida se produce un gran desequilibrio de las necesidades energéticas de calefacción frente a refrigeración en diferentes tipos de edificios ubicados en varias zonas climáticas italianas; Cornaro et al. [26] caracterizaron un panel PCM comercial y, a continuación, a partir de sus datos experimentales, validaron una herramienta computarizada PCM para aplicaciones de análisis de energía y ambiente interior; de nuevo, Cornaro et al. [27] presentaron una evaluación de los posibles ahorros de energía de cuatro tipos distintos de materiales fotovoltaicos semitransparentes STPV (*Photovoltaic semi-transparent materials*) con respecto a un sistema de doble vidrio convencional; Paoletti et al. [28] realizaron una descripción general de las características clave de la construcción en 17 países de Europa, tanto para edificios residenciales como públicos, verificando el comportamiento sobre la eficiencia energética de materiales aislantes junto con el uso de energías renovables como solar térmica y fotovoltaica; Attia et al. [29], también hicieron una descripción general e identificaron los desafíos futuros del diseño nZEB en el sur de Europa; y por último, Zangheri et al. [30] definieron niveles de rehabilitación nZEB y coste óptimos para diferentes tipologías de edificios y varias condiciones climáticas significativas en toda Europa.

### **2.2.2.- Revisión de literatura sobre modelizado y simulación de edificios.**

Tras esta revisión de investigaciones sobre nZEB, se ha continuado profundizado en las distintas estrategias existentes, porque la energía consumida por los sistemas de climatización en los edificios es muy elevada. Por tanto es el origen de gran parte del total de GHG, como se indica en diferentes estudios e informes estadísticos como “*Why buildings*” [31] del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, “*UE Energy in Figures*”[32] de la Unión Europea y “*Monthly Energy Review*” [33] de Estados Unidos. Evidentemente, estas cifras confirman la necesidad de potenciar la eficacia, tanto a nivel económico como técnico, de la gestión de la calefacción y refrigeración en los edificios.

Además, cabe destacar que varias investigaciones realizadas en los últimos años, los desarrollos tecnológicos en las aplicaciones de modelizado de edificios y las bases de datos existentes permiten tener un alto grado de confianza: Ruparathna

et al. [34] examinaron distintas iniciativas para mejorar el rendimiento energético de los edificios y definieron una hoja de ruta para mejorar el rendimiento energético en edificios oficiales y comerciales; Harish et al. [35] revisaron el control y el modelizado de los sistemas de energía en la construcción; Roberts [36] analizó acciones pasivas y activas implementadas en construcciones existentes; Chandel et al. [37] mostraron normas, estatutos, códigos y medidas de comportamiento energético; Santos et al. [38] expusieron los factores que influyen en el sistema energético de cualquier edificio y Kneifel [39] calculó el LCC para hacer rentables varias mejoras de eficiencia energética en nuevos edificios comerciales.

Considerando que todo edificio es único, no solo por su emplazamiento, orientación o condiciones circundantes, sino también por sus dimensiones, geometría, los materiales de construcción utilizados en su envolvente, la distribución de cada área, el uso de cada espacio y su tipo de construcción, es indudable, que la envolvente de un edificio es uno de los factores más importantes debido a que tiene en cuenta las características de la parte opaca y de las carpinterías, las fugas de aire o la estanqueidad de la envolvente, la configuración del edificio, la forma y altura del edificio, la orientación, el WWR, áreas de luz diurna, ventilación natural, características de los materiales de las paredes y techos, como lo explican Susorova et al. [5] y Lin et al. [6]. Numerosos investigadores han propuesto medidas para aumentar la eficiencia térmica del edificio. Entre ellos, una posibilidad es reemplazar las ventanas con un mejor aislamiento como indicaban Aste et al. [7] o utilizar PCM en el techo como desarrollaron Chung et al. [8]. Cualquier mejora en las envolventes opacas de un edificio, en cuanto a su aislamiento térmico, es muy importante porque pueden modificar su inercia térmica y reducir significativamente sus pérdidas de energía. Para ello, un modelizado previo del edificio ayuda a realizar un correcto análisis y desarrollo. Al mismo tiempo, permite evaluar diferentes alternativas para obtener el resultado deseado, reduciendo el tiempo y la inversión requerida para ello.

Existen diferentes herramientas BEPS que permiten modelar y realizar simulaciones energéticas de edificios como *IDA-ICE*, *EnergyPlus*, *CPLEX* o *TRNSYS*. La Tabla 2.2 muestra a modo ilustrativo, varias investigaciones realizadas al respecto, con su autor, título y la herramienta BEPS aplicada.

Tabla 2.2. Revisión y análisis de la literatura sobre herramientas BEPS

Ref.	Autores	Título del artículo	BEPS aplicado
[12]	Kurnitski et al. (2011)	“Cost optimal and nZEB energy performance calculations for residential buildings”	IDA-ICE
[13]	Kang et al. (2017)	“Development of an nZEB life cycle cost assessment tool for fast decision making in the early design phase”	EnergyPlus
[15]	Péan et al. (2017)	“Impact of management on thermal comfort vs energy costs in a residential nZEB”	TRNSYS
[16]	Guillén et al. (2017)	“Comfort settings and energy demand for residential nZEB in warm climates”	TRNSYS
[18]	Cellura et al. (2017)	“Redesign of a rural building in a Heritage site in Italy: towards the nZEB target”	TRNSYS
[20]	Becchio et al. (2015)	“Cost optimality assessment of a single-family house for the nZEB target”	EnergyPlus
[21]	Adhikari et al. (2012)	“nZEBs: Expense or Investment?”	EnergyPlus
[22]	Loukaidou et al. (2017)	“nZEBs: Cost-optimal analysis of building envelope characteristics”	EnergyPlus
[23]	Aste et al. (2017)	“Multi-functional integrated system for energy retrofit of existing buildings: a solution towards nZEB standards”	TRNSYS
[24]	Barthelmes et al. (2014)	“The influence of energy targets and economic concerns in design strategies for a residential nZEB”	EnergyPlus
[25]	Murano et al. (2017)	“The significant imbalance of nZEB energy needs for heating and cooling in Italian climatic zones”	EnergyPlus
[26]	Cornaro et al. (2017)	“Outdoor characterization of PCM and assessment of their energy saving potential to reach nZEB”	IDA-ICE
[27]	Cornaro et al. (2017)	“Energy saving assessment of STPV modules Integrated into nZEB”	IDA-ICE
[35]	Harish et al. (2015)	“A review on modeling and simulation of building energy systems”	TRNSYS
[40]	Magnier et al. (2010)	“Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and ANN”	TRNSYS
[41]	De Boeck et al. (2015)	“A literature review about improving the energy performance of residential buildings”	TRNSYS
[42]	Valdiserri et al. (2015)	“Retrofit strategies applied to a tertiary building assisted by TRNSYS”	TRNSYS
[43]	Vocale et al. (2015)	“Space heating load estimation procedure for CHP systems sizing”	TRNSYS
[44]	Carrascal et al. (2016)	“Optimization of the heating system use in aged public buildings via MPC”	TRNSYS
[45]	Sarbu et al. (2016)	“Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room ...”	TRNSYS
[46]	Sarbu et al. (2016)	“Advances in geothermal energy, using ground-source heat pump systems for heating/cooling of buildings”	TRNSYS
[47]	Harish et al. (2016)	“Reduced order modeling of a building energy system model through an optimization routine”	TRNSYS
[48]	Ogando et al. (2017)	“Energy modeling and automated calibrations of ancient building simulations: a school”	TRNSYS
[49]	Baglivo et al. (2017)	“Envelope design optimization by thermal modeling of a building in a warm climate”	TRNSYS
[50]	González et al. (2018)	“Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in nZEBs”	CPLEX
[51]	Bozkaya et al. (2018)	“A dynamic building and aquifer co-simulation method for thermal imbalance investigation”	TRNSYS
[52]	Palme et al. (2018)	“UWG-TRNSYS Simulation coupling for urban building energy modeling”	TRNSYS
[53]	Iturriaga et al. (2018)	“Optimal renovation of buildings towards the nZEB standard”	TRNSYS
[54]	Yoon et al. (2018)	“Strategies for virtual in-situ sensor calibration in building energy systems”	TRNSYS

La sinopsis de los artículos de investigación desarrollados por Kurnitski et al. [12]; Kang et al. [13]; Péan et al. [15]; Guillén et al. [16]; Cellura et al. [18]; Becchio et al. [20]; Adhikari et al. [21]; Loukaidou et al. [22]; Aste et al. [23]; Barthelmes et al. [24]; Murano et al. [25] y Cornaro et al. [26, 27], ha sido descrita en el apartado anterior. El artículo de Harish et al. [35] ha sido indicado en la introducción de este apartado. Respecto al resto de investigaciones indicadas en la Tabla 2.2: Magnier et al. [40] describieron una metodología de optimización basada en una combinación de una ANN y un algoritmo evolutivo multiobjetivo para la optimización del confort térmico y consumo energético en una vivienda residencial; De Boeck et al. [41] proporcionaron una revisión actualizada de la literatura sobre la mejora del rendimiento energético de los edificios residenciales destacando la aplicación de la herramienta *TRNSYS*; Valdiserri et al. [42] determinaron la demanda térmica de referencia para un edificio terciario a través de un diseño de envolvente térmica mejorado y ventanas de alta eficiencia, en dos zonas climáticas diferentes de Italia (Bologna y Roma), utilizando para el cálculo de optimización energética la herramienta de simulación *TRNSYS*; Vocale et al. [43] implementaron un procedimiento de estimación de cargas horarias de un edificio de uso hospitalario, utilizando únicamente como variable de entrada la temperatura del aire de bulbo seco, comparando la demanda de calefacción obtenida mediante *TRNSYS*; Carrascal et al. [44] desarrollaron un MPC sobre una vivienda residencial de un bloque social construido en Bilbao (Norte de España) en la década de los 60; Sarbu et al. [45, 46] analizaron los sistemas de HP basados en compresión de vapor, también estudiaron teóricamente distintos sistemas de bomba de calor y compararon sus principales parámetros de rendimiento, con sistemas de calefacción por radiadores y suelo radiante, a través de mediciones in situ en una sala de oficinas y simulaciones obtenidas con el software *TRNSYS*; Harish et al. [47] validaron numéricamente un modelo de referencia, desarrollando un algoritmo de diferencias finitas para un circuito RC, aplicable a distintos elementos de construcción de un edificio; Ogando et al. [48] desarrollaron un caso real de aplicación de modelos energéticos y calibraciones deterministas, en una escuela primaria ubicada en Galicia (Noroeste de España); Baglivo et al. [49] modelaron varias opciones de diseño y diferentes configuraciones sobre un prototipo de construcción situado en un clima cálido, para comparar su comportamiento térmico

y optimizar el diseño de su envolvente; González et al. [50] evaluaron un modelo de optimización para evaluar RES in situ compuesto por mini-turbinas eólicas, energía solar fotovoltaica y un almacenamiento con batería que fue probado en un edificio real en Portugal para minimizar sus costos de energía anuales; Bozkaya et al. [51] exploraron un método de co-simulación dinámica con tres parámetros de aislamiento diferentes, para investigar la influencia del desequilibrio térmico de los sistemas de almacenamiento de energía térmica en un acuífero y la carga térmica del edificio; Palme et al. [52] mostraron una nueva metodología de simulación considerando los efectos del microclima urbano; a través de un modelo climático *Urban Weather Generator*; Iturriaga et al. [53] realizaron un trabajo de simulación con un modelo de *Mixed-Integer Linear Programming*, implementándolo en un edificio existente ubicado en el País Vasco (Norte de España) y donde se adoptaron acciones de ahorro energético, para optimizar el requerimiento energético en la rehabilitación de edificios existentes, a fin alcanzar el estándar nZEB o Yoon et al. [54] que propusieron varias estrategias para la calibración de sensores virtuales in situ utilizando métodos bayesianos para un edificio completo.

Las herramientas BEPS se pueden utilizar durante la fase de diseño, pero también son muy útiles durante otras fases del ciclo de vida de los edificios porque permiten optimizar el consumo energético, especialmente en los procesos de rehabilitación de edificios. El concepto BEPS consiste en determinar el comportamiento energético del edificio mediante modelos matemáticos creados en base a principios físicos fundamentales a través de una herramienta informática. Sha et al. [55] sugirieron un proceso de trabajo para una herramienta de diseño de mejora de HVAC integrados y también explicaron los siguientes conceptos:

- *White box* (caja blanca) o modelizado físico: un método donde se crea una serie de modelos matemáticos basándose en datos físicos previos de masa, ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, transferencia de calor,... Estas técnicas físicas están relacionadas con propiedades termodinámicas para el modelizado y su análisis en profundidad, los cuales utilizan conceptos físicos para resolver cálculos que representan los fenómenos físicos de la transferencia de calor. Se usa comúnmente en el sector HVAC.

- *Black box* (caja negra) o modelo basado en datos: un método que se crea a partir de grandes cantidades de datos empíricos obtenidos del mundo real. Se aplican modelos matemáticos y técnicas estadísticas para predecir valores futuros mediante un método algorítmico que se utiliza sobre una gran cantidad de datos. Estos métodos no requieren conocer la naturaleza intrínseca del fenómeno que está sucediendo en el mundo real porque están enmarcados en una función obtenida únicamente de registros de muestras físicas y que explican el comportamiento de un sistema en particular. Entre los modelos de caja negra utilizados en el campo de la predicción energética en edificios se encuentran: MLR (*Multiple Linear Regression*), cuya traducción sería regresión lineal múltiple o también conocido como modelo de regresión estadística, la *Support Vector Machine* o máquina de vectores de soporte, y la ANN. Uno de los modelos más utilizados de este tipo, es este último, la ANN, que es un enfoque de aprendizaje automático que toma la interrelación entre las variables de entrada y salida. Su principio está inspirado en el cerebro humano.
- *Grey box* (caja gris) o modelo híbrido: utiliza tanto el método de caja negra como el de caja blanca. Este sistema se basa en leyes físicas, aunque algunos parámetros del proceso se estiman a partir de modelos basados en datos. Dentro de este método, las redes resistencia-condensador (un símil con un circuito eléctrico para representar la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio), son muy utilizadas para estimar cargas de climatización.

Después del proceso de estimación del modelo, el siguiente paso es la toma de decisiones, el análisis de incertidumbre y la optimización. Entre los métodos existentes se encuentran: los algoritmos genéticos, la programación dinámica, los sistemas expertos y la simulación Monte Carlo [55].

En los últimos años se están llevando a cabo con éxito diferentes implementaciones de ANN en este ámbito. Entre ellas cabe destacar: Du et al. [56] en una casa rural en China, donde se registraron durante un año el consumo de energía y los parámetros del ambiente interior y se compararon con los resultados de la simulación anual obtenidos; Escandon et al. [57] desarrollaron un modelo sustituto

para evaluar el comportamiento térmico del parque de viviendas sociales en España; Ciulla et al. [58] implementaron una simulación paramétrica para evaluar el comportamiento energético de 195 escenarios y justificaron el uso del método MLR; Hussain et al. [59] presentaron el modelizado energético con una ANN no lineal-autoregresivo con entrada exógena en una planta de enfriamiento; Mehboob [60] desarrolló una optimización del ajuste paramétrico haciendo que el modelo ANN sea óptimo para cinco regiones climáticas y Nasruddin et al. [61] abordaron la optimización de múltioobjetivo de un sistema de dos enfriadoras, que muestra el potencial de este método para determinar el funcionamiento adecuado de los sistemas HVAC de alta tecnología en una vivienda.

También se observa que los avances tecnológicos realizados en estos últimos años han proporcionado herramientas de modelizado y simulación con una precisión aceptable. Tras analizar todas las investigaciones anteriores, se considera que los sistemas de control convencionales, basados en controladores Proporcional-Integral-Derivativo cuya denominación en inglés es PID (*Proportional-Integral-Derivative*) o estrategias similares, **no** son una solución óptima para la gestión de un control climático de un edificio, donde existen situaciones cambiantes y un alto riesgo de incertidumbre.

Teniendo en cuenta la variedad de estrategias existentes para realizar un “control inteligente”, que se han introducido en la última parte del siglo XX, se ha reflexionado sobre las técnicas avanzadas de control más eficientes en la investigación de los últimos diez años en climatización de edificios, tal como lo justifican Drgoña et al. [62]. En este sentido, los sistemas MPC (Control Predictivo por Modelo en castellano), tienen un amplio abanico transversal de aplicaciones por lo que se está impulsando su desarrollo en áreas industriales para todo tipo de aplicaciones. En aplicaciones de climatización en edificios, el MPC es actualmente la opción más extendida porque aunque existe un entorno cambiante, los perfiles de uso se pueden establecer y / o predecir. No hace muchos años sus requisitos computacionales eran una desventaja significativa para su uso. Sin embargo, el desarrollo logrado hasta la fecha en herramientas de hardware y software ha superado este inconveniente.

Con lo cual, actualmente se dispone de todos los elementos para realizar una implementación exitosa. Además, es posible disponer de previsiones meteorológicas y de ocupación relativamente buenas. Las ganancias internas se pueden calcular mediante herramientas BEPS y se conocen las especificaciones de confort requeridas. Por todo ello, se ha considerado de interés realizar un análisis del estado del arte actual en los sistemas MPC aplicados a la climatización de edificios.

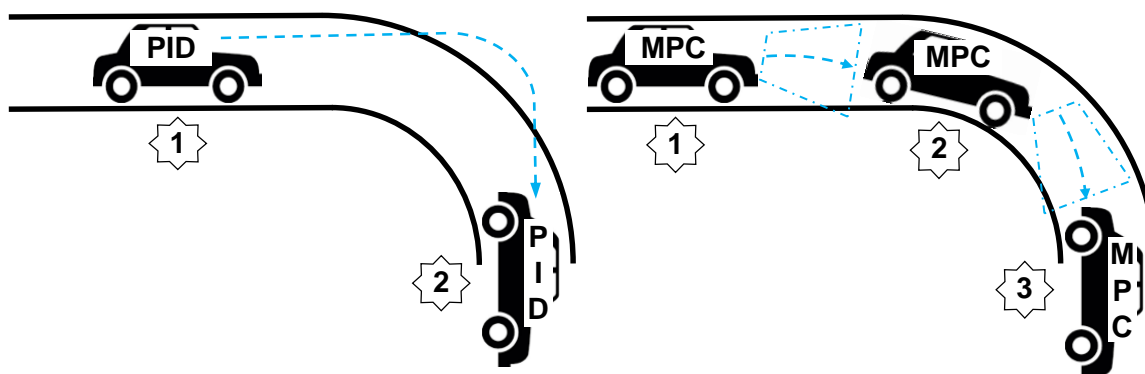
### **2.2.3.- Concepto MPC.**

Para explicarlo gráficamente, podemos considerar por ejemplo, cuando conducimos un vehículo para movernos. La variabilidad en nuestro consumo de combustible dependerá de distintas variables como el diseño del vehículo, el tipo de coche, su peso, su aerodinámica, estado de sus neumáticos, etc. Lo mismo ocurre con los edificios con los efectos de su diseño, orientación, tamaño, materiales aislantes, forma y tipo de ventanas, etc. En el ejemplo del coche, el consumo también variará según la ruta por donde conduzcamos, el tipo de vía (autovía, montaña o vías urbanas), así como la cantidad de pasajeros, el peso del equipaje o las condiciones del tráfico, el estado de los semáforos, controles, atascos y una interminable lista de situaciones impredecibles que no podemos controlar. Para los edificios, estos factores son las condiciones climáticas y de ocupación. A pesar de este escenario complejo, podemos tener una gran influencia en el consumo en función de las condiciones de nuestro vehículo, el estado de los neumáticos o el tipo de ruedas. Incluso podemos mejorar su aerodinámica con spoilers, difusores, faldones laterales y cortavientos delanteros para minimizar dicho consumo. Esto mismo puede ser trasladado a los edificios, mejorando su envolvente con nuevos materiales aislantes o sustituyendo sus ventanas.

También deberíamos tener una "conducción verde" (menos deportiva y aprovechando la inercia de nuestro vehículo), disminuyendo así el consumo de combustible. Porque evitar una frenada brusca en un semáforo en rojo o elegir las carreteras con las condiciones más ventajosas tiene un impacto muy positivo en el consumo final de nuestro coche. Muchas veces se utiliza un vehículo para realizar viajes regulares. Es decir, casi todos los días la gente acude a sus puestos de



trabajo por una ruta que en base a su experiencia se considera la mejor por ser la más cómoda o rápida. ¿Qué pasaría si se sigue la misma estrategia en un edificio?. Es decir, ¿qué pasaría si se gestiona un algoritmo adecuado con el que se pueda controlar el sistema HVAC optimizando la inercia térmica del edificio, teniendo también como base una previsión de ocupación y clima?. La Figura 2.1 intenta ilustrar con un ejemplo clásico las diferencias entre estrategias que se utilizan normalmente. Tanto los controladores PID como MPC conocen la trayectoria de referencia del sistema (en nuestro ejemplo la carretera). Pero los sistemas PID realizan la acción de control una vez que se ha ejecutado y medido el error, es decir, una vez que el coche ha pasado una curva, sin posibilidad de prevenirlo. Mientras, los controladores MPC tienen un modelo del vehículo (cómo es la dinámica del sistema) y hacen un cálculo de varias acciones de control aplicando solo la primera de ellas, teniendo en cuenta cómo afectarán al control del coche durante varios muestreos. Eso podría ayudar a establecer la “ruta” más adecuada para disminuir el consumo al máximo y en los horarios más económicos.



(a) Controlador Proporcional-Integral-Derivado (PID)    (b) Modelo de Control Predictivo (MPC)

Figura 2.1. Ejemplo para explicar gráficamente el concepto de MPC.

Continuando con el ejemplo del coche, si alguien conduce un coche por la ruta que teóricamente es la más adecuada y además el conductor conoce el estado del tráfico e incluso, cuando ve una luz roja en un semáforo permite tanto como sea posible que el vehículo se acerque con inercia propia, sin acelerar o apenas usar el freno, serían sorprendentes los rangos de consumo que puede alcanzar. En este trabajo, se considera que se puede establecer un paralelismo con el consumo de energía en los edificios y, por tanto, considerar al MPC como parte integral de los nZEB.

#### **2.2.4.- Revisión de literatura MPC aplicada en climatización de edificios.**

Se han revisado diversos artículos sobre MPC que han sido publicados en la literatura reciente, con el objetivo de mostrar la situación actual en este campo y los enfoques alternativos en cuanto a uso. En esta descripción general, se puede observar el desarrollo de técnicas basadas en MPC para la climatización de edificios en los últimos años. Existen numerosas investigaciones, desde finales de los años 80 hasta la actualidad, que estudian la mejor forma de elaborar una estrategia basada en MPC, las cuales minimizan el consumo de energía en base a los numerosos estudios e implementaciones que se han realizado. Algunas de estas investigaciones más significativas, se muestran en la Tabla 2.3, donde se analizan con la siguiente estructura:

- Autor (año publicación) y título del artículo.
- Tipo de edificio analizado (vivienda residencial o edificio público).
- Contribución o mejora a nivel de control predictivo, y si la investigación ha considerado el comportamiento de la inercia térmica del edificio en estudio.
- Si se consideró el comportamiento de ocupación o el análisis de los requisitos de confort.
- Tipo de datos meteorológicos gestionados (reales o previsiones).
- Si se consideró el comportamiento de ocupación y el análisis de los requisitos de comodidad.
- Si la investigación ha considerado la fuente de energía y el tipo de emisor utilizado.
- Cómo se definió la gestión energética del edificio, y si han utilizado el registro de datos reales a través de una red inalámbrica WSN o algún programa de simulación.

Tabla 2.3. Revisión y análisis de la literatura sobre MPC

Ref.	Autores	Título del artículo	Tipo Edificio		Estrategia aplicada		Datos tiempo		Ocupación		Tipo Sistema		Gestión energética	
			Vivienda	Publico	Contribución / Mejora	Inercia Térmica	Real	Previsión	Conducta	Requisito	Fuente	Emisor	WSN	Simulación
[63]	Garcia et al. (1989)	“Model predictive control: Theory and practice—A survey”	---	---	Control Predictivo	Si	No	Si	No	No	No	No	No	Si
[64]	Cho et al. (2003)	“Predictive control operated by radiant floor heating systems”	---	---	Implementación MPC	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si
[65]	Oldewurtel et al. (2010)	“Climate control using stochastic model predictive control ...”	---	---	Estrategia estocástica	Si	No	Si	No	No	No	No	No	Si
[66]	Oldewurtel et al. (2011)	“Use of model predictive control and weather forecasts ...”	---	---	Implementación MPC	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	Si
[67]	Široký et al. (2011)	“Experimental analysis of model predictive control ...”	Si	No	Implementación MPC	Si	Si	Si	No	Si	No	No	Si	Si
[68]	Cigler et al. (2013)	“Beyond theory: the challenge of implementing MPC in building”	No	Si	Implementación MPC	Si	Si	Si	No	No	No	Si	Si	Si
[69]	Fabietti et al. (2014)	“Control of HVAC Systems via Explicit and Implicit MPC ...”	No	Si	Implementación MPC	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si
[70]	Xiwang et al. (2014)	“Review of building energy modeling for control and ...”	---	---	Modelizado y predicción	Si	No	Si	No	No	No	No	No	Si
[71]	De Coninck et al. (2015)	“Toolbox for development and validation of grey-box building”	---	---	Control Predictivo	Si	No	Si	No	No	No	No	No	Si
[72]	De Coninck et al. (2016)	“Practical implementation of model predictive control”	No	Si	Implementación MPC	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si
[11]	Vaccarini et al. (2016)	“Model predictive energy control of ventilation for underground”	No	Si	MPC & WSN	No	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	Si
[44]	Carrascal et al. (2016)	“Heating System use in aged buildings via MPC”	Si	No	Implementación MPC	Si	No	Si	No	Si	No	No	No	Si
[73]	Hu et al. (2016)	“Building Model Identification during Regular Operation ...”	No	Si	Implementación MPC	Si	Si	Si	No	Si	No	No	Si	Si
[74]	Ascione et al. (2016)	“Simulation-based model predictive control ...”	Si	No	Implementación MPC	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si
[75]	Sturzenegger et al. (2016)	“Model Predictive Climate Control of a Swiss Office ...”	No	Si	Implementación MPC	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si
[76]	Collotta et al. (2014)	“A Dynamic Fuzzy Controller to Meet Thermal Comfort ...”	---	---	Dynamic Fuzzy controller	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si
[77]	Marvuglia et al. (2014)	“Coupling a neural network predictor and a fuzzy logic ...”	No	Si	Fuzzy Logic Controller	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si
[78]	Dragomir et al. (2015)	“Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems as a Strategy”	---	---	Neuro-Fuzzy Systems	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Si
[79]	Ghadi et al. (2015)	“Development of advanced fuzzy logic controllers ...”	No	Si	Fuzzy Logic Controller	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	No	Si

A continuación se presenta una breve sinopsis de los artículos de investigación mostrados en la Tabla 2.3: García et al. [63] demostraron que el MPC es una alternativa de control precisa porque considera tanto la ocupación como la predicción del clima para lograr una gestión energética óptima; Cho et al. [64] utilizaron y verificaron varios enfoques para mejorar el rendimiento energético de la calefacción discontinua por medio de instalaciones de suelo radiante, demostrando que el enfoque MPC podría lograr ahorros del 10% al 12% del requerimiento de energía; Oldewurtel et al. [65, 66] desarrolló una gestión climática aplicando un MPC estocástico; Široký et al. [67] realizaron una prueba experimental de MPC para el aire acondicionado de edificios; Cigler et al. [68] aplicó una estrategia MPC sobre la climatización de un edificio; Fabietti et al. [69] operaron sistemas HVAC a través de MPC implícito y explícito; Xiwang et al. [70] describieron las técnicas de modelizado de energía de edificios para su funcionamiento y control; De Coninck et al. [71, 72] crearon una caja de herramientas, para obtener modelos de caja gris aceptados para edificios y llevó a cabo una aplicación real de MPC.

Ha habido varias implementaciones de algoritmos MPC en distintos tipos de edificios y emplazamientos: Vaccarini et al. [11] en una estación de metro en Barcelona (España), donde implementaron una WSN para averiguar los registros reales de temperatura, ocupación, humedad, etc. Otra aplicación de una WSN la proporcionaron Reena et al. [10] en su investigación donde monitorizaron la ocupación real mediante por sensores que utilizaron para gestionar el ambiente interior (temperatura del aire, humedad,...) en un BAS o edificio inteligente. Una solución con WSN, puede considerarse como el enfoque de trabajo más adecuado para prevenir perturbaciones relacionadas con cualquier cambio repentino de ocupación y datos de temperatura. Según lo expuesto por Oldewurtel et al. [9], los datos de ocupación son un factor muy sensible para lograr una óptima gestión en la climatización de un edificio. Además, estos sensores ahora pueden ser autorecargables (concepto *Harvester*) por lo que deberían ser más fáciles de instalar y mantener. Al organizar una WSN, los registros reales podrían proporcionarse al control operativo para aplicar incluso pequeños ajustes al sistema HVAC en tiempo real. De esta forma, se mejora el rendimiento porque el sistema de gestión puede dar una respuesta más adecuada a los requisitos de confort

exigidos, y optimizar el consumo energético del edificio. Otras aplicaciones del MPC son las de Carrascal et al. [44] en un edificio de apartamentos en el norte de España: Bilbao - País Vasco; Hu et al. [73] en un edificio estatal en Estados Unidos: California; Ascione et al. [74] en un edificio de viviendas en Italia: Nápoles y Sturzenegger et al. [75] en un bloque de oficinas en Suiza: Allschwil. Todas estas investigaciones se han desarrollado con éxito, sin embargo, requieren personal experto y tienen una alta complejidad porque el modelo requiere una alta precisión. No hay que olvidar que los edificios se encuentran en un entorno cambiante, con alta variabilidad y sobre el que es muy complejo establecer reglas fijas. Eso lleva a la necesidad de desarrollar un enfoque con capacidad de aprendizaje que permita modelar sistemas complejos. En este sentido, las arquitecturas basadas en ANN y controladores de lógica difusa denominados FLC (*Fuzzy Logic Controllers*), también podrían considerarse una opción muy interesante.

Por estas razones, se han examinado varias referencias donde se investigan distintos enfoques para procesar los datos y el control del sistema HVAC. El objetivo es obtener las condiciones de confort requeridas pero minimizando los requerimientos energéticos en el edificio: Collotta et al. [76] presentaron una ANN para verificar las condiciones climáticas interiores que se utilizaron para proporcionar datos a un FLC; Marvuglia et al. [77] realizaron un modelo neuro-difuso vinculado para el ajuste automático y dinámico de las condiciones climáticas interiores; Dragomir et al. [78] hicieron una identificación de los criterios más comúnmente utilizados e involucrados en cada paso del proceso de modelizado, con el fin de determinar una herramienta de pronóstico óptima con ANN y Ghadi et al. [79] diseñaron una actualización de FLC en un BAS.

### **2.2.5.- Factores determinantes en MPC para la climatización de edificios.**

Como se mencionó anteriormente, el MPC se considera actualmente el método avanzado de control más utilizado para la climatización de edificios. Por lo tanto, resulta conveniente revisar los principales factores a tener en cuenta a la hora de aplicar estrategias basadas en MPC. La información geoespacial de la ubicación de un edificio y los datos históricos de las condiciones climatológicas, así como los datos de previsión de ocupación y las condiciones de confort exigidas por la



legislación vigente, son la base para definir unos sistemas HVAC adecuados. Asimismo, un planteamiento de modelizado de edificios, mediante un software de simulación del comportamiento energético para aprovechar su inercia térmica, es muy interesante para optimizar el consumo energético.

**Datos Meteorológicos:** En los países desarrollados, es fácil acceder a las bases de datos disponibles de las organizaciones gubernamentales y los Institutos Meteorológicos Nacionales, según lo indicado por Oldewurtel et al. [66] y Široký et al. [67], e incluso desde estaciones meteorológicas ubicadas en aeropuertos o ciudades, según lo expuesto por Hu et al. [73] y Collotta et al. [76]. También es posible utilizar aplicaciones, que permiten calcular la radiación solar incidente sobre superficies planas orientadas arbitrariamente en cualquier emplazamiento geográfico, por ejemplo: *EnergyPlus* fue utilizado por Cigler et al. [68] y Ascione et al. [74] u otros sitios web como en Fabietti et al. [69].

Esta información se puede complementar con otros parámetros climáticos como la temperatura del aire, humedad, luminancia, radiación infrarroja, presión atmosférica, nubosidad, dirección y velocidad del viento, etc., relacionados con la ubicación del edificio. Una gran proporción de estos datos está disponible a través de sistemas GIS. Esto permite tener una base de datos para recopilar datos históricos con diferentes rangos de temperaturas y humedades, para definir distintos patrones en base a los cuales crear diferentes “recetas”, con el objetivo de gestionar un sistema HVAC para un edificio específico.

**Información de ocupación y uso de un edificio:** El número de personas o la densidad de ocupación, el tipo de actividades que se realizan en un edificio, la duración de la estancia, el tipo y la potencia de los equipos de iluminación u otros dispositivos eléctricos como hardware informático, o el control de las infiltraciones de aire por la importancia de la renovación de aire, son requisitos vitales para realizar una simulación energética adecuada de un edificio, como se indica en Roberts [36]. Además, es importante determinar su modo de funcionamiento, intermitente o continuo, y también un horario de uso en distintas épocas del año.

Es difícil estar completamente seguro de esta información. No obstante, se pueden conocer algunos estándares basados en el nivel de confort requerido y la tasa de

ocupación esperada, como señalan Oldewurtel et al. [9]. Esta información será aún más útil si también incluye la posibilidad de realizar ajustes basados en registros reales, capturados por sensores de campo en tiempo real en un BAS, como lo plantean Reena et al. [10]. Estos detectores nos permiten conocer las condiciones operativas en el momento para operar el sistema HVAC en base a condiciones reales y una demanda óptima.

**Información de diseño del sistema HVAC:** El funcionamiento y tipo de sistemas HVAC, así como su capacidad y su eficiencia para alcanzar el estándar de confort solicitado, minimizando el consumo energético requerido para ello, son fundamentales. Conjuntamente, si el objetivo es reducir el impacto económico, los combustibles necesarios o las tarifas de electricidad en el sistema HVAC, también deben considerarse como una restricción sustancial. Considerando todos los posibles sistemas HVAC, por ejemplo, un suelo radiante debidamente aislado sería un sistema altamente efectivo como es explicado por Sarbu et al. [45, 46] y Hawila et al. [80]. Esto permite la climatización de distintas zonas de un edificio a una temperatura preestablecida en función de la ocupación y la previsión meteorológica. También es posible aprovechar los beneficios de la masa térmica de la envolvente del edificio, para reducir los costes energéticos en función de la tarifa energética aplicable en función de una previsión.

Asimismo, podría ser planteable implementar una WSN que permita conocer en línea los datos reales de ocupación y temperatura, para equilibrar los requisitos en el sitio en distintos períodos. Igualmente, considerar el uso de HP, es decir, una Bomba de Calor de alto rendimiento con el fin de ajustar las necesidades de confort requeridas de una manera más rápida, evitando cualquier perturbación en el ambiente interior del edificio. Estas HP de alta eficiencia tienen la capacidad de corregir las desviaciones causadas por cambios repentinos en la ocupación y / o demandas de comodidad. Actualmente, las HP logran una alta eficiencia y un gran rendimiento como lo indican Tsai et al. [81] y Ruelens et al. [82]. Tanto las HP de alta eficiencia como los suelos radiantes que utilizan colectores solares de agua están habilitados para enfriar o calentar el lugar donde son instalados. Por tanto, con estos dispositivos es posible climatizar un edificio en cualquier época del año.

### **2.3.- Conclusiones del Estado del Arte realizado.**

En esta tesis, el primer concepto explicado ha sido el concepto nZEB, que como se ha indicado, es un referente creado por los MS para que todas las nuevas construcciones de edificio alcancen unos estándares de alta eficiencia energética. Posteriormente, a través del análisis de diversas investigaciones científicas publicadas por Adhikari, Aste, Attia, Barthelmes, Becchio, Cellura, Cornaro, Guillén, Kang, Karlessi, Keltsch, Kurnitski, Loukaidou, Monteiro, Murano, Péan o Zangheri con sus correspondientes equipos, se han examinado diferentes factores como el tipo de inmueble investigado, como se ha actuado sobre la envolvente, el enfoque aplicado a la influencia de los ocupantes, o el tipo de sistema HVAC y gestión energética aplicada al edificio, que tienen una alta influencia para alcanzar el concepto nZEB. Normalmente, las investigaciones se han realizado considerando algunos de estos factores de forma independiente. Es decir, solo se ha considerado un único enfoque el cual puede tener una influencia importante de por sí, pero no se ha considerado desde un punto de vista integral, considerando las distintas interacciones de todos los factores destacados que tienen influencia. Por ejemplo, realizando mejoras en las características de la envolvente con un nuevo material aislante o reemplazando ventanas cuyas características de estanqueidad, permeabilidad o transmitancia térmica sean óptimas, es factible alcanzar mejores resultados de consumo energético cara al concepto nZEB. Asimismo, existen diversos estudios que han considerado el comportamiento de ocupación y los requisitos de confort como se ha indicado en el apartado 2.2.5. Y también se han revisado investigaciones donde han realizado un análisis de las instalaciones de HVAC y en ocasiones también se ha revisado la gestión energética del edificio.

En opinión del autor, todas estas investigaciones son muy valiosas ya que brindan la oportunidad de desarrollar aún más la eficiencia energética en los edificios, pero es necesario abordar el tema con una perspectiva más amplia. En este sentido, es deseable un tratamiento holístico. Es decir, un enfoque multidisciplinar que tenga en cuenta diferentes áreas de actuación (soluciones arquitectónicas, desarrollo de materiales aislantes, mejoras en el nivel de ingeniería, viabilidad económica, etc.) y que facilite la consecución del objetivo de mejorar la eficiencia energética de los edificios.



A continuación, se han revisado las herramientas BEPS, dado se ha demostrado pueden ser muy interesantes para aplicarlas en la climatización de edificios, con el objetivo de mejorar su eficiencia energética minimizando su consumo energético y en consecuencia sus emisiones de CO<sub>2</sub>. Para ello, se han analizado una serie de artículos recientes sobre herramientas BEPS y se han explicado tres métodos que permiten modelar la eficiencia energética de un edificio. En primer lugar, se ha introducido el método de *White box* o caja blanca (basado en modelos físicos). Este método es más apropiado en contextos en los que se dispone de información sobre el diseño del edificio y en particular, en la fase de diseño del nuevo edificio, pero no siempre es posible su uso por sus altos requerimientos de información y datos. Una segunda opción es el método de *Black box* o caja negra (basado en aprendizaje automático), que se basa en el procesamiento estadístico de datos de confort y consumo de energía en el edificio, por eso se han destacado algunas investigaciones sobre ANN. El método *Black box* es muy útil cuando se tienen todas las condiciones reales de funcionamiento y el consumo real de energía del edificio pero poca información sobre su diseño. Sin embargo, puede resultar computacionalmente costoso. Ambos métodos dependen en gran medida de la cantidad y calidad de los datos disponibles. En comparación con los métodos físicos, un modelo *Black box* demanda menos datos de construcción y puede parecer más sencillo de realizar pero no es útil cuando se requiere una comprensión de los fenómenos físicos. Por último, el modelo *Grey box* o caja gris (con un enfoque híbrido de los 2 modelos anteriores) que se basa tanto en métodos físicos para modelar el comportamiento térmico de un edificio como en herramientas de aprendizaje automático para alcanzar una optimización de los parámetros de entrada. Por lo tanto, el método *Grey box* parece ser un enfoque muy prometedor en la actualidad porque puede considerarse como un buen equilibrio entre ambos tipos de modelos. Este enfoque es muy útil cuando se puede obtener un modelo físico de una construcción pero no está terminado o no puede ofrecer una garantía suficiente, y por tanto, debe complementarse. Especialmente indicada en edificaciones ya existentes, donde en general es complicado modelar un patrón físico “perfecto” debido a la falta de datos, bien porque parte de la información de los materiales empleados no está disponible o simplemente hayan podido sufrir una degradación de sus características.

Finalmente, se ha explicado el concepto de MPC y se han mostrado sus principales factores a la hora de aplicarlo en la climatización de edificios. El MPC se considera una excelente opción de control para optimizar el consumo energético partiendo de las previsiones de ocupación y clima. Esta conclusión está respaldada por una serie de artículos revisados como se ha indicado anteriormente en el apartado 2.2.4, en los que se han llevado a cabo implementaciones de algoritmos MPC en distintos tipos y/o emplazamientos de edificios. Por ello, utilizar las herramientas BEPS y aplicar MPC en la climatización de edificios propiciaría cambiar la filosofía de trabajo actual. Se plantea por tanto, desarrollar en primer lugar un trabajo de análisis y modelizado del edificio por técnicos especializados, para posteriormente plantear un sistema de gestión energético que optimice el consumo energético del HVAC.

En vez de iniciar laboriosos y en la mayoría de las ocasiones costosos trabajos que implican modificar la envolvente del edificio en cuestión, se plantea la posibilidad de otras alternativas. Se considera factible alcanzar niveles de ahorro similares a las actuaciones sobre la envolvente con la adecuada optimización del consumo energético de los sistemas HVAC, a través de la gestión de las previsiones de ocupación, grado de uso y condiciones ambientales externas. En realidad, este planteamiento puede ser complementario con el convencional, el cual plantea mejorar la envolvente del edificio con medidas pasivas. En definitiva, es posible combinar ambas técnicas para alcanzar mayores ahorros energéticos y por consiguiente reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Concluyendo, desde nuestro punto de vista, es crucial promover la mejora del rendimiento energético en los edificios existentes, porque su tasa actual de renovación o reemplazo es muy baja. En la rehabilitación de edificios es todavía más recomendable utilizar las nuevas herramientas MPC y BEPS, junto con las soluciones convencionales: materiales aislantes, mejoras arquitectónicas y de ingeniería, porque como se ha demostrado, este uso combinado es una buena forma de alcanzar los objetivos de reducción del consumo energético. En esta investigación se ha planteado cómo construir, validar y aplicar un modelo *Black box* o caja negra: tipo ANN, que pueda sustituir con garantías a un modelo *White box* o caja blanca a través de una herramienta BEPS muy extendida, como es la



aplicación *TRNSYS*. Para ello, se han desarrollado ambos procesos a fin poder establecer comparativas y valorar las ventajas o inconvenientes que supondría.

Y finalmente, se recomienda comenzar por los edificios públicos de oficinas por dos razones fundamentales:

- ✓ porque requieren de un alto consumo energético para su climatización y
- ✓ porque sus datos de predicción (previsiones de ocupación y requisitos operativos) son más sencillos de conocer.

# Capítulo 3

## Metodología:

Procedimiento de investigación e hipótesis planteadas.

## Capítulo 3

### 3.- Metodología

#### 3.1.- Introducción.

En el sector de la construcción europeo, el reglamento de nZEB está definido en la Directiva para edificios EPBD 2010/31 / UE [1] que afecta a todos los edificios nuevos después del 31 de diciembre de 2020. Sin embargo, el gran número de edificios existentes que aún no cumplen con estas normas así como su lento proceso de renovación, como se indica en las investigaciones desarrolladas por D'Agostino et al. [83] y Ruparathna et al. [34], hacen necesario proponer alternativas para poder alcanzar estos objetivos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a través de otras soluciones. En el caso de los edificios existentes, las estrategias de renovación más comunes involucran el reemplazo de ventanas como lo sugieren Aste et al. [7] y / o la mejora del aislamiento de su envolvente incluso con el desarrollo de nuevos materiales como en el caso de Chung et al. [8].

Para explorar otras alternativas, se ha considerado utilizar filosofías de trabajo aplicadas en el ámbito industrial, donde durante años se ha buscado la optimización de sus procesos para lograr la máxima eficiencia, como sugieren Drgoña et al. [62]. Para cumplir con este objetivo, las herramientas BEPS son una opción muy interesante y se consideran pueden ser de gran ayuda para encontrar soluciones que permitan optimizar el consumo energético con una relativa baja inversión económica dado no requieren llevar a cabo grandes obras de albañilería, con necesidad de una gran cantidad de mano de obra, materiales y tiempo. Estas herramientas BEPS permiten a través de un hardware no excesivamente avanzado, aplicaciones informáticas cada vez más evolucionadas y personal cualificado, modelizar cualquier edificio para optimizar tanto su envolvente como sus sistemas

HVAC con el objetivo de minimizar su consumo energético cumpliendo los requerimientos de confort que estén establecidos.

Sin embargo, estos desarrollos requieren un gran esfuerzo dada la enorme cantidad de datos que se recogen en campo (temperaturas y humedad) así como el consumo de energía correspondiente (electricidad y/o gas). Posteriormente, dichos datos deben ser procesados en un programa informático BEPS, con el objetivo de conseguir una simulación de las características de la envolvente, las condiciones de uso del edificio y su comportamiento térmico con un grado de precisión adecuado. Es habitual también que se requiera un proceso de calibración para depurar la información, con objeto de que los datos de la simulación se correspondan con la información real medida en el edificio, con un margen de error aceptable. Se debe tener en consideración que en los edificios existentes, en ocasiones no es fácil obtener sus especificaciones técnicas. O quizás, dichas especificaciones han podido sufrir cambios por el deterioro de los materiales utilizados tras el transcurso de los años, o simplemente se han realizado modificaciones que no han sido recogidas en la documentación técnica del edificio. Todo ello puede provocar que las características teóricas consideradas no sean fiables, y sea necesario realizar las correcciones obtenidas a través del proceso de calibración. Además, los propios usuarios del edificio provocan perturbaciones, simplemente por el simple hecho de dejar una ventana abierta, lo que cambia por completo el comportamiento térmico del sistema. Otra serie de consideraciones como la cantidad de personas presentes, el número de equipos informáticos o luces que están operativos en el edificio en cada momento, tienen asimismo una fuerte influencia en el resultado, tal y como indican Oldewurtel et al. [9].

Estas tareas son laboriosas y deben ser realizadas por técnicos cualificados. Además, en la captación de datos es fundamental tener conocimientos específicos de la instrumentación y la adquisición de datos. Estos dispositivos de medición van desde sensores de temperatura y humedad hasta registradores para los consumos energéticos de gas y electricidad en las distintas zonas del edificio. De igual manera, para el siguiente paso es necesario tener un conocimiento específico de las herramientas informáticas utilizadas para procesar dichos datos y su correspondiente simulación. Este conocimiento específico, la elevada cantidad de

tiempo requerido e incluso el coste económico de las licencias de los programas informáticos y equipos, pueden representar un gran inconveniente.

Por tanto, en esta investigación se ha propuesto simplificar y reducir el coste económico del proceso expuesto. Para ello se ha desarrollado un algoritmo basado en ANN con el objetivo de obtener las temperaturas operativas y el consumo energético de las diferentes plantas de un edificio de oficinas. En concreto, el edificio del Rectorado de la Universidad del País Vasco ubicado en Leioa (Vizcaya) en el norte de España, a partir de la información recogida durante los años 2016, 2017, 2018 y 2019 en dicho edificio, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos durante el proceso de recopilación de información y reflejada en los Estados de Arte desarrollados anteriormente.

### 3.2.- Justificación de la metodología aplicada.

La filosofía *Kaizen* es la más extendida en las empresas avanzadas del sector industrial. En dicha filosofía la mejora continua es un pilar fundamental y para ello se deben analizar el origen de las posibles ineficacias bajo el concepto *Muda* (los 7 grandes desperdicios). Cada uno de estas pérdidas o mermas típicas en el ámbito de la industria tienen una correlación en la climatización de un edificio si es considerado como un proceso industrial:

- **Defectos:** En un primer análisis se puede relacionar con los posibles deterioros que se encuentran en cualquier instalación de climatización, dado que ocasiona unas pérdidas energéticas con sus consiguientes pérdidas de eficacia. Obviamente un mantenimiento apropiado del sistema de climatización, ayudara a minimizar su consumo energético. Es por tanto importante, realizar un cuidado de dichas instalaciones. Se deben mantener los equipos HVAC en perfecto estado para que su rendimiento sea el óptimo y reparar cualquier fuga que se produzca en el circuito de tuberías o en las instalaciones existentes. Además, es importante conservar en el mejor estado posible los aislamientos de la envolvente para evitar pérdidas o lo que es lo mismo el grado de infiltración del edificio. Para todo ello, en una

fase de análisis y diseño previo, se pueden prevenir en gran medida cierto tipo de defectos o minimizar el riesgo de que estos se puedan producir.

- **Sobreproducción:** En muchas ocasiones, los sistemas de calefacción tradicionales lo componen grandes calderas con depósitos preparados para suministrar agua caliente cuando se requiera, pero también supone tener fuertes pérdidas energéticas al tener dicha agua caliente inmovilizada durante horas esperando su demanda. En el sector industrial, se aplica el concepto *Just In Time* que, en el entorno de un edificio, nos llevaría a producir agua caliente solo y exclusivamente cuando sea requerida a fin minimizar su almacenamiento, aunque también se debe mantener un equilibrio con otros factores como puede ser minimizar el número de arranques y paradas, etc.
- **Inventario:** Tiene cierta relación con el punto anterior dado que en ocasiones en la industria se almacenan materiales para tenerlos disponibles de forma ágil, pero ello también ocasiona un inmovilizado que supone un coste económico y ocupa un espacio de almacén. Con la energía ocurre algo similar, dependiendo principalmente de cómo se produce su almacenamiento: en baterías eléctricas o en acumuladores de agua. Tampoco se puede obviar el efecto de inercia térmica del propio edificio, que puede tener una aportación positiva o negativa en función de cómo se gestione.
- **Transporte:** Obviamente, si la energía es producida a gran distancia de su punto de consumo se producirán pérdidas durante su transporte. Por tanto, es interesante siempre que sea posible, generar la energía en su punto de consumo. En el caso de los edificios, la energía solar aporta una gran ventaja en este aspecto dado que es posible instalar colectores solares y / o paneles fotovoltaicos en los propios tejados del edificio con la consiguiente ventaja que supone el autoconsumo energético.



- **Tiempo:** Este concepto se puede interpretar desde distintos enfoques. Por ejemplo, un pico de energía será requerido para climatizar un habitáculo si se desea realizar en un corto periodo de tiempo. Pero además, en el caso de la climatización de un edificio, es fundamental tener en consideración la inercia térmica del propio edificio dada la influencia que tiene. Por tanto, conocer de antemano cuando y cuanta energía va a ser requerida en cada momento, será de gran utilidad en cualquier sistema de climatización de edificios.
- **Movimientos:** En la industria mover elementos sin una finalidad establecida no aporta valor. Lo mismo ocurre en la climatización de un edificio, malgastar energía sin un cometido claro tampoco tiene sentido. Es por ello que es importante tener establecida una hoja de ruta donde se haya planificado lo que se desea realizar en cada momento, en función de las condiciones externas así como de las necesidades que haya en cada momento.
- **Procesos:** Por último pero no menos importante, más bien al contrario, en función de cómo este definido un proceso, tanto productivo como de climatización, será más o menos eficiente. El diseño del sistema HVAC y su gestión es un punto clave para optimizar el consumo energético de un edificio. Es muy interesante establecer un algoritmo que tenga en consideración todos los desperdicios que pueden generarse en la climatización de un edificio, a fin de minimizarlos en la medida de lo posible.

Bajo estas premisas, se ha planteado aplicar herramientas de modelización y de simulación, enfocando especialmente los 3 últimos desperdicios indicados, puesto que facilitarían las tareas de:

- ✓ conocer previamente la cantidad de energía requerida en cada momento,
- ✓ planificar las necesidades energéticas en cada momento, en función de las condiciones externas y requerimientos de confort,
- ✓ alcanzar un algoritmo que permita gestionar dicha información, con el objetivo de minimizar el consumo energético, que pueda requerir la climatización del edificio.

Es decir, tras una primera fase de cuantificación y análisis a través de herramientas existentes, se plantea encontrar fórmulas que permitan:

- ✓ optimizar la inercia térmica del edificio,
- ✓ establecer los horarios de funcionamiento de los sistemas HVAC más interesantes, tanto energéticamente como económicamente,
- ✓ el máximo aprovechamiento térmico de las zonas luz y de sombras del edificio o incluso su entorno, etc.

Todo ello para encontrar la solución más óptima a la ecuación con la que se conseguiría minimizar las pérdidas energéticas considerando los factores anteriormente expuestos, optimizando de esta manera el consumo energético requerido por el edificio y manteniendo al mismo tiempo los requerimientos de confort que se tengan establecidos.

Las herramientas BEPS (*Building Energy Performance Simulation*) actuales permiten el modelizado y simulación energética de cualquier tipo de edificio. Diversas investigaciones se han desarrollado con éxito durante los últimos años aplicando programas informáticos BEPS. Entre los más aplicados se encuentran: *DesignBuilder*, *IDA-ICE*, *EnergyPlus*, *CPLEX* o *TRNSYS*. Todos ellos permiten minimizar el consumo energético, dado ayudan a identificar las estrategias más apropiadas respetando los requisitos de confort establecidos.

Tal y como se ha descrito en el apartado 2.2.2, existen en la literatura diversas publicaciones donde se han empleado dichas herramientas. Sin embargo, una de las herramientas BEPS más aplicadas, con mejores resultados y una precisión aceptable, ha sido la aplicación *TRNSYS*: tal y como ponen de manifiesto las investigaciones de Peán et al. [15]; Guillén et al. [16]; Cellura et al. [18]; Aste et al. [23]; Harish et al. [35, 47]; Magnier et al. [40]; De Boeck et al. [41]; Valdiserri et al. [42]; Vocale et al. [43]; Carrascal et al. [44]; Sarbu et al. [45, 46]; Ogando et al. [48]; Baglivo et al. [49]; Bozkaya et al. [51]; Palme et al. [52]; Iturriaga et al. [53] o Yoon et al. [54].

### 3.3.- Metodología aplicada en la investigación.

La metodología aplicada en el desarrollo de esta investigación tras el pertinente estudio y elaboración de un Estado del Arte, ha sido:

- ✓ elegir un edificio objeto sobre el cual aplicar las técnicas de modelizado y simulación,
- ✓ recopilar la máxima documentación posible sobre las características físicas de dicho edificio y analizarla a fin plantear un modelo teórico con el que alcanzar los objetivos planteados,
- ✓ iniciar un proceso de modelizado a través de una herramienta BEPS, concretamente *TRNSYS* versión 17, dicho proceso es mostrado en profundidad en el apartado 4.2.1.- Proceso de modelizado del edificio objeto y cuyo proceso de caracterización del edificio se detalla en el Anexo B: Proceso ilustrativo de caracterización del edificio objeto con *TRNSYS*,
- ✓ realizar el proceso de simulación del edificio objeto mediante *TRNSYS17*, tal y como se indica en el apartado 4.2.2.- Proceso de simulación del edificio objeto,
- ✓ a su vez, este proceso de simulación con *TRNSYS*, ha sido utilizado para determinar los factores más determinantes que podrían afectar a la climatización del edificio, tal y como es explicado en el apartado 4.2.3.- Proceso de tratamiento de datos reales del edificio objeto,
- ✓ para finalmente contrastar que los resultados obtenidos a través de la simulación *TRNSYS* son coherentes versus los datos reales de los años 2016 a 2019 del edificio objeto, como se muestra en el apartado 4.2.4.- Comparativa de los resultados obtenidos en el caso práctico,
- ✓ una vez validado este proceso con una herramienta BEPS ampliamente utilizada como es la aplicación *TRNSYS*, se ha definido un formato de trabajo a partir del cual introducir datos sintéticos en una red neuronal, tal y como se expone en el apartado 4.3.- Generación de un modelo basado en ANN del edificio objeto,
- ✓ con dichos datos sintéticos procedentes de *TRNSYS17* se ha definido un modelo ANN y con los datos de las mediciones reales realizadas desde el 2016 al 2019, se ha entrenado, validado y testeado dicho modelo ANN,

- ✓ se han utilizado los datos reales del año 2019, para comprobar el grado de precisión del modelo ANN generado y cuyo análisis comparativo es mostrado en el Capítulo 5 de esta tesis,
- ✓ y finalmente, en este proceso se han demostrado las garantías, así como las ventajas, que puede ofrecer un modelo *Black box* (caja negra) tipo ANN frente una solución BEPS de modelizado / simulación más clásica.

### 3.4.- Conclusiones respecto a la metodología.

En esta investigación se ha optado por utilizar la aplicación *TRNSYS* ya que se considera una herramienta suficientemente validada. Este programa de simulación de sistemas transitorios fue desarrollado por la Universidad de Wisconsin (USA) en el año 2010 y ha sido mejorado con diferentes actualizaciones hasta convertirse en una herramienta BEPS que permite simular las características de la envolvente, las condiciones de uso y el comportamiento térmico de cualquier edificio. En esta investigación, se ha utilizado *TRNSYS* en la versión 17 [84] para generar los datos sintéticos que posteriormente ha sido procesados en una ANN para crear el modelo.

Se ha considerado como edificio adecuado para desarrollar nuestra investigación, el Rectorado de la UPV/EHU, puesto que presenta unas características muy adecuadas para los objetivos de la tesis. El principal motivo es que los edificios públicos de oficinas existentes tienen un consumo energético elevado en su climatización, pero además sus datos de previsión de uso y requisitos operativos también son relativamente más sencillos de conocer. En este caso concreto, gracias al proceso de monitorización realizado por Martin et al. [85] sobre el edificio en cuestión durante los años 2015 a 2019, como muestra el ejemplo de la Figura 3.1, a través del proyecto europeo *A2PBEER (Affordable and Adaptable Public Building through Energy Efficient Retrofitting)*. Este trabajo previo, ha permitido disponer de los datos e información para desarrollar la nueva hipótesis de trabajo planteada.



Figura 3.1. Monitorización del proyecto *A2PBEER* sobre el edificio bajo estudio.

En dicha hipótesis, se plantea desarrollar sobre un edificio público de oficinas existente todo el proceso de modelizado y simulación, para con esta base desarrollar una simulación análoga mediante un modelo ANN. Tras este proceso, cuya metodología ha sido explicada en el apartado anterior, se establece analizar las estimaciones obtenidas versus los datos reales para chequear la correlación de los resultados. De esta forma, se puede valorar si un modelo ANN es una herramienta interesante para facilitar el objetivo de lograr nZEB, dado que podría aplicarse para gestionar el sistema HVAC a través de un MPC de una forma más eficaz, y consecuentemente minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por un edificio.



# Capítulo 4

## Configuración Experimental:

Planteamiento y desarrollo realizado.

## Capítulo 4

### 4.- Configuración Experimental

#### 4.1.- Introducción.

El edificio objeto de análisis ha sido sometido a un proceso de rehabilitación durante los años 2015 al 2019, enfocado a reducir su consumo energético. El edificio ha sido monitorizado durante sus distintas fases de rehabilitación, y por ello existe una recopilación de datos muy exhaustiva entre los años 2016 al 2019. Además, ha sido posible disponer de información detallada de su envolvente, lo cual ha permitido desarrollar toda la investigación de una forma más precisa.

El primer paso realizado ha sido la generación de unos datos sintéticos, que nos permitieran crear las entradas para el modelo ANN. Dichas entradas han sido:

- ✓ las condiciones atmosféricas: temperatura seca del ambiente exterior,
- ✓ los horarios de calefacción o refrigeración con su porcentaje de uso,
- ✓ los horarios y número de ocupantes o usuarios dentro del edificio,
- ✓ otras ganancias internas como el porcentaje de uso de luces y el número de computadoras en funcionamiento,
- ✓ las condiciones de confort requeridas en cada franja horaria,
- ✓ así como las principales características de la envolvente y el grado de infiltración, así como la ventilación o renovación de aire del edificio.

Para su obtención, se han seguido los mismos pasos que para la modelación de un edificio cualquiera, para el cual se pretende realizar su simulación posteriormente. Es decir, primero se debe desarrollar una labor para recopilar la máxima información técnica, sobre la envolvente del edificio a analizar y de sus condiciones de uso, prestando especial cuidado a las posibles ganancias internas existentes, así como de su sistema HVAC. La información básica requerida para realizar una

correcta modelización pasa por conocer la ubicación exacta del edificio y por disponer de sus planos constructivos, para poder definir las zonas de análisis que se consideren oportunas. Seguidamente, partiendo de las memorias y planos constructivos, es importante definir los materiales de construcción utilizados con sus principales características. Una vez recopilada esta información sobre la parte física del edificio, también es necesario conocer los detalles técnicos de su sistema HVAC implementado, con sus rangos de funcionamiento y limitaciones. El siguiente paso, es conocer las condiciones de uso que tiene el edificio en cuestión, que van desde el número de ocupantes en las distintas franjas horarias, hasta las características de posibles equipos que afecten a sus ganancias internas, como son por ejemplo el tipo y cantidad de equipos de iluminación, ordenadores u otros equipos utilizados habitualmente en el interior del edificio.

#### **4.2.- Planteamiento y desarrollo realizado.**

Una vez recopilada toda la información posible sobre el edificio, se planifica la estrategia más adecuada para su modelizado, considerando como se va a desarrollar su posterior simulación, teniendo en cuenta los objetivos que se desean alcanzar y el grado de precisión requerido. En base a todo ello, es posible que sea necesario realizar simplificaciones, o definir zonas más o menos amplias, según las mediciones reales que estén disponibles, etc... Todo ello, permitirá tener un modelizado y una simulación lo más cercana posible a la realidad, dentro de las limitaciones existentes.

No siempre se conoce toda esta información. A veces, en una rehabilitación de un edificio antiguo, parte de la información de los materiales utilizados no está disponible, o simplemente han sufrido una degradación de sus características. Y otras veces, en el caso de nuevas construcciones no se dispone de datos históricos para definir su ocupación y otras series de ganancias internas de manera fiable. Debe considerarse poco probable que se obtenga una simulación "perfecta", pero cuanto mejor calidad se disponga en los datos de entrada sobre las características materiales de la envolvente, los horarios de las personas, la iluminación y el uso en general, más posibilidades de obtener una buena correlación de los resultados



entre la simulación y el edificio real. En muchas investigaciones se realizan modelos y unas primeras simulaciones, tras lo cual se realiza un proceso de calibración basado en datos reales medidos in situ. Estas mediciones reales permiten hacer ajustes en diferentes parámetros del modelo, para alcanzar un margen de error aceptable y considerar las simulaciones posteriores adecuadas.

#### **4.2.1.- Proceso de modelizado del edificio objeto.**

En este trabajo, se ha creado un modelo tridimensional del edificio sometido a estudio utilizando el software Sketchup. Este programa cuenta con las herramientas de dibujo suficientes para generar la geometría requerida del edificio, para posteriormente utilizar un plug-in que permite exportarlo a TRNSYS17. De esta forma y gracias a la interacción entre ambos programas, se han podido definir las zonas térmicas consideradas así como las ventanas y los efectos de sombra. En las Figuras 4.1 a 4.4 se muestra gráficamente la secuencia llevada a cabo durante el proceso de modelizado del edificio bajo estudio:



Figura 4.1. Fotografía aérea del exterior del edificio bajo estudio.

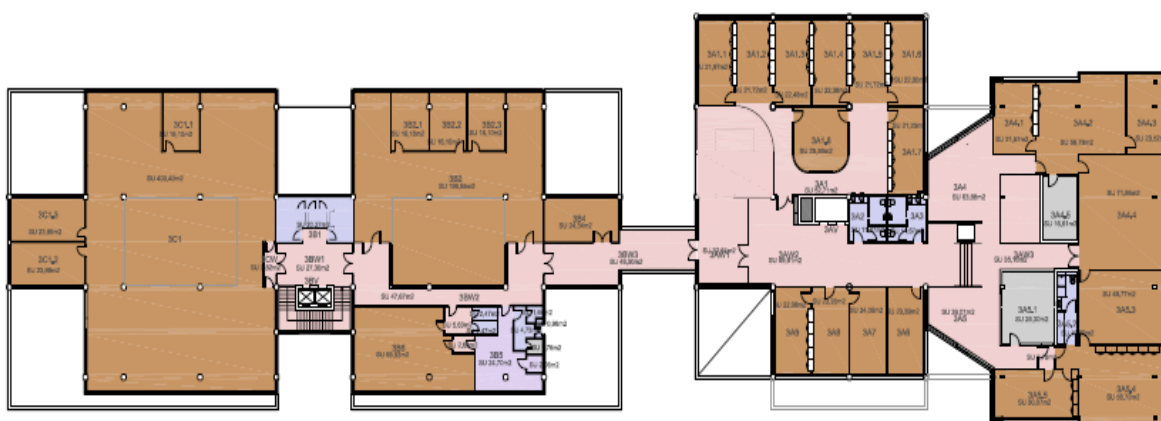


Figura 4.2. Imagen del plano de la 3ª planta del edificio bajo estudio.

La recopilación de documentación sobre el edificio bajo estudio y su análisis para organizarla adecuadamente, a fin de que el modelo virtual a desarrollar represente de la forma más fiel posible al edificio real, es una tarea básica. Es fundamental plasmar las superficies, sus geometrías y orientaciones de forma correcta dado que será la base de todo el modelo. Disponer de los planos de cada planta es importante ya que permitirá realizar el modelo y contrastar si las superficies (m<sup>2</sup>) por cada planta representadas corresponden con la realidad. En esta investigación el resumen de superficies útiles representada se muestra en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Comparativa Superficies (m<sup>2</sup>) por cada planta del edificio en estudio.

<b>Superficie útil:</b>	<b>Según planos constructivos</b>	<b>Representados en modelo <i>Sketchup</i></b>	<b>% Diferencia</b>
Planta Baja ( <i>Ground Floor</i> )	2.485,86 m <sup>2</sup>	2.485,73 m <sup>2</sup>	- 0,01 %
Primera Planta ( <i>First Floor</i> )	1.955,75 m <sup>2</sup>	1.945,91 m <sup>2</sup>	- 0,50 %
Segunda Planta ( <i>Second Floor</i> )	2.304,61 m <sup>2</sup>	2.312,07 m <sup>2</sup>	+ 0,32 %
Tercera Planta ( <i>Third Floor</i> )	1.979,89 m <sup>2</sup>	2.024,32 m <sup>2</sup>	+ 2,24 %
<b>Superficie Útil Total Edificio</b>	<b>8.726,11 m<sup>2</sup></b>	<b>8.768,03 m<sup>2</sup></b>	<b>+ 0,48 %</b>

Estas pequeñas discrepancias son justificables por la propia geometría de cada planta, que en función de su complejidad puede provocar algunas desviaciones. Además, al tratarse de un cálculo de superficies útiles, existen elementos arquitectónicos, como tabiques, paredes falsas o huecos de escaleras, que pueden generar dichas diferencias.

Como también se ha indicado, la ubicación y una orientación precisa del edificio resulta fundamental, dado que de ello dependerá en gran medida todo el modelizado y simulación posterior. *Sketchup* permite capturar toda la información geoespacial del edificio a través de *Google Earth*. Al disponer del layout real del edificio resulta mucho más sencillo realizar su composición geométrica a través de las herramientas de dibujo disponibles. Esta facilidad permite que cada elemento de la envolvente: pared, tejado, cornisa, ventana o superficie acristalada quede perfectamente localizada y orientada en el modelizado. Para ilustrar este proceso se adjuntan las imágenes de la figura 4.3:

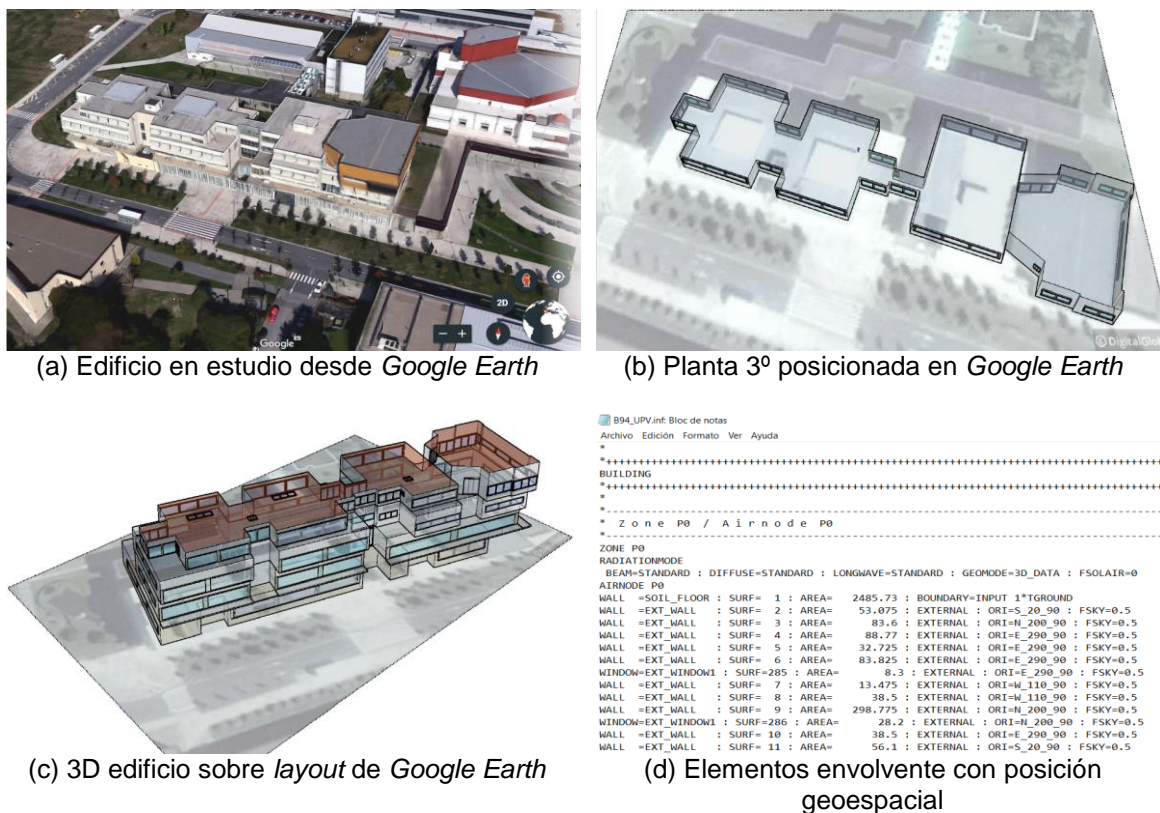


Figura 4.3. Proceso gráfico para ubicar geoespacialmente la envolvente.

Tras crear la geometría del edificio y definir sus zonas térmicas, ventanas y áreas de sombra con *Sketchup* y su *plug-in* para *TRNSYS17*, se crea un archivo ASCII con extensión IDF que contiene los datos de entrada que describen al edificio. Con esta geometría del edificio modelizado, se utiliza el *3D-Building Wizard* de *TRNSYS17* para caracterizar su envolvente, definiendo sus paredes, suelos, techos y ventanas.



Figura 4.4. Dibujo 3D del edificio bajo estudio realizado con *Sketchup*.

Merece realizar una mención especial, al cálculo de la superficie acristalada en cada fachada del edificio. La cantidad y variedad de tipos de ventanas requeriría un gran esfuerzo para su correcta representación, no exenta del riesgo de cometer errores. Considerando que la aplicación *TRNSYS17* analiza las superficies acristaladas en su totalidad en cada fachada, se ha realizado una simplificación consistente en sumar las áreas de cada tipo de ventana existente en cada fachada y planta del edificio (aunque “subestima” el impacto del puente térmico que supone cada ventana). Esto permite agilizar y facilitar el cálculo que deberá realizar a posteriori la aplicación. No es una sola una cuestión de minimizar una labor tediosa cuya aportación es cuestionable sino que además cuando posteriormente se procesa la geometría, cuantos más elementos y mayor complejidad exista, es más probable que se presenten errores en la conversión, imposibilitando que se generen correctamente los ficheros del modelizado.

Obviamente cada tipo de ventana existente, debe ser diferenciada dado que sus características térmicas son diferentes, y por tanto su comportamiento térmico, también difiere por su tipo de marco y/o acristalamiento. Es por ello, que cada tipo de ventana se representa ubicándolo en la superficie más apropiada disponible en la geometría de cada fachada modelizada del edificio, para que a continuación, en la etapa de su caracterización mediante *TRNBuild* puedan diferenciarse. Dicho

resumen con el cálculo de las superficies acristaladas que contiene el edificio bajo estudio, se muestra en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2. Superficies acristaladas (m<sup>2</sup>) según tipo por cada planta del edificio.

<b>Orientación fachada</b> Tipo de ventana	<b>Planta Baja</b>	<b>Primera Planta</b>	<b>Segunda Planta</b>	<b>Tercera Planta</b>
<b>Norte</b>	<b>13,80 m<sup>2</sup></b>	<b>308,25 m<sup>2</sup></b>	<b>261,35 m<sup>2</sup></b>	<b>279,50 m<sup>2</sup></b>
Aluminio con RPT	13,80 m <sup>2</sup>	14,40 m <sup>2</sup>	92,15 m <sup>2</sup>	128,25 m <sup>2</sup>
Aluminio Sin Definir		12,30 m <sup>2</sup>	59,20 m <sup>2</sup>	41,35 m <sup>2</sup>
Aluminio Sin Rotura		25,00 m <sup>2</sup>	110,00 m <sup>2</sup>	109,90 m <sup>2</sup>
Madera		256,55 m <sup>2</sup>		
<b>Sur</b>	<b>129,75 m<sup>2</sup></b>	<b>295,00 m<sup>2</sup></b>	<b>204,59 m<sup>2</sup></b>	<b>268,40 m<sup>2</sup></b>
Aluminio con RPT	129,75 m <sup>2</sup>			118,20 m <sup>2</sup>
Aluminio Sin Definir			8,34 m <sup>2</sup>	1,35 m <sup>2</sup>
Aluminio Sin Rotura		32,60 m <sup>2</sup>	40,55 m <sup>2</sup>	71,05 m <sup>2</sup>
Madera		262,40 m <sup>2</sup>	155,70 m <sup>2</sup>	77,80 m <sup>2</sup>
<b>Este</b>	<b>8,30 m<sup>2</sup></b>	<b>29,70 m<sup>2</sup></b>	<b>22,10 m<sup>2</sup></b>	<b>46,60 m<sup>2</sup></b>
Aluminio con RPT	8,30 m <sup>2</sup>			46,60 m <sup>2</sup>
Aluminio Sin Rotura		29,70 m <sup>2</sup>	22,10 m <sup>2</sup>	
<b>Oeste</b>	<b>59,90 m<sup>2</sup></b>	<b>22,95 m<sup>2</sup></b>	<b>27,35 m<sup>2</sup></b>	<b>28,30 m<sup>2</sup></b>
Aluminio con RPT	59,90 m <sup>2</sup>			
Aluminio Sin Rotura		22,95 m <sup>2</sup>	27,35 m <sup>2</sup>	28,30 m <sup>2</sup>
<b>Superficies Totales</b>	<b>211,75 m<sup>2</sup></b>	<b>655,90 m<sup>2</sup></b>	<b>515,39 m<sup>2</sup></b>	<b>622,80 m<sup>2</sup></b>
<b>Cubierta</b>	<b>34,72 m<sup>2</sup></b>			
Aluminio con RPT	34,72 m <sup>2</sup>			

También se han considerado los elementos voladizos del edificio, ya que dichos voladizos generan sombras que pueden influir en el comportamiento térmico. En la Figura 4.5, se representa el resultado del modelizado 3D, tras ser procesado por el *plug-in* disponible en *Sketchup* para su tratamiento con *TRNSYS17*. En nuestro edificio bajo estudio, se diferencian las distintas envolventes: paredes y cubiertas, así como las superficies acristaladas y los voladizos (representados en color morado en la imagen).

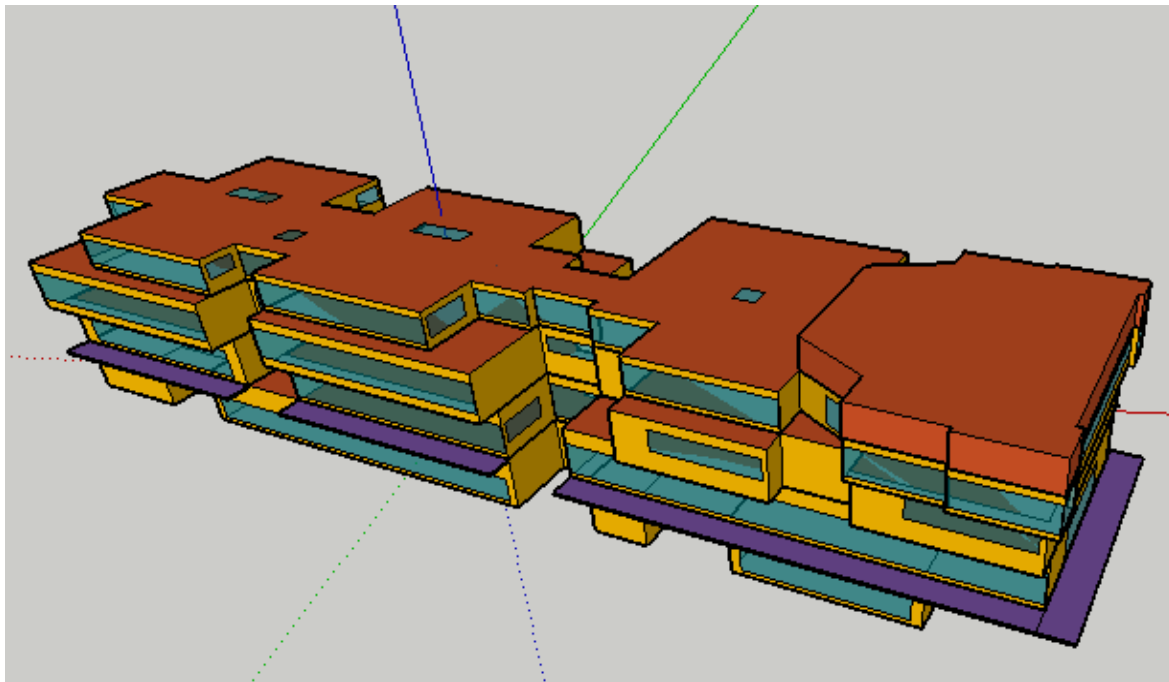


Figura 4.5. Modelizado 3D del edificio con el *plug-in Sketchup-TRNSYS17*.

Una vez la geometría de la envolvente del edificio bajo estudio ha sido concretada, es posible proceder a la caracterización de cada elemento que compone dicha envolvente a través del *TRNBuild*. En este proceso, cada elemento de dicha envolvente es creado a través de la transformación automática generada por el *plug-in* de *Sketchup* a *TRNSYS17*. Tras todo ello, en la aplicación *TRNBuild* se dispone de un desglose de cada área que compone el edificio objeto, con su superficie ( $m^2$ ) y orientación cardinal. Seleccionando cada superficie se puede acceder al detalle que la integra y realizar los ajustes que son requeridos. A través de las librerías de materiales de construcción existentes en la aplicación, se debe definir la composición de cada superficie opaca (pared, techo o suelo), así como el tipo de ventana correspondiente. En el Anexo B, las Figuras B.1 a B.7, se muestran a modo de ejemplo varias pantallas de todo el proceso de caracterización.

En esta investigación, se ha caracterizado el edificio definiendo 4 zonas térmicas, coincidiendo cada una de estas zonas con una planta del edificio. Esta simplificación ha permitido un análisis de los datos más global con los datos reales disponibles de cada planta del edificio en cuestión, y sobretodo, establecer una comparativa o *benchmarking* a posteriori.

Respecto al resto de los factores que influyen en el comportamiento térmico del edificio: infiltración, ventilación, requerimientos de confort, horarios de ocupación y uso, ganancias internas, y su climatización (calefacción / refrigeración) o sistema HVAC, también ha sido parametrizados en base a los siguientes términos:

- ✓ El estado del sistema HVAC y las ganancias internas (nivel de ocupación, uso iluminación y cantidad de equipos informáticos u ordenadores en funcionamiento), en esta investigación se han tomado unas previsiones para los días laborables. Considerando no hay ninguna actividad los fines de semana ni los días festivos en el edificio objeto, es decir 0% de uso, HVAC e iluminación y ninguna persona u ordenador en funcionamiento. La Tabla 4.3 muestra las previsiones para las 24 horas de un día laborable:

Tabla 4.3. Previsiones de uso del edificio objeto en un día laborable.

Hora	Previsiones de uso:			Nº personas/Planta				Nº PC´s / Planta			
	% Uso	% HVAC	% Ilum.	P.0	P.1	P.2	P.3	P.0	P.1	P.2	P.3
0:00	0%	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0%	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0%	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0%	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0%	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0%	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	0%	100%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00	20%	100%	50%	8	8	5	10	3	9	6	11
8:00	50%	100%	100%	20	20	12	25	7	24	15	28
9:00	100%	100%	100%	40	40	25	50	15	48	31	56
10:00	100%	100%	100%	40	40	25	50	15	48	31	56
11:00	100%	100%	90%	40	40	25	50	15	48	31	56
12:00	100%	100%	85%	40	40	25	50	15	48	31	56
13:00	100%	100%	85%	40	40	25	50	15	48	31	56
14:00	50%	100%	85%	20	20	12	25	7	24	15	28
15:00	50%	100%	85%	20	20	12	25	7	24	15	28
16:00	100%	100%	80%	40	40	25	50	15	48	31	56
17:00	100%	100%	75%	40	40	25	50	15	48	31	56
18:00	50%	100%	60%	20	20	12	25	7	24	15	28
19:00	50%	100%	50%	20	20	12	25	7	24	15	28
20:00	20%	0%	25%	8	8	5	10	3	9	6	11
21:00	10%	0%	10%	4	4	2	5	1	4	3	5
22:00	0%	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0%	0%	0%	0	0	0	0	0	0	0	0

En la Figura 4.6, se muestra gráficamente la previsión de ocupación o número de personas en cada planta del edificio objeto, por cada hora de un día laborable completo. Considerando no hay ninguna persona los fines de semana ni los días festivos en el edificio bajo estudio.

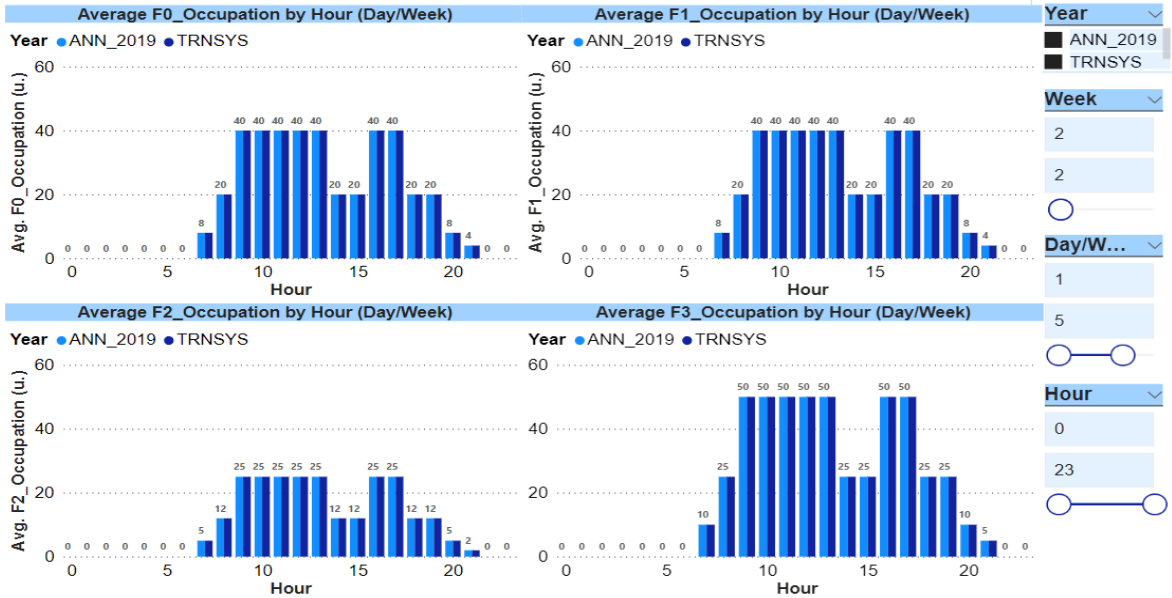


Figura 4.6. Horarios de ocupación y uso considerados en días laborables.

De igual forma, la Figura 4.7 muestra la cantidad de equipos informáticos previstos estén en funcionamiento cada hora por planta en un día laborable. Considerando no hay ningún ordenador en funcionamiento los fines de semana ni los días festivos en el edificio objeto.

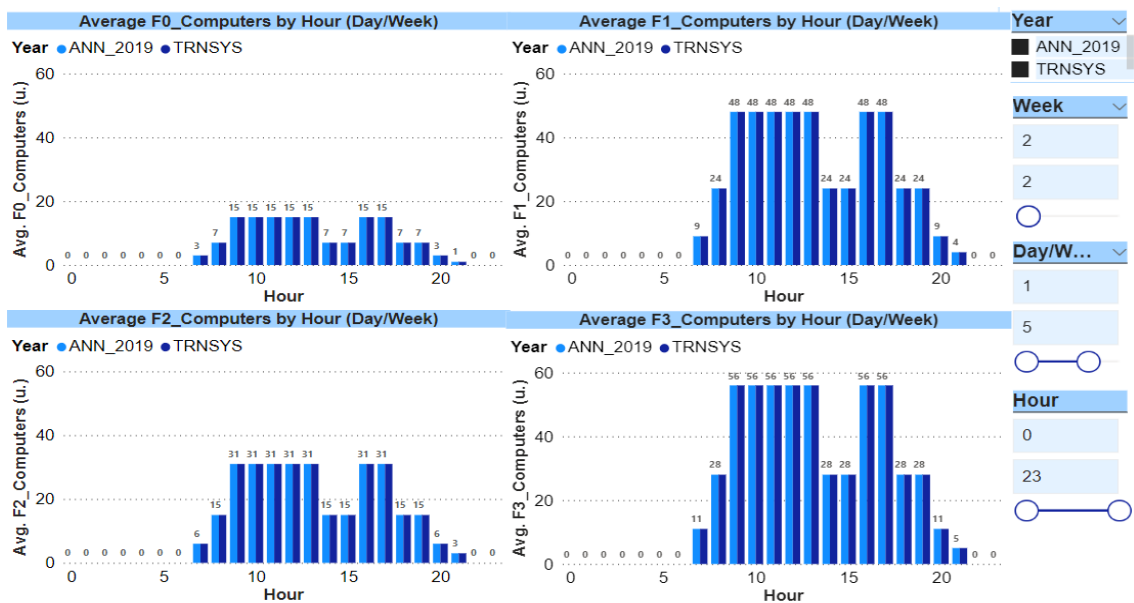


Figura 4.7. Número de equipos informáticos considerados en días laborables.



Y por último, la Figura 4.8 muestra para cada franja horaria en un día laborable estándar, el % de iluminación empleado para el edificio objeto y la consigna aplicada a su sistema climatización (calefacción / refrigeración). En esta investigación se ha supuesto que el sistema HVAC está a pleno funcionamiento (100% = *On*) de 6:00am a 19:00pm. Considerando no hay ninguna actividad los fines de semana ni los días festivos en el edificio objeto, lo cual supone un 0% de uso en el % de iluminación y que el sistema HVAC está apagado (0% = *Off*).

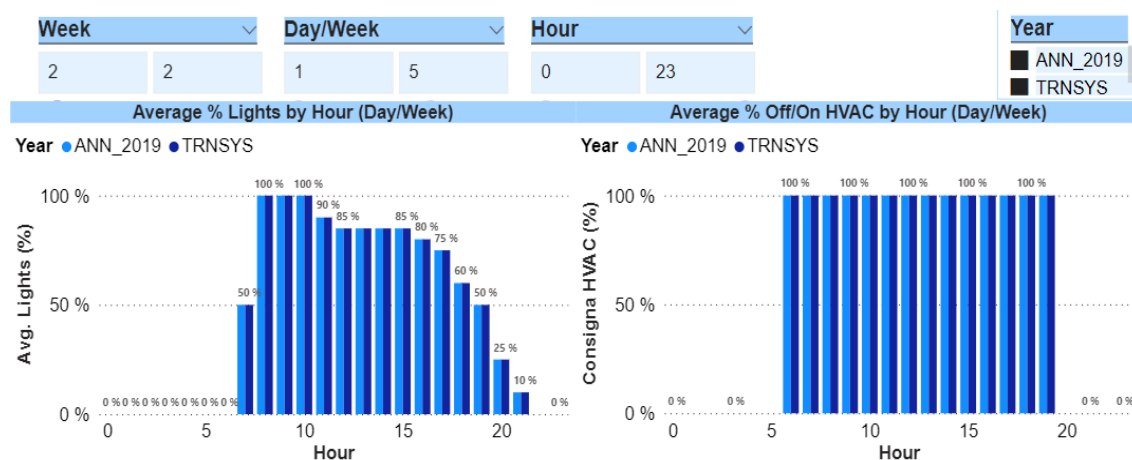


Figura 4.8. % uso de iluminación y sistema HVAC en días laborables en el edificio.

- ✓ La infiltración, definida bajo la variable INFIL001, se ha considerado un 25% de la Ocupación, dado se ha apreciado existe una alta relación entre la renovación de aire que pueda existe cada hora y el número de personas que están en haciendo uso del edificio en el mismo periodo.
- ✓ Mientras la ventilación, bajo la variable VENT001, se ha estimado como un valor nulo, dado el edificio objeto no dispone de un sistema de ventilación forzada y por tanto se considera que, es la propia infiltración, según lo indicado en el punto anterior, la que actuaría a modo de ventilación natural.
- ✓ Y los requerimientos de confort, bajo la variable COMF001, se han considerado los estándar definidos en la aplicación *TRNBuild* que aplica la norma DIN ISO 7730:
  - Factor de ropa (*Clothing Factor*) ..... 1 clo
  - Tasa metabólica (*Metabolic Rate*) ..... 1,2 met
  - Trabajo externo (*External Work*) ..... 0 met
  - Velocidad relativa del aire (*Relative Air Velocity*) .... 0,1 m/s

Con todo este proceso de modelizado del edificio objeto completado, queda tipificada su envolvente con sus correspondientes características de paredes, techo, áreas acristaladas,..., sus horarios de ocupación y uso. También sus ganancias internas tanto a nivel de ocupación como de iluminación, e incluso otros dispositivos electrónicos como ordenadores, sus requisitos de confort, sus condiciones de infiltración y ventilación, sus condiciones para la calefacción y refrigeración. En este trabajo se ha considerado el *Heating Power* y el *Cooling Power* como *unlimited*, es decir no se limita la capacidad ni potencia de calefacción ni refrigeración para obtener las necesidades de consumo de energía del edificio bajo estudio sin ningún tipo de limitación.

Una vez caracterizados todos los factores que influyen en el comportamiento térmico del edificio, así como establecidas las zonas térmicas definidas y las salidas que se desean obtener para su posterior estudio, se procesa el modelo y se obtiene un fichero ASCII con extensión .INF. Dicho fichero contiene toda la información requerida para la posterior simulación del edificio. En la Figura B.7 del Anexo B, se muestra una captura de pantalla a modo ejemplo del formato y contenido del fichero ASCII que se genera tras el modelizado del edificio.

#### **4.2.2.- Proceso de simulación del edificio objeto.**

A partir de este punto, es posible simular el comportamiento del edificio modelizado a través *Simulation Studio* de *TRNSYS17*. A través de este interfaz se define un proyecto como el usuario desea, enlazando conexiones gráficas entre componentes definiendo sus *inputs*, *outputs*, *parameters*, ... Dichos componentes están programados matemáticamente en Fortran y básicamente son *Black box* que *TRNSYS17* ejecuta para realizar la simulación programada. De hecho, es factible evaluar distintas alternativas de sistemas HVAC en busca de la mejor solución a nivel de consumo de energía. *TRNSYS17* dispone de una amplia biblioteca de componentes, que permite generar este tipo de proyectos. La Figura 4.9 muestra un ejemplo realizado durante la investigación:

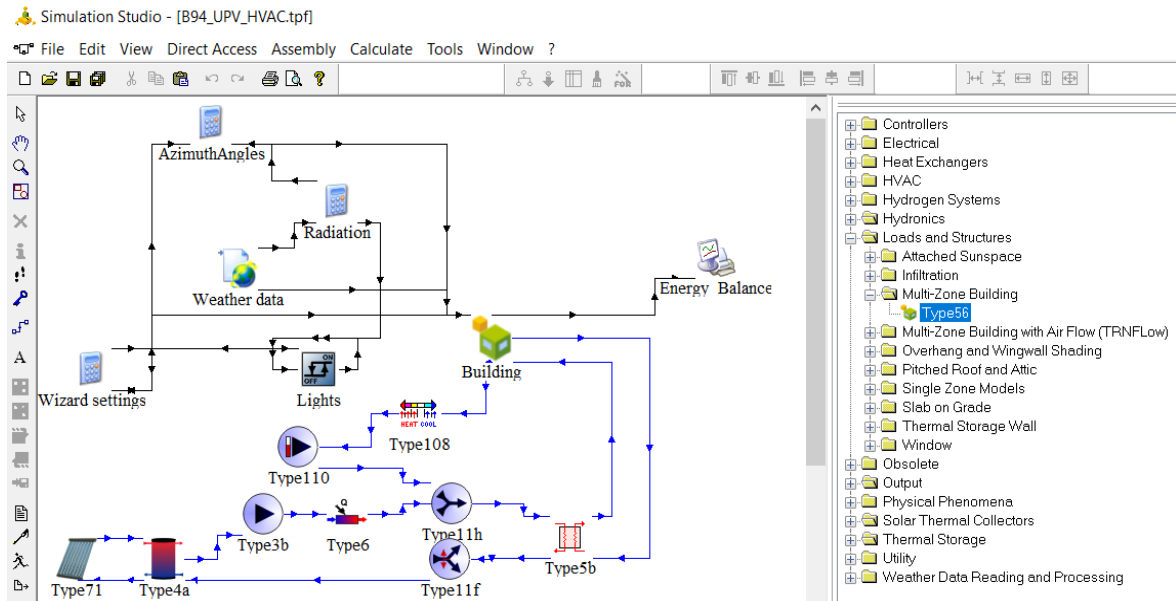


Figura 4.9. Ejemplo de simulación de PV y HP en el edificio bajo estudio.

En esta investigación, se ha desarrollado un proyecto más sencillo para obtener un modelo que permita recopilar los factores determinantes que caracterizan un sistema de climatización de un edificio, como ya ha sido explicado en el Capítulo 2, en su apartado 2.2. Por otro lado, se han considerado como salidas de dicho sistema: las temperaturas operativas y el consumo energético de cada zona térmica, que en el caso bajo estudio corresponden a cada planta del edificio. Y posteriormente, se ha procedido a simular en un año estándar (8760 horas) aplicando el proyecto representado en la Figura 4.10:

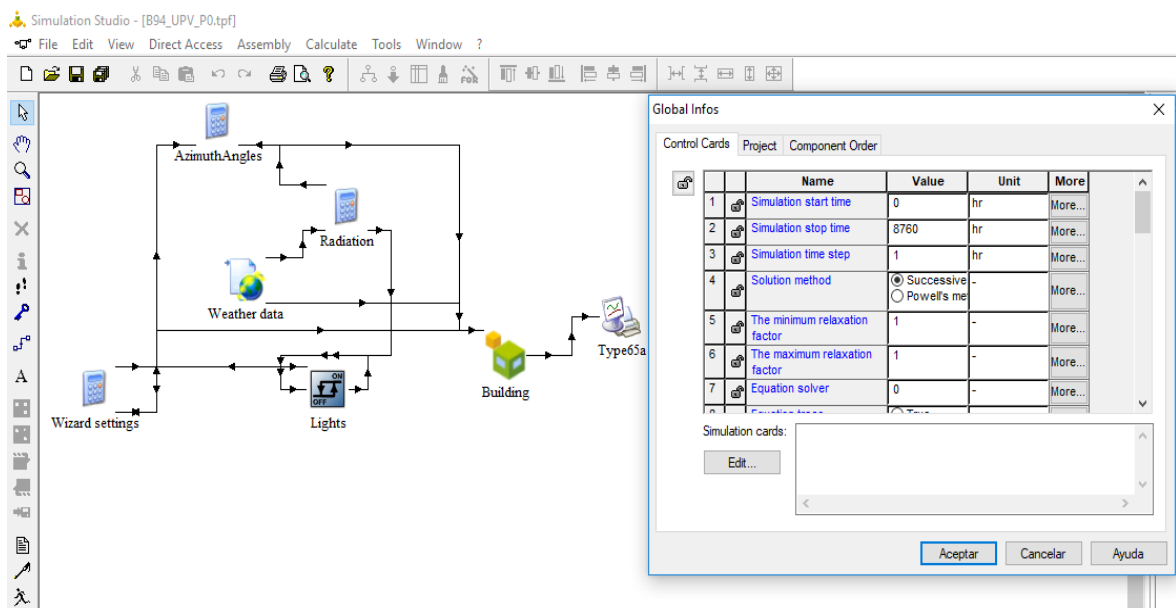


Figura 4.10. Proyecto definido para obtener una simulación del edificio objeto.

Como se ha indicado anteriormente, cada componente o también denominado *Type*, está programado en Fortran y el usuario puede definirlos enlazando sus conexiones gráficas para establecer sus *inputs*, *outputs*, *parameters*, ... de cada uno de dichos componentes. En la Figura 4.11 puede observarse las conexiones establecidas entre las salidas del componente *Building*, que corresponde al modelo definido en *TRNBuild* del edificio bajo estudio, y el componente para visualizarlas mediante una salida gráfica, en este caso el *Type65a*:

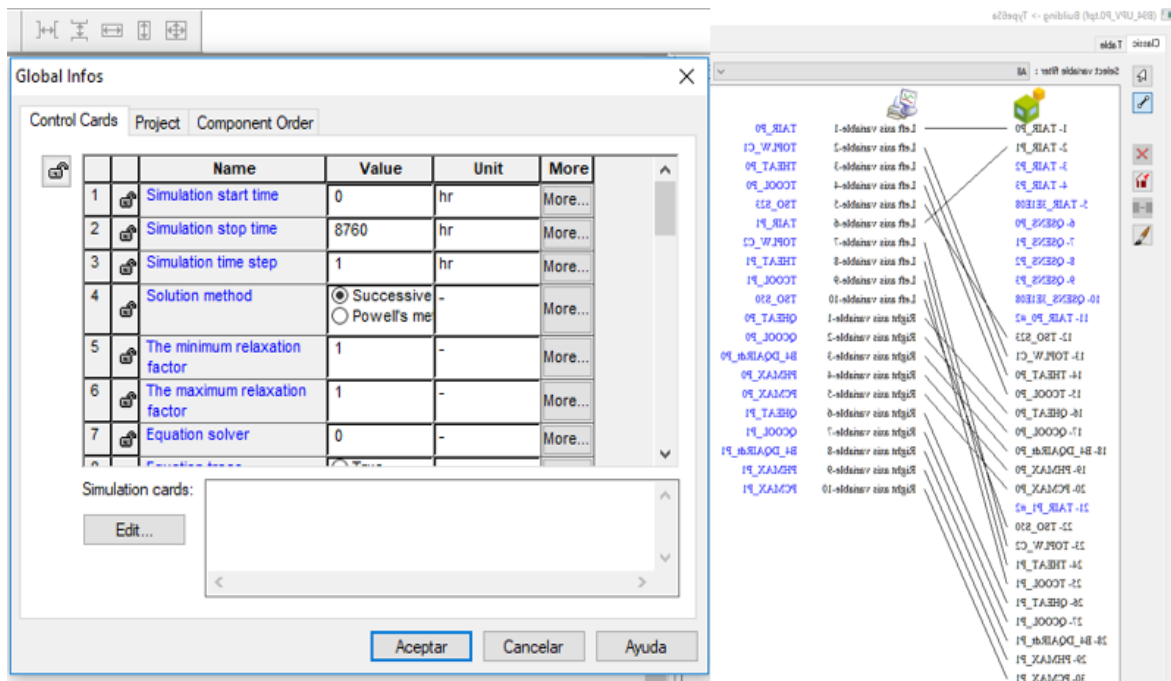


Figura 4.11. Conexión entre componentes *TRNSYS17: Building–Type65a*.

Los resultados obtenidos pueden verse gráficamente como muestra la Figura 4.12, donde en el eje de abscisas está indicado el intervalo de tiempo. En esta investigación, se ha considerado cada hora tomando como base un año completo de 365 días, es decir 8760 horas. Y los ejes de ordenadas, muestran en su lado izquierdo todas las temperaturas consideradas, mientras en su lado derecho están definidas las variables de salida de consumo energético, tanto de refrigeración como de calefacción en cada planta o zona térmica definida:

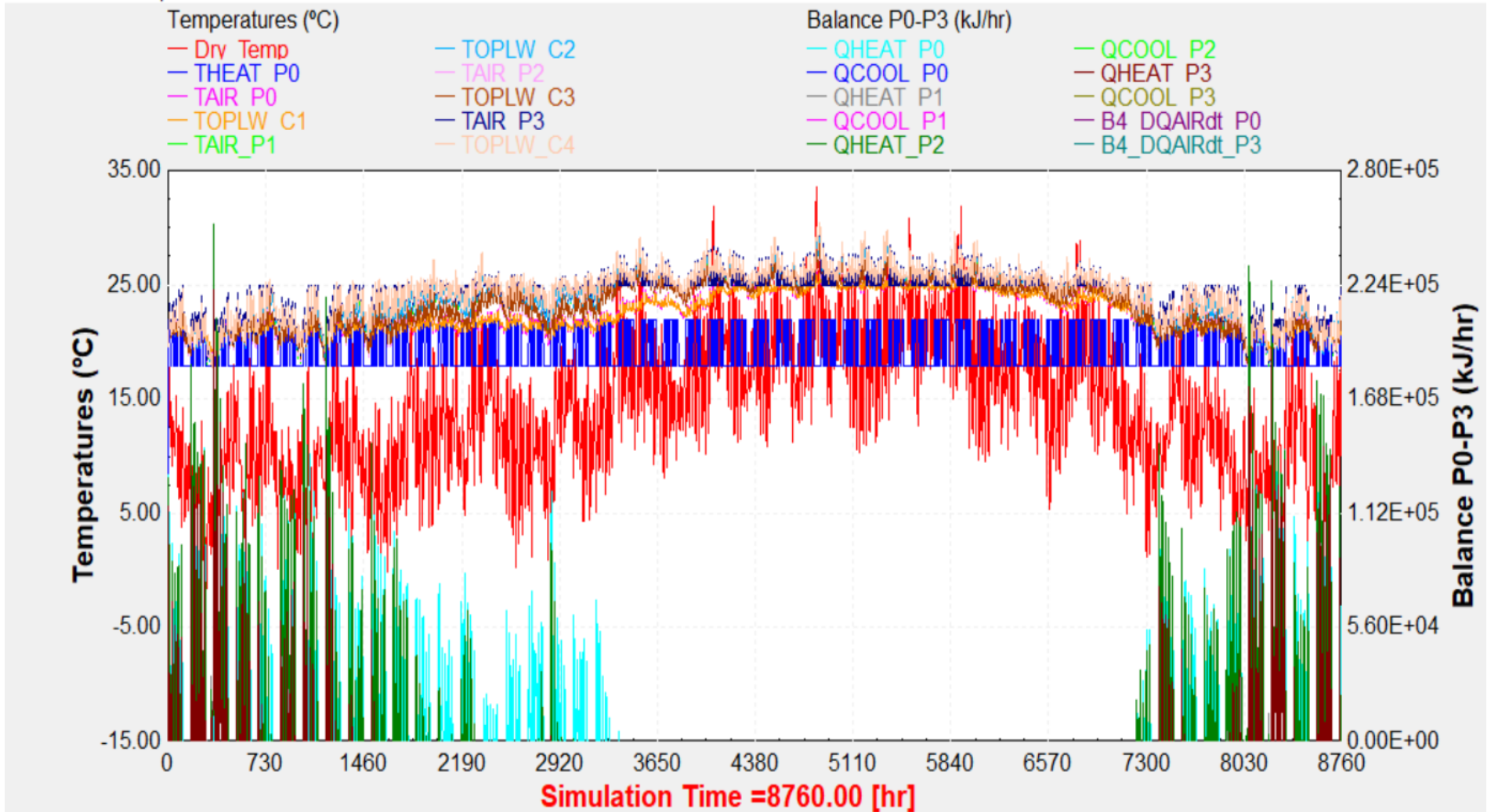


Figura 4.12. Resultados de una simulación anual del edificio bajo estudio.



Esta misma información puede visualizarse en un fichero ASCII, donde se observa en el intervalo de tiempo definido, es decir con una frecuencia horaria, con sus valores de temperatura seca del aire en el exterior, la consigna del sistema HVAC en el edificio, y la temperatura operativa del aire, así como su consumo energético en refrigeración o calefacción de cada planta, como muestra la Figura 4.13:

Fig. 4.13: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

TIME	Dry_Temp	THEAT_P0	TAIR_P0	TOPLM_C1	TAIR_P1	TOPLM_C2	TAIR_P2
+0.0000000000000000E+00	+9.3000000000000000E+00	+0.0000000000000000E+00	+2.0000000000000000E+01	+2.0000000000000000E+01	+2.0000000000000000E+01	+2.0000000000000000E+01	+2.0000000000000000E+01
+1.0000000000000000E+00	+1.2100000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+1.9941308119070139E+01	+1.9949932868284705E+01	+1.9943764569074757E+01	+1.98094998555653E+01	+1.98946965659780E+01
+2.0000000000000000E+00	+1.4750000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+1.9940789089112798E+01	+1.9942990731676819E+01	+1.976801765580414173E+01	+1.9768821744215078E+01	+1.98380040669780E+01
+3.0000000000000000E+00	+1.4400000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+1.9947408936950831E+01	+1.9942728065110063E+01	+1.977804925331497E+01	+1.9761276391361505E+01	+1.984900405071695E+01
+4.0000000000000000E+00	+1.4090000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+1.9934974259257756E+01	+1.9932519078928275E+01	+1.9719421276675653E+01	+1.9711417264369419E+01	+1.980934160371749E+01
+5.0000000000000000E+00	+1.3700000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+1.9929471129925318E+01	+1.9926089579379990E+01	+1.9689857779391083E+01	+1.9677639437114630E+01	+1.9789190994550E+01
+6.0000000000000000E+00	+1.3300000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.0962424946575434E+01	+2.049493076010653E+01	+2.032308794862831E+01	+2.031801594127690E+01	+2.03861185016674E+01
+7.0000000000000000E+00	+1.2950000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+8.0000000000000000E+00	+1.2600000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+9.0000000000000000E+00	+1.2250000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.0000000000000000E+01	+1.3100000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.1000000000000000E+01	+1.4250000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.2000000000000000E+01	+1.4000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.3000000000000000E+01	+1.5650000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.4000000000000000E+01	+1.7100000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.5000000000000000E+01	+1.7800000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.6000000000000000E+01	+1.7400000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.7000000000000000E+01	+1.6449999999999999E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.8000000000000000E+01	+1.5600000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+1.9000000000000000E+01	+1.5050000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+2.0000000000000000E+01	+1.4750000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+2.120344226758087E+01	+2.1207440681875708E+01	+2.1640941353945195E+01	+2.1490667811810173E+01	+2.14494965191689E+01
+2.1000000000000000E+01	+1.4400000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+2.0629958306111240E+01	+2.0671555987197091E+01	+2.1298191580182227E+01	+2.125312396186067E+01	+2.10296883261318E+01
+2.2000000000000000E+01	+1.4050000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+2.072623441246080E+01	+2.0696558895739493E+01	+2.1170861965313740E+01	+2.1139399391745070E+01	+2.10322087244026E+01
+2.3000000000000000E+01	+1.3750000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+2.061854616406193E+01	+2.0621378979392477E+01	+2.1024706265045781E+01	+2.1014225308643790E+01	+2.09055143499328E+01
+2.4000000000000000E+01	+1.3450000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+2.061148122513691E+01	+2.060308031030222E+01	+2.0958786477856130E+01	+2.0939644329772181E+01	+2.08625608079399E+01
+2.5000000000000000E+01	+1.3050000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+2.057722674514050E+01	+2.0573189513520467E+01	+2.0870479687926808E+01	+2.0854391506552801E+01	+2.07936161905589E+01
+2.6000000000000000E+01	+1.2550000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+2.057660475809760E+01	+2.0552034433507544E+01	+2.0793891583162104E+01	+2.0775999993204292E+01	+2.073759252820042E+01
+2.7000000000000000E+01	+1.2050000000000000E+01	+2.0000000000000000E+01	+2.0530049042871723E+01	+2.0530042166208199E+01	+2.0715125040417995E+01	+2.0697440842181707E+01	+2.067864081677011E+01
+2.8000000000000000E+01	+1.1600000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+2.0517384501517974E+01	+2.0511906506928325E+01	+2.0640526143677802E+01	+2.0622431777619020E+01	+2.06234174674622E+01
+2.9000000000000000E+01	+1.1150000000000000E+01	+1.8000000000000000E+01	+2.0499029374519294E+01	+2.049340969628379E+01	+2.0566948708037300E+01	+2.0540509523737007E+01	+2.050607682131100E+01
+3.0000000000000000E+01	+1.0650000000000000E+01	+2.0000000000000000E+01	+2.1249044146659390E+01	+2.0930011466400004E+01	+2.1265244319255054E+01	+2.0918389202783810E+01	+2.12700919646068E+01
+3.1000000000000000E+01	+1.0150000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+3.2000000000000000E+01	+9.7000000000000000E+00	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+3.3000000000000000E+01	+9.2500000000000000E+00	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+3.4000000000000000E+01	+9.4000000000000000E+00	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+3.5000000000000000E+01	+1.0550000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+3.6000000000000000E+01	+1.2100000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01
+3.7000000000000000E+01	+1.3400000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01	+2.2000000000000000E+01

Figura 4.13. Resultados de una simulación del edificio en formato ASCII.

Los resultados obtenidos en dicho fichero ASCII están tabulados respetando siempre el mismo formato, y por tanto pueden ser archivados en un formato CSV o en una hoja de cálculo como *Excel*, para su posterior tratamiento. La Figura 4.14 muestra a modo de ejemplo los valores mensuales de temperatura operativa y potencias de calefacción y refrigeración de las cuatro plantas datos obtenidos en esta investigación:

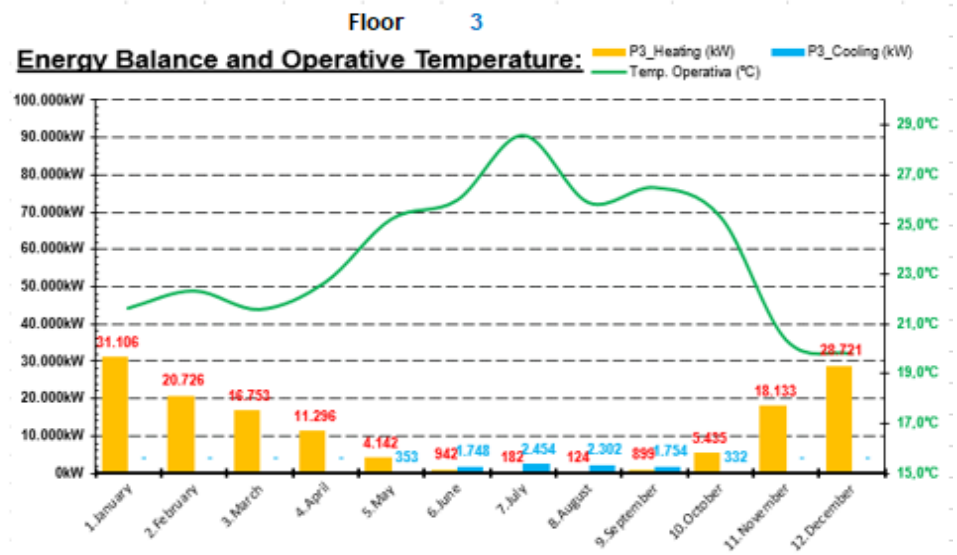
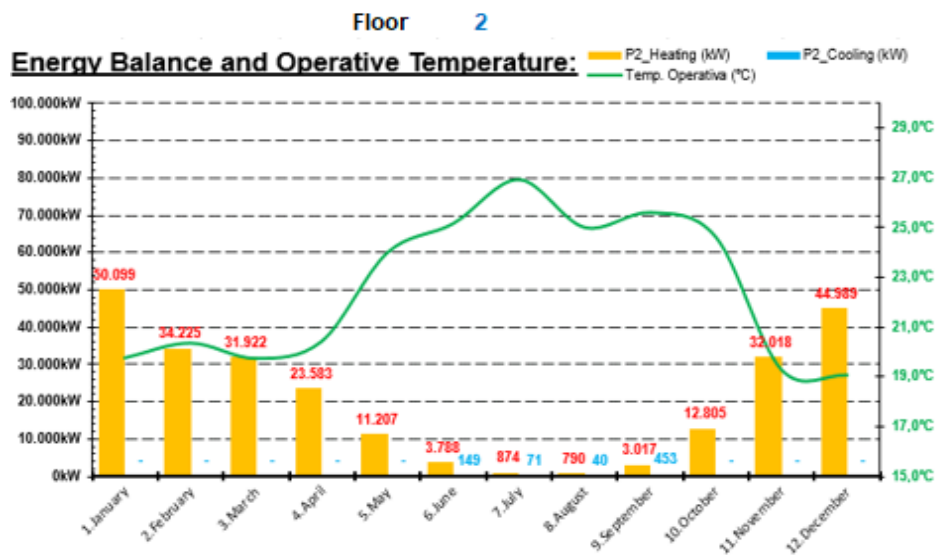
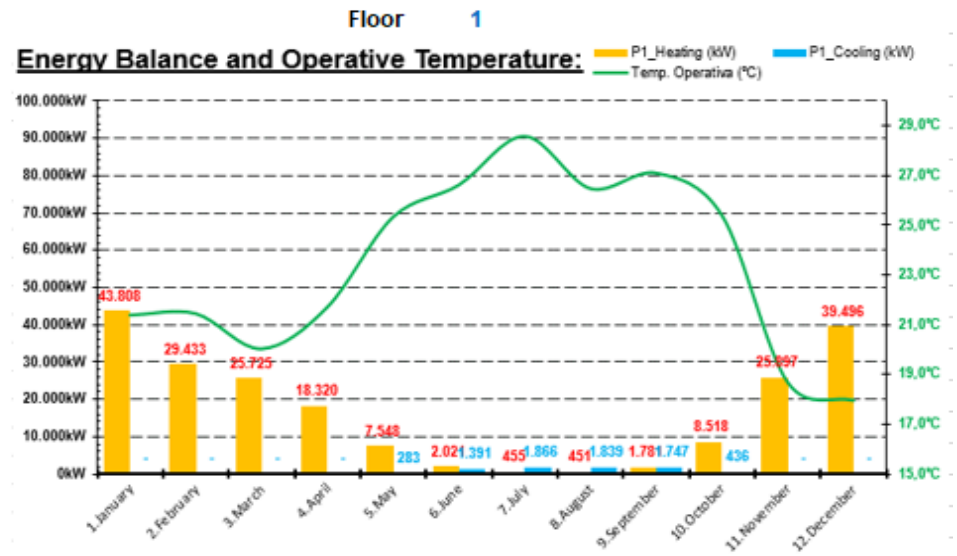
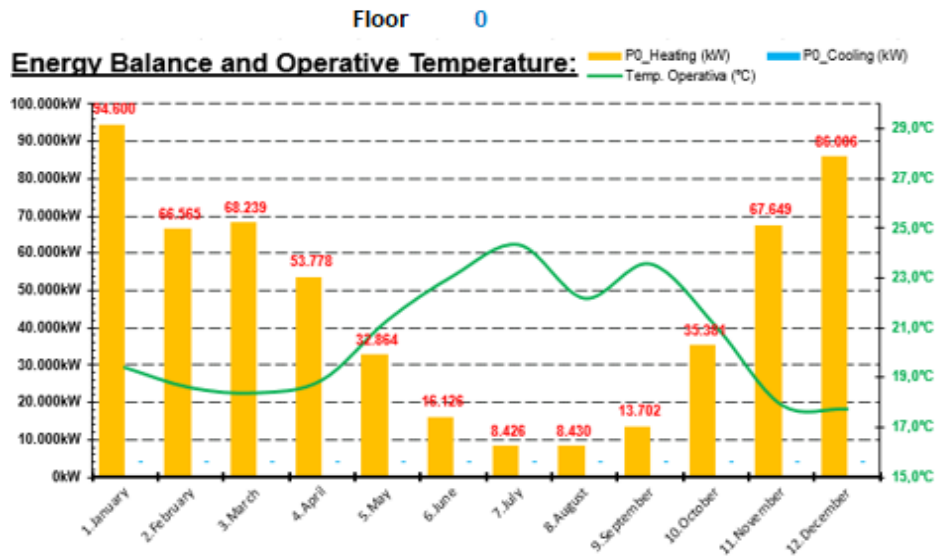


Figura 4.14. Tratamiento y presentación de datos por cada planta del edificio.

Considerando como base el formato obtenido en esta simulación, incluyendo las entradas que muestran los principales factores considerados en el proceso de modelizado y simulación en TRNSYS17. Se ha convertido el correspondiente archivo ASCII, a un formato de hoja de cálculo Excel respetando dicho formato. El proceso de establecer los factores determinantes y definir un formato de trabajo, ha sido uno de los pilares para completar el resto de la investigación. En esta tesis se ha tomado como referencia la fecha, desglosándola en la hora, día de la semana, mes y día del mes para un año completo, lo que genera un total de 8760 filas. A partir de este formato, se han incorporado columnas con la temperatura seca del ambiente exterior del edificio, la temperatura seca del ambiente exterior, un parámetro que indica cuando el sistema de climatización HVAC está apagado o en funcionamiento, así como las distintas ganancias presentes cada hora: como el grado de uso en tanto por ciento del total de la iluminación instalada, el número de personas y el número de equipos informáticos en funcionamiento previstos por cada piso del edificio. Consiguientemente a través de la simulación, se ha obtenido la temperatura operativa y la potencia consumida en climatización en cada planta del edificio y cada hora, completando con ello una matriz de datos que permite disponer de todo el balance térmico y energético del edificio objeto durante un año. En la Figura 4.15 muestra dicho formato a modo ilustrativo:

Figure 4.15 shows a screenshot of an Excel spreadsheet titled "DATA\_B94\_UPV\_2019.xlsx - Excel". The spreadsheet displays a data table with columns labeled A through AA. The first few columns represent date and time information, including Day, Hour, and Day of the Week. The remaining columns contain numerical data representing various simulation parameters, such as temperatures, gains, and system status. The data is organized in a grid format, with rows representing individual time steps (e.g., 1-ene. 0:00, 1-ene. 1:00, etc.).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
2	0-1-00:01	DATE	DAY	Hour	Day	Mor	Day	Amb. T	SetPoi	Lights	F0_Od	F1_Od	F2_Od	F3_Od	F0_Co	F1_Co	F2_Co	F3_Co	F0_Te	F1_Te	F2_Te	F3_Te	F0_QHV	F1_QHV	F2_QHV	F3_QHV	
3	1-ene. 0:00	Tuesday	0	2	1	1	2,80	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,70	19,80	23,90	21,80	0,00	12927,00	6114,00	10245,00	
4	1-ene. 1:00	Tuesday	1	2	1	1	2,50	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,20	20,20	24,20	21,90	0,00	12969,00	7537,00	9453,00	
5	1-ene. 2:00	Tuesday	2	2	1	1	2,30	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,80	20,40	24,30	22,00	0,00	11122,00	6988,00	8397,00	
6	1-ene. 3:00	Tuesday	3	2	1	1	1,60	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,40	20,30	24,10	21,90	0,00	2550,00	1430,00	2366,00	
7	1-ene. 4:00	Tuesday	4	2	1	1	1,40	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,10	19,80	23,50	21,60	0,00	3006,00	1482,00	2108,00	
8	1-ene. 5:00	Tuesday	5	2	1	1	1,20	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,80	19,50	23,20	21,50	0,00	2298,00	1077,00	1379,00	
9	1-ene. 6:00	Tuesday	6	2	1	1	1,00	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,50	19,10	22,90	21,40	0,00	1360,00	529,00	800,00	
10	1-ene. 7:00	Tuesday	7	2	1	1	1,50	22,00	50%	8,00	8,00	5,00	10,00	3,00	3,00	6,00	11,00	17,30	18,90	22,70	21,30	0,00	735,00	0,00	102,00		
11	1-ene. 8:00	Tuesday	8	2	1	1	2,00	22,00	100%	20,00	20,00	12,00	25,00	7,00	24,00	15,00	28,00	17,10	18,70	22,50	21,10	0,00	829,00	0,00	0,00		
12	1-ene. 9:00	Tuesday	9	2	1	1	2,50	22,00	100%	40,00	40,00	25,00	50,00	15,00	48,00	31,00	58,00	17,00	18,50	22,30	21,10	0,00	434,00	22,00	70,00		
13	1-ene. 10:00	Tuesday	10	2	1	1	3,80	22,00	100%	40,00	40,00	25,00	50,00	15,00	48,00	31,00	58,00	16,90	18,50	22,20	21,00	0,00	323,00	189,00	140,00		
14	1-ene. 11:00	Tuesday	11	2	1	1	4,90	22,00	90%	40,00	40,00	25,00	50,00	15,00	48,00	31,00	58,00	16,90	18,50	22,10	21,00	0,00	200,00	200,00	200,00		
15	1-ene. 12:00	Tuesday	12	2	1	1	5,70	22,00	85%	40,00	40,00	25,00	50,00	15,00	48,00	31,00	58,00	16,90	18,40	22,00	20,90	0,00	132,00	259,00	239,00		
16	1-ene. 13:00	Tuesday	13	2	1	1	7,00	22,00	85%	40,00	40,00	25,00	50,00	15,00	48,00	31,00	58,00	16,90	18,40	22,00	20,90	0,00	3,00	387,00	300,00		
17	1-ene. 14:00	Tuesday	14	2	1	1	8,10	22,00	85%	20,00	20,00	12,00	25,00	7,00	24,00	15,00	28,00	16,90	18,40	21,90	20,90	0,00	0,00	400,00	300,00		
18	1-ene. 15:00	Tuesday	15	2	1	1	8,50	22,00	85%	20,00	20,00	12,00	25,00	7,00	24,00	15,00	28,00	17,00	18,60	21,90	20,90	0,00	0,00	400,00	311,00		
19	1-ene. 16:00	Tuesday	16	2	1	1	8,30	22,00	80%	40,00	40,00	25,00	50,00	15,00	48,00	31,00	58,00	17,00	18,60	21,80	20,90	0,00	118,00	258,00	271,00		
20	1-ene. 17:00	Tuesday	17	2	1	1	8,20	22,00	75%	40,00	40,00	25,00	50,00	15,00	48,00	31,00	58,00	16,90	18,60	21,70	20,90	0,00	100,00	200,00	200,00		
21	1-ene. 18:00	Tuesday	18	2	1	1	8,10	22,00	60%	20,00	20,00	12,00	25,00	7,00	24,00	15,00	28,00	16,80	18,60	21,60	20,90	0,00	100,00	200,00	207,00		
22	1-ene. 19:00	Tuesday	19	2	1	1	8,00	22,00	50%	20,00	20,00	12,00	25,00	7,00	24,00	15,00	28,00	16,80	18,60	21,50	20,80	0,00	100,00	200,00	230,00		
23	1-ene. 20:00	Tuesday	20	2	1	1	7,90	22,00	25%	8,00	8,00	5,00	10,00	3,00	3,00	6,00	11,00	16,70	18,50	21,40	20,80	0,00	100,00	200,00	288,00		
24	1-ene. 21:00	Tuesday	21	2	1	1	7,70	22,00	10%	4,00	4,00	2,00	5,00	1,00	4,00	3,00	5,00	16,70	18,50	21,30	20,70	0,00	97,00	270,00	300,00		
25	1-ene. 22:00	Tuesday	22	2	1	1	7,50	22,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,60	18,40	21,20	20,70	0,00	26,00	300,00	307,00		
26	1-ene. 23:00	Tuesday	23	2	1	1	7,60	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,60	18,40	21,20	20,60	0,00	10,00	300,00	303,00		
27	2-ene. 0:00	Wednesday	0	3	1	2	7,90	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,50	18,40	21,10	20,60	0,00	0,00	322,00	379,00		
28	2-ene. 1:00	Wednesday	1	3	1	2	7,70	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,50	18,40	21,10	20,50	0,00	0,00	360,00	400,00		
29	2-ene. 2:00	Wednesday	2	3	1	2	7,50	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,50	18,30	21,00	20,50	0,00	3,00	377,00	400,00		
30	2-ene. 3:00	Wednesday	3	3	1	2	7,40	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,40	18,30	20,90	20,50	0,00	0,00	331,00	400,00		
31	2-ene. 4:00	Wednesday	4	3	1	2	7,60	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,40	18,30	20,90	20,40	0,00	0,00	334,00	400,00		
32	2-ene. 5:00	Wednesday	5	3	1	2	7,50	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,40	18,20	20,80	20,40	0,00	0,00	383,00	400,00		
33	2-ene. 6:00	Wednesday	6	3	1	2	7,40	18,00	0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,40	18,20	20,90	20,40	15340,00	14417,00	8356,00	11110,00		
34	2-ene. 7:00	Wednesday	7	3	1	2	8,20	22,00	30%	8,00	8,00	5,00	10,00	3,00	3,00	6,00	11,00	18,70	19,20	21,70	20,80	26578,00	25522,00	16503,00	21618,00		
35	2-ene. 8:00	Wednesday	8	3	1	2	8,00	22,00	60%	20,00	20,00	12,00	25,00	7,00	24,00	15,00	28,00	21,00	20,70	23,10	21,60	22403,00	21813,00	18825,00	20950,00		

Figura 4.15. Formato aplicado para el procesamiento de los datos del edificio.



#### 4.2.3.- Proceso de tratamiento de datos reales del edificio objeto.

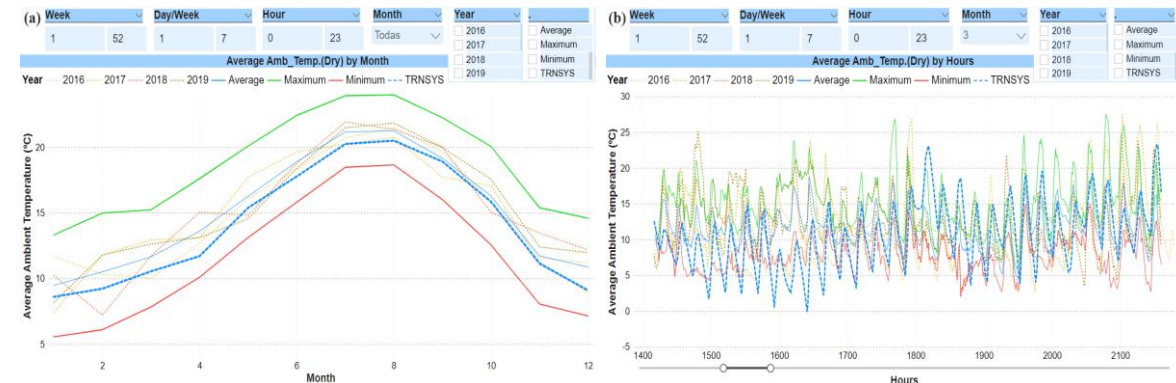
Por otro lado, partiendo de la información real recopilada durante la rehabilitación del edificio durante los años 2016, 2017, 2018 y 2019, se ha podido extraer los datos equivalentes para completar el mismo formato para cada año.

Para ello primeramente y empleando la hoja de cálculo *Excel* indicada en la Figura 4.15, se han seleccionado e introducido los datos reales recopilados en los años 2016, 2017, 2018 y 2019. Se ha mantenido el mismo formato obtenido a través de la simulación generada con *TRNSYS17*. Para ello es importante respetar los datos que afectan a los factores principales que afectan a la climatización de un edificio, y que ya han sido expuestos en el Capítulo 2, en su apartado 2.2:

- **La ubicación y las condiciones climatológicas:** La localización del edificio bajo estudio, determina las condiciones ambientales a las cuales está sometido. Además permite disponer de un histórico de datos con mayor o menor grado de precisión, según la distancia donde se encuentre una estación meteorológica. También es importante aclarar que los datos meteorológicos disponibles por defecto en una base de datos de una herramienta BEPS, son promedios de varios años. En nuestro caso, los datos aplicados por defecto en la aplicación *TRNSYS17* corresponden al archivo meteorológico de Bilbao, aunque existe una estación meteorológica más cercana al edificio. En esta investigación, por otra parte, se disponía de las condiciones atmosféricas captadas in situ en el propio edificio.

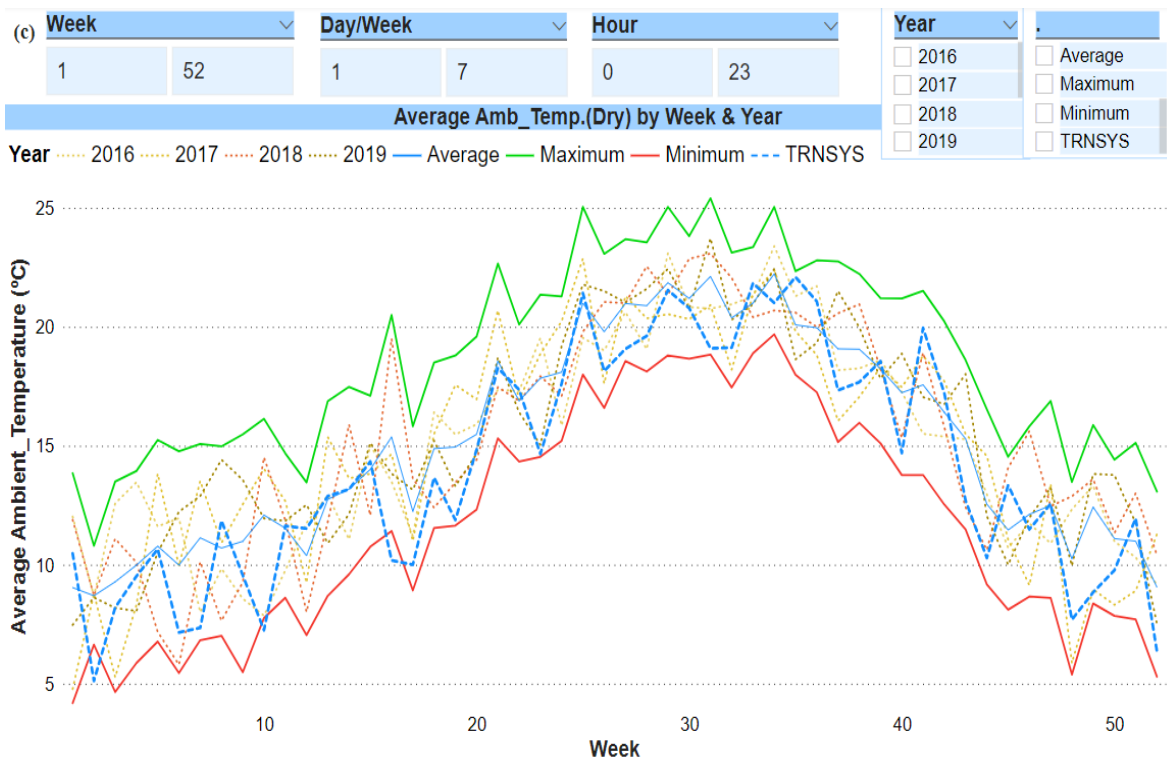
En la Figura 4.16 se muestra gráficamente la temperatura exterior (°C) con un comparativa de los datos aplicados en la simulación y los datos reales de los años 2016, 2017, 2018 y 2019. Cabe reseñar que, si bien cuando se analiza y compara en detalle cada año puede haber grandes diferencias, a nivel mensual no se aprecian dichas diferencias porque se están visualizando promedios como se muestra en la Figura 4.16 (a). Sin embargo, a nivel horario las diferencias entre distintos días son sustanciales. Por ello, se ha decidido no establecer comparaciones entre días de distintos años, dado que no existe ningún patrón que se pueda establecer, tal y como se muestra en la Figura 4.16 (b). Por este motivo, se ha optado por agruparlo y

visualizarlo en semanas. Este hecho permite tener una visión global aceptable y la posibilidad de establecer comparaciones entre mismas semanas de distintos años o con la propia simulación de forma razonable, como puede visualizarse en la Figura 4.16 (c), dado se promedian los valores entre los distintos días:



(a) Temperatura ambiente por meses

(b) Temperatura ambiente por horas en Marzo

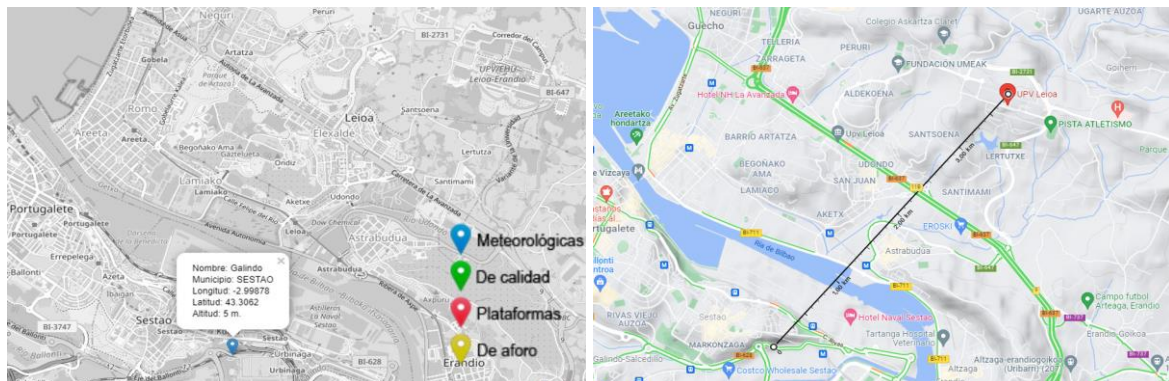


(c) Temperatura ambiente por semana

Figura 4.16. Gráficas temperatura ambiente con datos simulación y reales.

En la investigación realizada, se ha contado con la posibilidad de contrastar la temperatura ambiental captada con sensores en el edificio bajo estudio y los datos meteorológicos de la estación meteorológica de Galindo (C038) de

la red Euskalmet que esta apenas a 4 Km de distancia, tal y como se muestra en las Figuras 4.17:



(a) Ubicación estación meteorológica (b) Localización estación - edificio Google Map

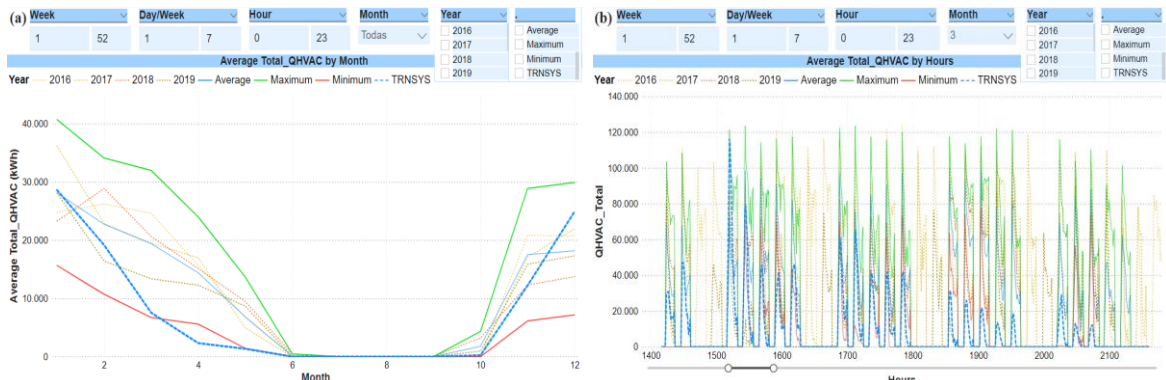
Figura 4.17. Ubicación estación meteorológica Euskalmet y edificio bajo estudio.

Esta proximidad entre ambos equipos de medición, ha posibilitado disponer de datos para completar perdidas de información puntuales en la adquisición de la temperatura ambiente del edificio objeto, dado se ha constatado que las desviaciones entre ambas mediciones eran inferior a  $\pm 1$  °C.

- **Envolvente del edificio y necesidades de consumo energético:** Como se ha indicado en el comienzo del apartado 4.2, no siempre es posible disponer de toda la información de los materiales utilizados en la envolvente de un edificio o pueden haber sufrido una degradación en sus características. Además, el comportamiento de los usuarios puede generar múltiples perturbaciones en las condiciones teóricas planteadas. Estas situaciones, hacen plantear como poco probable que se pueda obtener una simulación perfecta. Por ello, en muchas investigaciones es necesario realizar procesos de calibración con datos reales medidos in situ, para realizar ajustes del modelo y obtener simulaciones lo más cercanas posibles a la realidad.

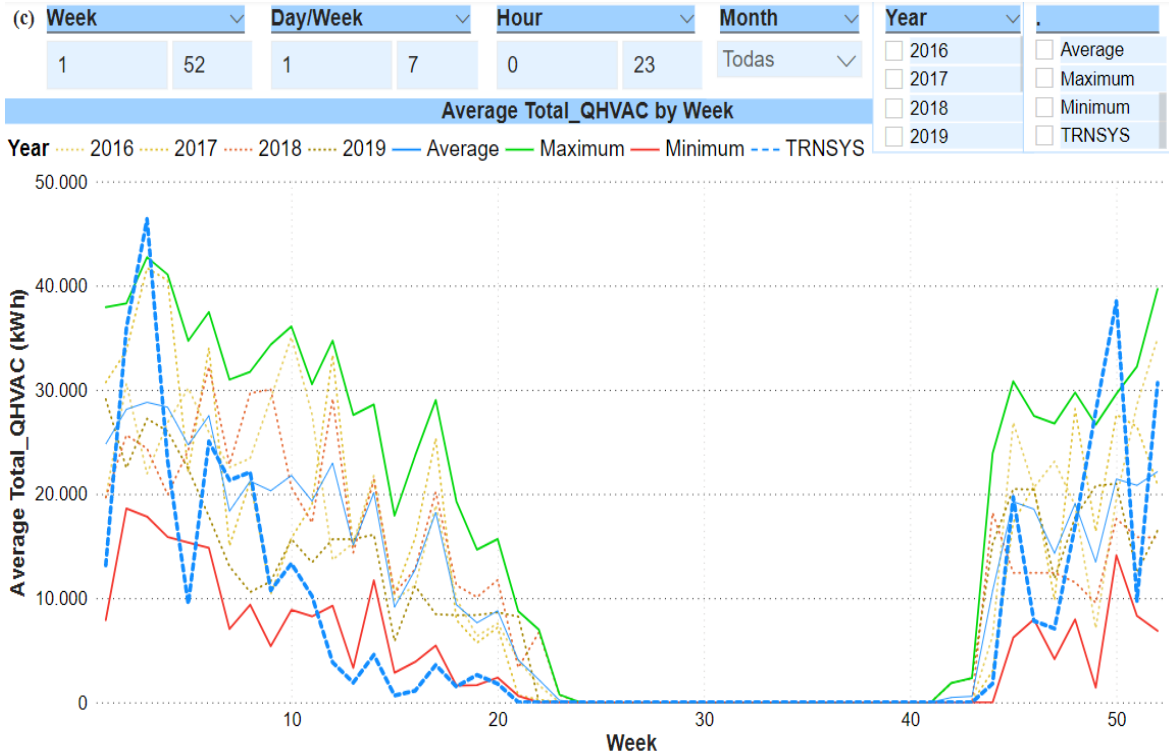
La Figura 4.18 muestra gráficamente el consumo de energía (kWh) de la simulación frente a los datos reales. Como se ha indicado en el punto anterior, un análisis mensual agrupa excesivamente la información con lo cual no permite sacar excesivas conclusiones. Sin embargo, un análisis a nivel horario, entra a un nivel de detalle que tampoco permite establecer comparaciones por exceso de información, la cual es ingestionable. Por todo

ello, el análisis se ha realizado por semanas, que se han organizado para hacer coincidir la misma semana en todas las series con el fin de establecer una comparación más coherente entre los datos. Es decir, independientemente del día numérico se está considerando y estableciendo comparaciones dentro de una misma semana entre lunes contra lunes, martes contra martes, etc..., que, salvo discrepancias por los días inhábiles por festividades conocidas y establecidas en el calendario, permite contrastar situaciones análogas.

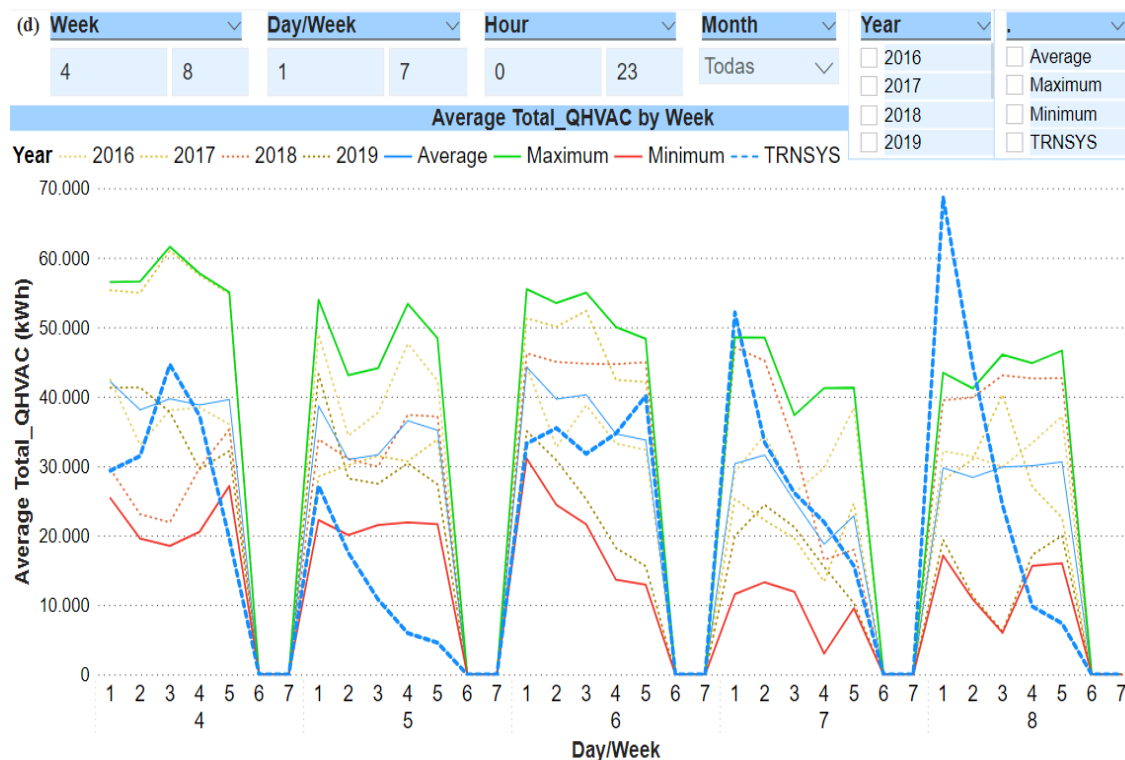


(a) Consumo energético mensual

(b) Consumo energético por horas en Marzo



(c) Consumo energético por semana



(d) Detalle del consumo energético entre las semanas 4 a 8

Figura 4.18. Gráficas consumo energético con datos simulación y reales.

- Ocupación y requerimientos de confort:** Como se ha indicado en el apartado de Introducción, los propios usuarios del edificio provocan perturbaciones importantes. La cantidad de personas, equipos informáticos o luces que estén funcionando en el edificio, tienen una fuerte influencia. Estos elementos, pueden generar ganancias térmicas que afecten al sistema. Incluso algunos ocupantes, pueden cambiar los requisitos de confort o modificar las condiciones ambientales internas de una zona térmica, por ejemplo dejando una ventana abierta, lo cual puede cambiar por completo el comportamiento térmico del sistema.

La Figura 4.19 muestra gráficamente la temperatura operativa (°C) en el interior de cada zona térmica definida. Al igual que en el punto anterior, se ha optado por un análisis en base semanal, que evita un exceso de información difícil de tratar y permite poder obtener conclusiones que con un mayor nivel de agregación (base mensual por ejemplo), no se podrían conseguir. Asimismo, se han adaptado las semanas para poder hacerlas comparables, como se ha indicado anteriormente.

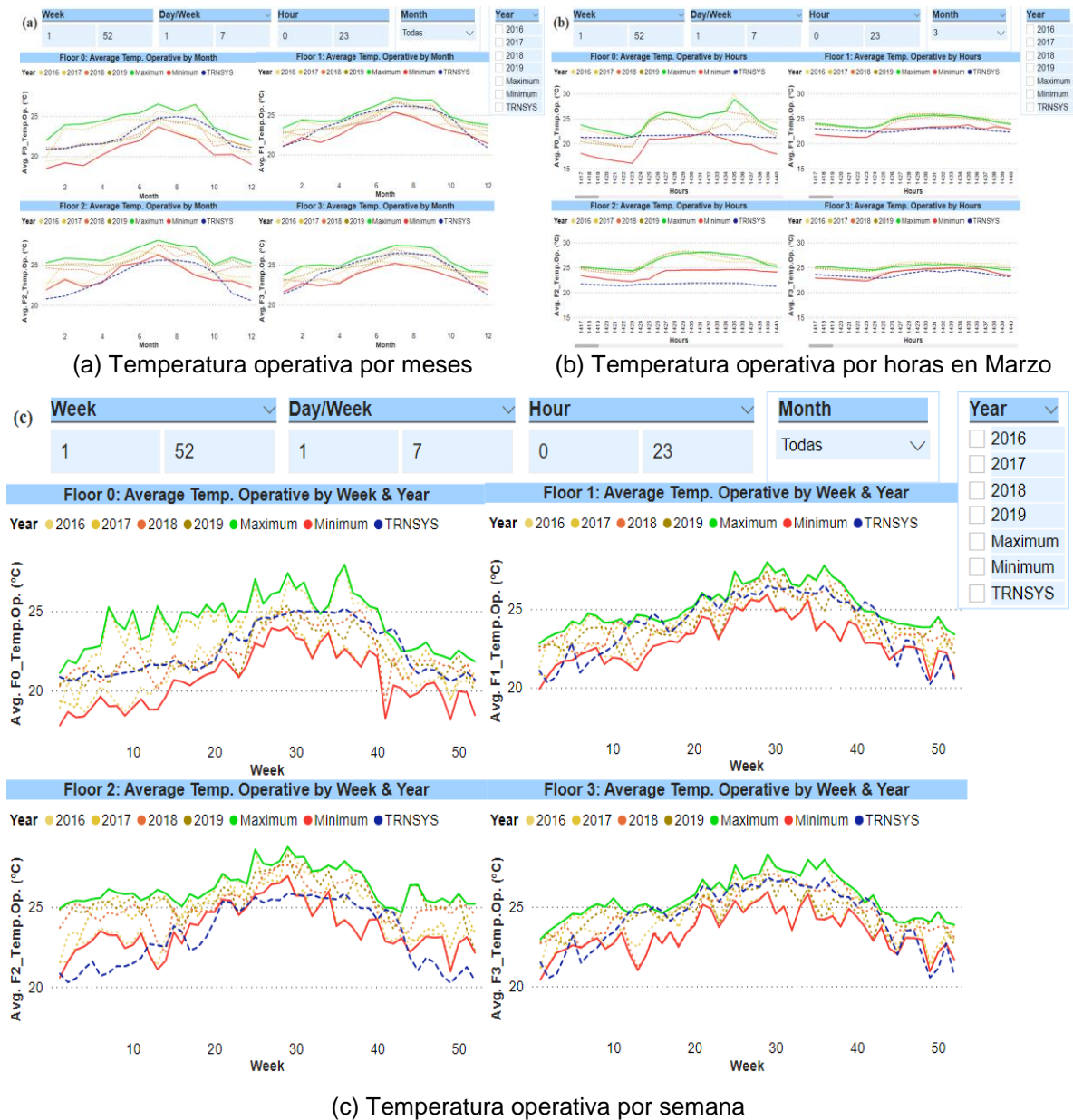


Figura 4.19. Gráficas temperatura operativa con datos simulación y reales.

#### 4.2.4.- Comparativa de los resultados obtenidos en el caso práctico.

A modo resumen del caso práctico estudiado, se ha partido de un edificio objeto, el Rectorado de la Universidad del País Vasco UPV/EHU, ubicado en Leioa (Vizcaya) en el norte de España, por cumplir todos los requisitos planteados en esta investigación y contar con suficiente información para su desarrollo. Primeramente, se ha procedido a realizar el proceso de modelado de dicho edificio a través de *TRNSYS17*. Esta herramienta BEPS, ha posibilitado en una segunda fase, realizar una simulación para obtener la temperatura operativa y el consumo energético de

cada una de las cuatro plantas del edificio bajo estudio. El fichero obtenido con sus correspondientes entradas y salidas para cada hora del año, ha permitido disponer de ficheros CSV tabulados, con 8760 tuplas. Con el mismo formato de estos ficheros, se han creado cuatro series de datos anuales con la información real obtenida de las mediciones de campo desarrolladas en el edificio en cuestión, durante los años 2016, 2017, 2018 y 2019.

Para desarrollar el trabajo de análisis y comparación de los datos, se ha utilizado una aplicación de *Business Intelligence*, una herramienta *Extract – Transform – Load* (ETL) como es el caso de *Microsoft Power BI Desktop*. Esta aplicación permite recolectar y acceder a información desde distintos orígenes (bases de datos, hojas de cálculo, servicios *Web*, etc...), para posteriormente maquetarlos de forma que sea más sencillo su análisis y presentación gráfica o en tablas para interactuar de forma masiva con todos estos datos, es decir extraer, transformar y cargar los datos en un entorno *Web* amigable y de uso muy intuitivo.

Los datos sintéticos obtenidos en la simulación con *TRNSYS17*, así como los datos reales de los años 2016, 2017, 2018 y 2019, se han maquetado en un mismo formato *Excel*/tal y como se muestra a modo de ejemplo en la Figura 4.20. Partiendo de este fichero *Excel* se ha desarrollado la labor de análisis y comparación de los datos a través de *Power BI*. Se han cruzado los datos sintéticos obtenidos a través de *TRNSYS17* y los datos de mediciones reales, en cada una de las zonas térmicas bajo un mismo formato. Esta comparación nos ha permitido verificar la precisión y validez de los modelos ANN estimados posteriormente.



TablaDatosDEFINITIVA.xlsx - Excel

ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA DESARROLLADOR

AE96

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1	Hou	Day/M	Mon	Day/M	Amb	SetPoir	Ligh	F0_Oc	F1_Oc	F2_Oc	F3_Oc	F0_Co	F1_Co	F2_Co	F3_Co	F0_Te	F1_Te	F2_Te	F3_Te	F0_QH	F1_QH	F2_QH	F3_QH	Ve	Date	Day	Year
74	0	1	1	4	11,2	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	15,8	19,2	19,0	19,3	0	0	0	0	2016	04/01/2016	73	1
75	1	1	1	4	12,4	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,1	19,2	19,0	19,3	0	0	0	0	2016	04/01/2016	74	1
76	2	1	1	4	13,3	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,2	19,2	19,0	19,3	0	0	0	0	2016	04/01/2016	75	1
77	3	1	1	4	14,0	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,1	19,1	19,0	19,3	0	0	0	0	2016	04/01/2016	76	1
78	4	1	1	4	12,3	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,1	19,1	18,9	19,2	0	0	0	0	2016	04/01/2016	77	1
79	5	1	1	4	11,4	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,2	19,0	18,9	19,2	0	0	0	0	2016	04/01/2016	78	1
80	6	1	1	4	11,5	22,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,1	19,1	19,0	19,2	1525	16804	1684	10845	2016	04/01/2016	79	1
81	7	1	1	4	10,8	22,0	50%	8	8	5	10	3	9	6	11	17,3	19,3	19,8	19,8	19257	24255	24583	22604	2016	04/01/2016	80	1
82	8	1	1	4	11,5	22,0	100%	20	20	12	25	7	24	15	28	18,9	20,8	20,5	20,5	16363	22639	17333	19805	2016	04/01/2016	81	1
83	9	1	1	4	11,7	22,0	100%	40	40	25	50	15	48	31	56	18,8	21,9	21,7	21,0	14052	21634	17309	19122	2016	04/01/2016	82	1
84	10	1	1	4	11,9	22,0	100%	40	40	25	50	15	48	31	56	18,9	22,4	23,0	21,3	13953	21194	17286	18789	2016	04/01/2016	83	1
85	11	1	1	4	12,3	22,0	90%	40	40	25	50	15	48	31	56	19,1	22,7	23,7	21,4	13115	20519	16729	19197	2016	04/01/2016	84	1
86	12	1	1	4	10,7	22,0	85%	40	40	25	50	15	48	31	56	19,6	23,0	24,1	21,6	13965	20545	16870	18241	2016	04/01/2016	85	1
87	13	1	1	4	10,3	22,0	85%	40	40	25	50	15	48	31	56	19,6	23,1	24,2	21,7	13742	12303	11004	12227	2016	04/01/2016	86	1
88	14	1	1	4	11,3	22,0	85%	20	20	12	25	7	24	15	28	19,7	23,0	24,4	21,9	13992	22988	16531	18917	2016	04/01/2016	87	1
89	15	1	1	4	11,6	22,0	85%	20	20	12	25	7	24	15	28	19,9	23,0	24,2	21,9	13598	20794	17187	19572	2016	04/01/2016	88	1
90	16	1	1	4	11,1	22,0	80%	40	40	25	50	15	48	31	56	19,0	22,8	23,6	22,0	14597	20741	17123	19118	2016	04/01/2016	89	1
91	17	1	1	4	10,1	22,0	75%	40	40	25	50	15	48	31	56	20,0	22,7	23,4	22,1	15547	21559	17578	19711	2016	04/01/2016	90	1
92	18	1	1	4	10,6	22,0	60%	20	20	12	25	7	24	15	28	20,2	22,7	23,3	22,2	15328	21641	17869	20072	2016	04/01/2016	91	1
93	19	1	1	4	9,7	22,0	50%	20	20	12	25	7	24	15	28	21,2	22,7	23,3	22,3	16343	20797	17032	19301	2016	04/01/2016	92	1
94	20	1	1	4	9,3	18,0	25%	8	8	5	10	3	9	6	11	21,2	22,5	23,0	22,1	0	0	0	0	2016	04/01/2016	93	1
95	21	1	1	4	8,8	18,0	10%	4	4	2	5	1	4	3	5	19,8	22,1	22,6	21,8	0	0	0	0	2016	04/01/2016	94	1
96	22	1	1	4	8,1	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	18,5	22,0	22,4	21,6	0	0	0	0	2016	04/01/2016	95	1
97	23	1	1	4	7,7	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	17,8	21,8	22,2	21,5	0	0	0	0	2016	04/01/2016	96	1
98	0	2	1	5	7,9	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	17,3	21,6	22,0	21,4	0	0	0	0	2016	05/01/2016	97	1
99	1	2	1	5	7,7	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	17,1	21,3	21,8	21,2	0	0	0	0	2016	05/01/2016	98	1
100	2	2	1	5	9,0	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,8	21,1	21,5	21,0	0	0	0	0	2016	05/01/2016	99	1
101	3	2	1	5	9,4	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,4	20,8	21,3	20,9	0	0	0	0	2016	05/01/2016	100	1
102	4	2	1	5	9,5	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,2	20,6	21,1	20,7	0	0	0	0	2016	05/01/2016	101	1
103	5	2	1	5	8,6	18,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	16,0	20,4	20,9	20,5	0	0	0	0	2016	05/01/2016	102	1
104	6	2	1	5	8,2	22,0	0%	0	0	0	0	0	0	0	0	15,9	20,4	20,9	20,5	14313	18750	13573	13911	2016	05/01/2016	103	1
105	7	2	1	5	7,0	22,0	50%	8	8	5	10	3	9	6	11	18,1	21,3	21,5	21,2	25468	31626	25762	24395	2016	05/01/2016	104	1
106	8	2	1	5	6,5	22,0	100%	20	20	12	25	7	24	15	28	20,1	22,3	22,3	22,0	22548	28025	23678	26375	2016	05/01/2016	105	1
107	9	2	1	5	7,7	22,0	100%	40	40	25	50	15	48	31	56	21,0	23,4	23,6	22,4	18737	27608	23313	26351	2016	05/01/2016	106	1
108	10	2	1	5	8,8	22,0	100%	40	40	25	50	15	48	31	56	21,6	23,3	24,5	22,6	17447	25533	22084	25363	2016	05/01/2016	107	1

Figura 4.20. Formato aplicado para el procesamiento de los datos del edificio.

Concluyendo, en primer lugar se han analizado los datos más determinantes de los sistemas energéticos de un edificio para controlar los factores que podrían causar una influencia significativa, y se han depurado los datos que podrían provocar errores. Comenzando por la localización del edificio bajo estudio y las condiciones atmosféricas a las que puede estar sometido. Es importante aclarar, que los datos meteorológicos disponibles por defecto en una base de datos de una herramienta BEPS, son promedios de varios años, denominado como Año Meteorológico Típico y conocido por sus siglas en inglés TMY (*Typical Meteorological Year*). En nuestro caso, los datos aplicados por defecto en la aplicación TRNSYS17 corresponden al aeropuerto de Bilbao (a una distancia aproximada de 8 km del edificio bajo estudio). Se ha constatado la correlación entre ambas fuentes, la estación meteorológica del aeropuerto y la adquisición de datos de la temperatura exterior del edificio monitorizado, durante los 4 años. En nuestra investigación, se han considerado las condiciones atmosféricas capturadas in situ, a través de las mediciones realizadas con sensores de campo ubicados en el propio edificio, para establecer una comparativa entre dichas mediciones reales y el TMY. En la Figura 4.21 se representa gráficamente la temperatura seca exterior (°C), con una comparación de los datos aplicados en la simulación disponibles en TRNSYS17 versus los datos reales para los años 2016, 2017, 2018 y 2019.



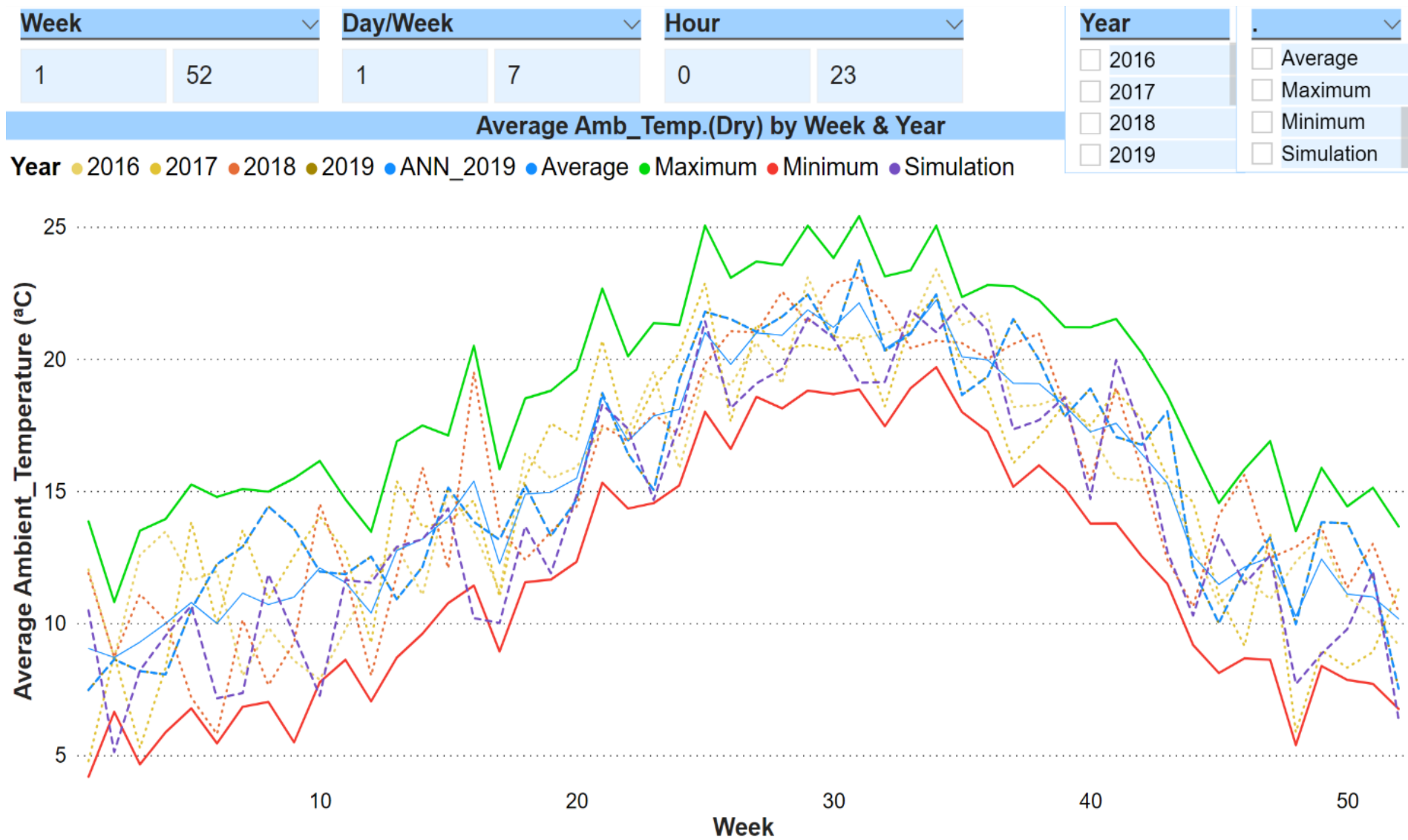


Figura 4.21. Gráficos de temperaturas ambiente: datos de simulación y reales.

Cabe reseñar que, aunque a nivel mensual podría parecer que no existen grandes diferencias, al analizar en detalle a nivel horario, las diferencias entre datos son sustanciales y resulta un tanto caótico establecer comparaciones rigurosas entre los días de los distintos años. Por este motivo se ha optado por agrupar en semanas, haciendo coincidir semanas completas. Es decir, se ha organizado para hacer coincidir la misma semana en todas las series. Con este criterio, se ha podido definir las pertinentes comparaciones durante toda la investigación. Aunque la aplicación *Power BI* permite navegar, bajando o subiendo de nivel, para graficar dichos datos a nivel horario, diario, semanal o mensual, a deseo del usuario.

Respecto a los requisitos operativos y el uso del edificio, se deben considerar los propios ocupantes del edificio dado que pueden provocar importantes perturbaciones. No solo por el número de personas, los equipos informáticos o las luces que estén funcionando en el edificio, que tienen una fuerte influencia porque generan ganancias térmicas que afectan al sistema. Se debe tener en consideración cualquier usuario del edificio, ya que puede provocar cambios en los requisitos de confort o modificar las condiciones ambientales internas de una zona térmica. Un hecho tan simple como dejar una ventana abierta, puede provocar que cambie completamente el comportamiento térmico del sistema. La Figura 4.22 muestra gráficamente la temperatura operativa ( $^{\circ}\text{C}$ ) en cada zona térmica definida en el edificio bajo estudio. Como se ha indicado anteriormente, se ha considerado el rango semanal como suficiente para establecer una comparativa entre los datos sintéticos y las mediciones reales de los años 2016, 2017, 2018 y 2019.

Y por último, en la Figura 4.23, se muestra gráficamente el consumo de energía (kWh) por planta de la simulación frente a los datos reales. Esta información se ha considerado semanalmente, por todas las razones explicadas anteriormente, aunque la aplicación *Power BI* permite navegar, para graficar dichos datos a nivel horario, diario, semanal o mensual. En estos datos existe una mayor dispersión como puede observarse en las gráficas. Como se ha indicado durante la investigación existen perturbaciones que pueden provocar discrepancias entre la información real y las simulaciones que se realizan. Es por ello, se justifica la necesidad de realizar calibraciones para ajustar un sistema tras su modelizado y simulación.

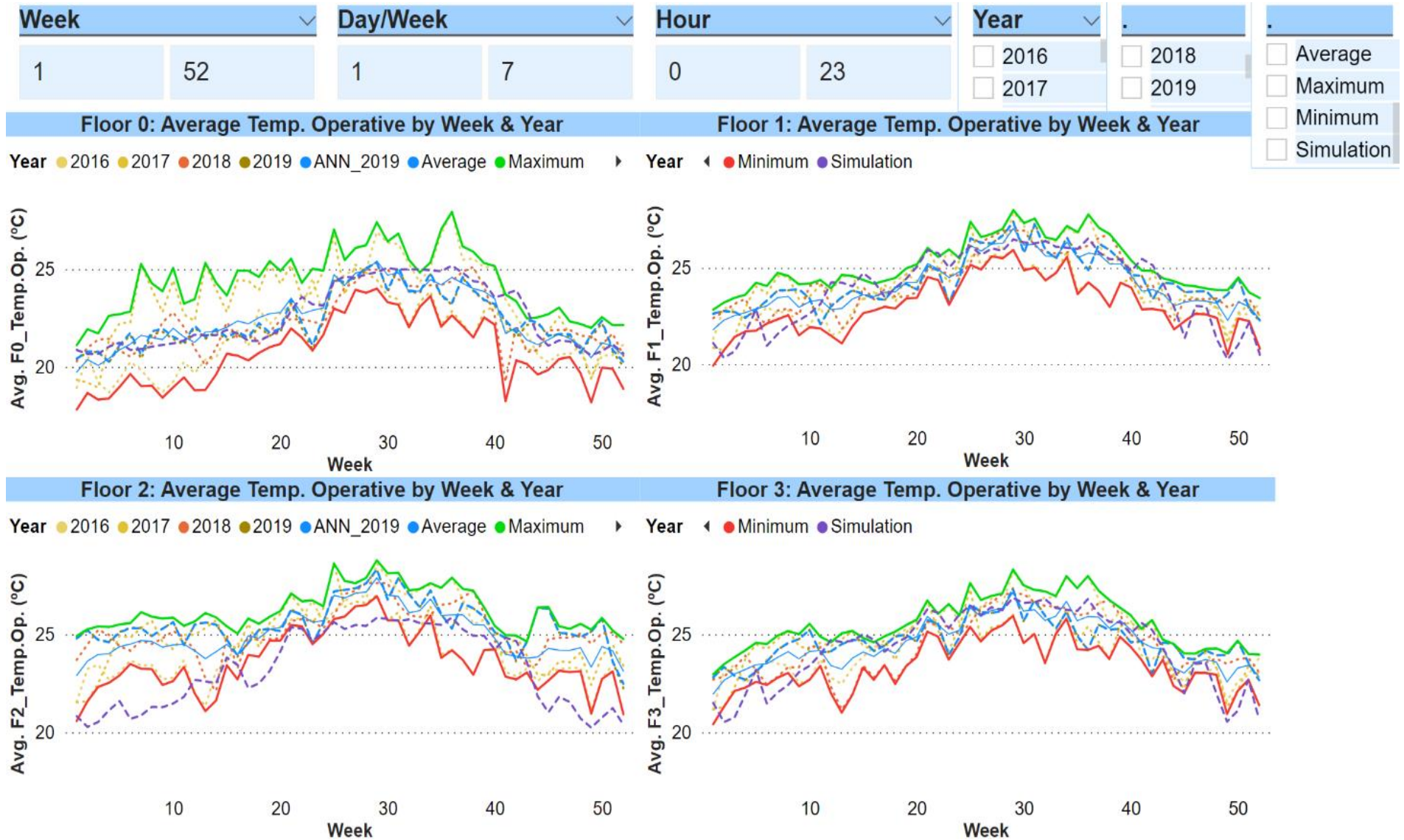


Figura 4.22. Gráficos de temperaturas operativas: datos de simulación y reales.

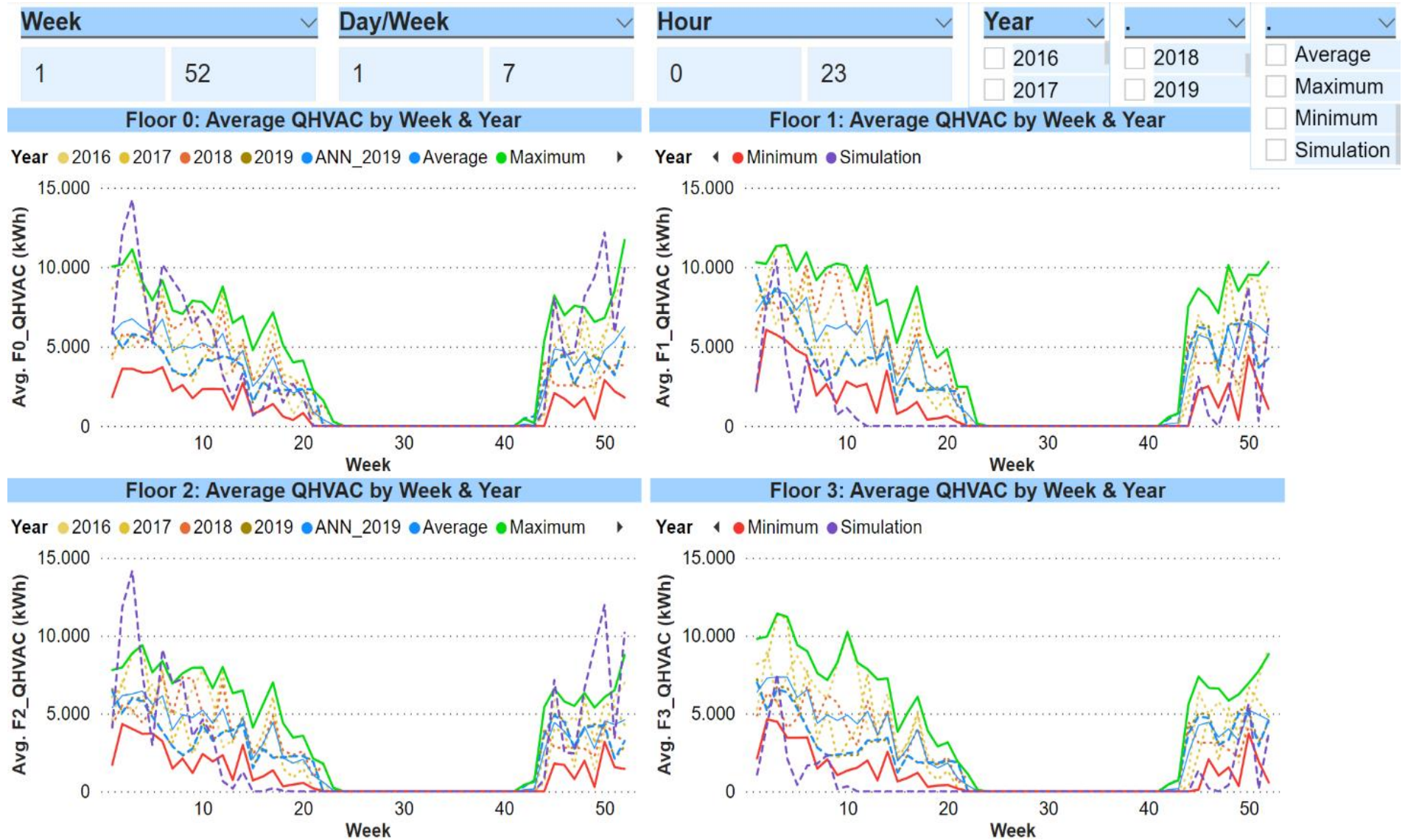


Figura 4.23. Gráficas de consumo de energía: datos de simulación y reales.

El primer punto destacable, es que los valores mínimos y máximos de los datos *TMV* utilizados en la simulación con *TRNSYS17* están dentro del rango de las mediciones reales realizadas in situ en el exterior del edificio bajo estudio durante los años 2016, 2017, 2018 y 2019. Sin embargo, todos los datos de temperatura ambiente tienen fuertes fluctuaciones que podrían dar lugar a discrepancias importantes. Dado que la temperatura ambiente es un factor crítico, es muy interesante conocer su previsión meteorológica. Disponer de dicha previsión, permite anticipar la gestión del sistema HVAC para alcanzar los requisitos de confort, optimizando el consumo energético del edificio.

Un segundo hecho reseñable, es que las temperaturas operativas son bastante estables y tienen dos épocas diferenciadas:

- ✓ el otoño – invierno, donde es requerida la aportación de la calefacción para alcanzar la temperatura de consigna en cada planta del edificio,
- ✓ y las estaciones de primavera – verano, donde dicha temperatura de consigna se ve superada por las temperaturas operativas en ciertos momentos, pero dentro de los requisitos de confort.

En ambas épocas, es la segunda planta la que presenta un comportamiento más anárquico con respecto a la simulación. Dicha zona térmica, en algunos momentos llega a salirse de los mínimos y máximos recopilados en los datos reales. Posiblemente al tratarse de una planta intermedia, se vea afectada en mayor medida por el balance energético entre las plantas, dado que entre ellas se intercambian energía. Además, esta planta tiene parte de su envolvente superior en contacto con la cubierta, y por tanto se ve también afectada por las condiciones climáticas externas.

Y por último cabe resaltar, que los valores del consumo de energía requerido para alcanzar las temperaturas operativas anteriormente indicadas, obtenidos de la simulación presentan un comportamiento muy inestable. Se observan valores pico y valle que se escapan de los mínimos y máximos consumos de energía registrados durante los 4 años analizados. Esta situación tiene justificación por la propia inercia térmica de cualquier edificio, pero sobretodo por las perturbaciones que se generan

por sus ocupantes y su uso. Estas situaciones son la principal razón, por la que como se ha comentado anteriormente, tras cualquier modelizado y simulación de un edificio, es conveniente realizar una calibración. Esta calibración permite realizar ajustes en el sistema, para que la correlación del mundo virtual sea lo más próxima posible a la realidad.

#### **4.3.- Generación de un modelo basado en ANN del edificio objeto.**

Una vez se dispone de todas las entradas (*Inputs*) del sistema que tienen una influencia determinante para la climatización del edificio, se han dispuesto por cada año en archivos CSV, respetando el formato generado a través del *TRNSYS17*. Dicho formato es explicado en detalle más adelante, pero contiene en cada una de sus 8760 líneas (1 línea por cada hora del año), la hora en cuestión, el correspondiente día de la semana, el mes, el día del mes, la temperatura seca del ambiente exterior, un parámetro que indica cuando el sistema de climatización HVAC está apagado o en funcionamiento, el grado de uso en tanto por ciento del total de la iluminación instalada, el número de personas y el número de equipos informáticos en funcionamiento por piso. Con estos *Inputs*, el objetivo es obtener la evolución horaria de la temperatura operativa de cada zona térmica, es decir la temperatura operativa por cada planta del edificio, así como el consumo energético requerido para ello.

Para todo ello se ha desarrollado una configuración experimental para construir un modelo basado en ANN. Después del proceso de recopilación de datos descrito anteriormente, se han organizado tres colecciones de datos diferentes. La serie de datos obtenidos de la simulación con *TRNSYS17*, los datos reales del año 2016 y especialmente las 8760 tuplas del año 2017 se han utilizado para definir y entrenar al modelo neuronal. La serie de datos reales del año 2018, compuesta por 8760 tuplas, ha sido utilizada para validar la ANN con el fin de evitar sobreajustes. Y finalmente, las últimas 8760 tuplas pertenecientes a los datos reales del año 2019, han sido empleadas para testear el aprendizaje y la capacidad de generalización del modelo entrenado.

Hay varios tipos de arquitecturas ANN. Entre ellas, dada la complejidad y características del sistema planteado, se ha optado por un tipo específico de ANN denominado como redes neuronales retardadas en el tiempo y conocido por su denominación en inglés de TDNN (*Time Delayed Neural Networks*), cuyas características son detalladas por Rios et al. [86] y Alanis et al. [87]. Este tipo de ANN son redes con memoria, en el sentido de que pueden retener la dinámica del sistema a modelar. Esta característica es especialmente adecuada para afrontar esta investigación, dada la gran importancia de la inercia térmica subyacente en el propio edificio bajo estudio. Para adquirir esta característica, las redes TDNN tienen dos entradas extras en su capa de entrada: las entradas retardadas y las entradas de retroalimentación. Las primeras son versiones retardadas de las señales de entrada, mientras que las segundas son versiones retardadas de las señales generadas por la TDNN. Además, son flexibles, en el sentido de que el diseñador puede determinar el número de retardos de cada uno de estos subconjuntos de entradas. En el desarrollo de esta investigación, la determinación del número de retardos se ha realizado de forma heurística.

Una vez elegida la estructura de la ANN, se determinan sus entradas y salidas. Inicialmente se planteó la interacción entre plantas dentro de un mismo modelo neuronal, pero se obtenían resultados con excesivas discrepancias (probablemente se producía un sobreaprendizaje, así como la posible influencia de la ubicación de los sensores de entradas, aislamientos de cada habitáculo, etc...). Por ello, finalmente se han considerado las dos salidas (la temperatura operativa y el consumo de energía) de cada planta, de forma independiente. Es decir, se han generado 8 ANN's, una por cada variable de salida y planta del edificio. Las salidas que se desean obtener: la temperatura operativa y el consumo de energía en cada una de las plantas, son magnitudes de tipo numérico real, de las cuales se disponen su valor y por tanto pueden ser contrastadas. Respecto a las entradas (*Inputs*), se han tomado como se indicó anteriormente temperatura seca del ambiente exterior, la ocupación en cantidad de personas (que varía de 0 a 150 ocupantes en función del rango horario), el número de equipos informáticos en funcionamiento por ser un edificio administrativo (el cual oscila entre 0 y 100 ordenadores) y el nivel de luces (considerando de 0% a 100% de la potencia de la iluminación instalada que dispone

el edificio en función del % Horario), estos 3 últimos elementos afectan de forma directa a las ganancias internas que puede tener el edificio bajo estudio. El %Horario está relacionado con el horario de uso: el edificio solo tiene actividad entre semana de 7:00 am a 9:00 pm, siendo su pico de actividad entre las 8:00 am y las 11:00 am con un 100%, variando hasta al 10% en la última hora, entre 20:00 y las 21:00 horas. Además, se considera un parámetro de referencia para el sistema de climatización (con solo dos valores: 0% significa que el sistema HVAC está apagado y 100% cuando el HVAC está encendido).

Como ya se ha indicado anteriormente, las versiones retardadas de estas señales (tanto de entradas como de las salidas) se consideran en la capa de entrada de cada una de las ANN's generadas para cada planta, y cada una de las dos magnitudes a predecir: temperatura operativa y consumo energético. Para determinar la estructura específica de cada ANN se ha realizado un procedimiento heurístico (una técnica para encontrar una solución quizás no óptima, pero aceptable en muy poco tiempo en comparación con una búsqueda completa en el espacio de soluciones), que conduce a los valores: nodos en la capa oculta, retardos de entrada y retardos de retroalimentación, tanto para la temperatura operativa como para los modelos de consumo de energía, como se indica en la Tabla 4.4, siguiendo las siguientes premisas:

- ✓ Se utilizaron diferentes ANN específicas tanto para Temperatura Operativa como para Consumo de Energía.
- ✓ Se utilizaron diferentes ANN específicas para cada uno de los 4 pisos diferentes.
- ✓ Se utilizaron ANN's de una capa oculta, dado que permite obtener resultados los cuales satisfacen el porcentaje de error definido, sin generar un patrón excesivamente complejo que incrementaría el tiempo computacional requerido para su procesamiento.
- ✓ El número evaluado de nodos ocultos no fue consecutivo, porque de forma análoga al punto anterior, esta configuración alcanza un equilibrio correcto entre el esfuerzo computacional y el resultado.
- ✓ Hubo un equilibrio entre el número de retrasos de entrada y los retrasos de retroalimentación.





- ✓ El número de retrasos evaluados, tanto de entrada como de realimentación, no fue consecutivo, dado que al igual que en el número de nodos ocultos, es la configuración donde mejor equilibrio se alcanza valorando el esfuerzo computacional y el resultado obtenido.

Tabla 4.4. Definición de estructura ANN por cada planta y tiempo computacional

<b>Temperatura operativa</b>	<b>Nº nodos en la capa oculta</b>	<b>Nº retardos de entrada</b>	<b>Nº retardos de retroalimentación</b>	<b>Tiempo (s) computacional</b>
Planta Baja	2	1	11	8.09
Primera Planta	8	13	11	12.74
Segunda Planta	8	5	13	13.51
Tercera Planta	6	3	13	10.02

<b>Consumo energético</b>	<b>Nº nodos en la capa oculta</b>	<b>Nº retardos de entrada</b>	<b>Nº retardos de retroalimentación</b>	<b>Tiempo (s) computacional</b>
Planta Baja	4	13	13	32.07
Primera Planta	10	7	11	17.54
Segunda Planta	2	7	13	10.16
Tercera Planta	8	9	13	22.66

Todas las ANN se han entrenado utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt, utilizando el valor de error cuadrático medio o en su denominación en inglés de MSE (*Mean Square Error*) como métrica del aprendizaje alcanzado. El resultado de las predicciones realizadas por el modelo basado en ANN, se ha considerado aceptable para establecer una predicción efectiva de la temperatura operativa y el consumo energético con base en dicho MSE, en la raíz cuadrada de la media de la desviación o en inglés RMSE (*Root Mean Square Error*) y el error de desviación estándar o también denominado en inglés: *Standard Deviation Error*, alcanzado en cada una de las zonas térmicas definidas para las temperaturas operativas y el consumo total de energía, es decir en cada una de las plantas del edificio.

Finalmente, en la última columna de la Tabla 4.4 se muestra el tiempo computacional necesario para entrenar el mejor modelo para cada planta, tanto para la temperatura operativa como para el consumo de energía. Estos tiempos fueron obtenidos mediante el software *Mathworks Matlab R2021b*, y las características específicas del equipo utilizado son las siguientes: 2 procesadores *Intel Xeon* con un total de 28 cores, 96 GB de memoria RAM y dispositivos de

almacenamiento de datos tipo SSD, corriendo *Microsoft Windows 10 Enterprise*. Cabe reseñar, que una vez determinados la estructura de los modelos ANN, es posible volver a entrenarlos cuando se recopilan nuevos datos reales, sin un incremento significativo en el tiempo de entrenamiento.

Los resultados de las predicciones realizadas por el modelo ANN obtenido, se han considerado aceptables para establecer una predicción efectiva de la Temperatura Operativa y el Consumo de Energía en base al MBE (*Mean Bias Error*), RMSE y el Error de Desviación Estándar de cada uno de las zonas térmicas para las Temperaturas Operativas y Consumo Energético total. Así como con los criterios de calibración horaria de la FEMP M&V Guidelines (*Measurement and Verification Guidelines for Federal Energy Management Program*) [88], la IPMVP (*International Performance Measurement and Verification Protocol*) [89], y la Directriz ASHRAE 14 (*American Society of Heating, Ventilating and Air Conditioning Engineers*) [90], tal y como se resumen en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5. Criterios de calibración horaria de la FEMP, la IPMVP y ASHRAE

Ref.	Criterio Calibración	Indice	Tipo Calibración		Recomendación Modelo (R <sup>2</sup> )
			Horaria	Mensual	
[88] (2015)	FEMP M&V Guidelines	MBE	<b>≤ ±10%</b>	≤ ±5%	
		RMSE	≤ 30%	≤ 15%	
[89] (2012)	IPMVP	MBE	<b>≤± 5%</b>	≤± 20%	<b>&gt; 0,75</b>
		RMSE	≤ 20%		
[90] (2014)	ASHRAE Guideline 14	MBE	<b>≤ ±10%</b>	≤ ±5%	<b>&gt; 0,75</b>
		RMSE	≤ 30%	≤ 15%	

Estos criterios han sido analizados por Fernández et al. [91], con el objetivo de estandarizar el proceso de calibración del modelado de un edificio. Y por Ramos et al. [92], para aclarar los errores típicos que pueden ocurrir en dicho modelado. Además, el valor de la calibración es muy prometedor porque los valores de MBE en todas las plantas del edificio, están por debajo de -3.70% como se muestra más adelante en la Tabla 5.1. Este valor se tomó como referencia, en base a la investigación realizada en el bloque Oeste del mismo edificio, en la investigación desarrollada por Martín-Escudero et al. [93].

#### 4.4.- Conclusiones del caso práctico estudiado.

Tras esta investigación, se han analizado los factores más determinantes de un sistema energético para un edificio. Y también, se ha corroborado que los datos sintéticos obtenidos del modelizado y simulación con *TRNSYS17*, tienen una correlación aceptable contra los datos reales disponibles en las comparaciones o *benchmarking* analizadas con el *Power BI*. No obstante, en determinadas series de datos, requerirían realizar un ajuste a través de un proceso de calibración.

Considerando que dicho proceso de calibración, requiere la toma de datos in situ en el edificio objeto, se pueden tomar dichas mediciones reales para crear un modelo ANN. El objetivo era permitir la estimación de la temperatura operativa y el consumo energético, partiendo de las mismas entradas (*inputs*) que determinan los factores con mayor influencia en la climatización de un edificio. Partiendo de esta base, se han generado series de datos en el mismo formato en ficheros CSV. Estos ficheros CSV, con los datos sintéticos obtenidos a través de *TRNSYS17* y los datos de las mediciones reales realizadas en el 2016 y 2017, han permitido definir y entrenar un modelo ANN, mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt. La serie de datos reales del año 2018, con sus 8760 tuplas, ha sido utilizada para validar el modelo ANN con el fin de evitar sobreajustes. Y con los datos reales del año 2019, se ha testeado el aprendizaje y la capacidad de generalización del modelo ANN. Con esta última serie de datos, se ha comprobado el grado de precisión de nuestro modelo ANN. Los datos obtenidos a través del modelo ANN han sido muy prometedores y se muestran en el Capítulo 5.

# Capítulo 5

## Conclusiones:

Análisis de datos obtenidos y conclusiones alcanzadas.

## Capítulo 5

### 5.- Conclusiones

#### 5.1.- Introducción.

Esta investigación surge del interés por simplificar y reducir el costo del proceso de modelizado / simulación de los edificios y optimizar su consumo energético a partir de previsiones de temperaturas atmosféricas así como de uso del propio edificio.

Como se ha explicado en los capítulos anteriores, el proceso de modelizado / simulación de los edificios es un proceso laborioso, que requiere unos medios técnicos y humanos costosos. En esta investigación se ha constatado, realizando ambos procesos y concluyendo que finalmente un proceso de calibración con mediciones reales resulta esencial para realizar un ajuste final adecuado de dicha simulación. En esta situación donde se dispone del registro de datos reales para ajustar el modelo y que su simulación sea más cercana a la realidad, nos ha llevado a plantear el desarrollo de un modelo ANN. Este modelo ANN se basa en mediciones reales, definidas como entradas (*inputs*), que caracterizan los principales factores que tienen impacto en el sistema de climatización de un edificio. Y para validar su respuesta, se han considerado dos salidas (*outputs*): las temperaturas operativas y el consumo de energía requerido para climatizar cada zona térmica definida, a fin optimizar la gestión del sistema de climatización de un edificio público de oficinas.

Este planteamiento a través de un modelo ANN, reduce significativamente los recursos necesarios, dado que no es requerido desarrollar todo un proceso de modelizado, con el tiempo que conlleva recopilar planos, documentación e información de la envolvente del edificio. Ni tampoco es requerido un proceso de simulación completo con su posterior calibración, sino que la propia recopilación de mediciones reales es la que sirve como base para desarrollar el modelo ANN.

## 5.2.- Análisis de datos obtenidos.

Para el análisis y comparación de los datos, se ha aplicado una aplicación ETL utilizada en el entorno *Business Intelligence*, como es el *Microsoft Power BI Desktop*. Esta aplicación nos ha permitido establecer comparativas entre series de datos, primero para conocer las posibles carencias de la simulación realizada con *TRNSYS17*. Y posteriormente, para comprobar la correlación de las estimaciones obtenidas con el modelo ANN del sistema de climatización del edificio bajo estudio.

La representación gráfica de la información analizada, así como todas las series de datos y con la posibilidad de navegar: seleccionando distintos rangos, navegando subiendo o bajando de nivel mostrando los datos por hora, día y semana, etcétera se puede realizar a través del siguiente el enlace *Web*:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODBkNGNIM2ItNzNkNC00NTA0LTgwMDQtYTYzYzhjZDY3ZDcwIiwidCI6ImYzM2Y0ODE2LTc0OTMtNDZmYi05ZjY4LWY0NDJmNzU0ZmNhNyIsImMiOi9>



Figura 5.1. . Web para visualizar graficas de la investigación a través *Power BI*.

A modo resumen, a continuación se destacan tres capturas de pantalla que sirven para ilustrar la información que puede verse en dicho enlace y sirve para ilustrar los resultados obtenidos en esta investigación:

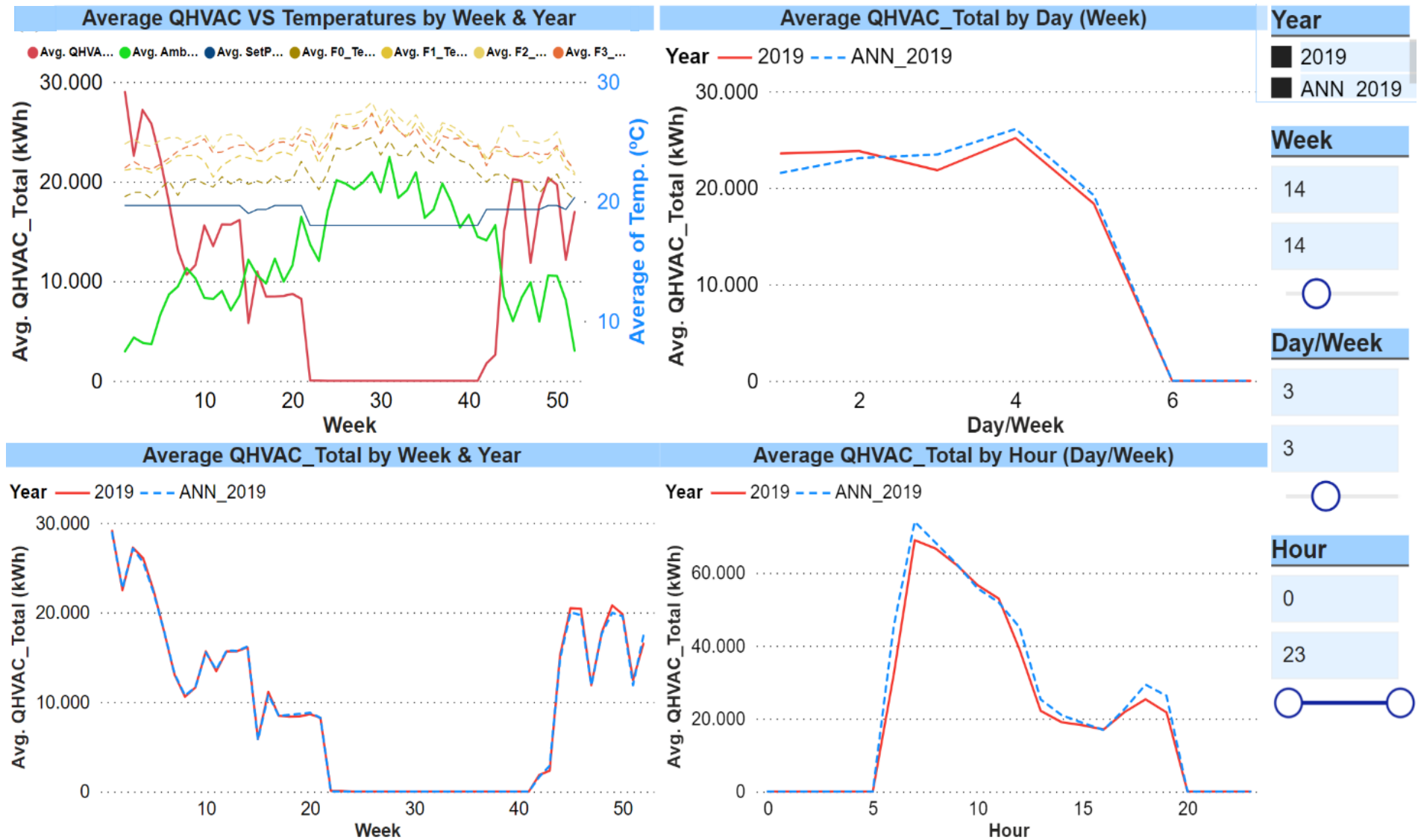


Figura 5.2. Año 2019: Consumo energético real contra datos estimados por ANN.

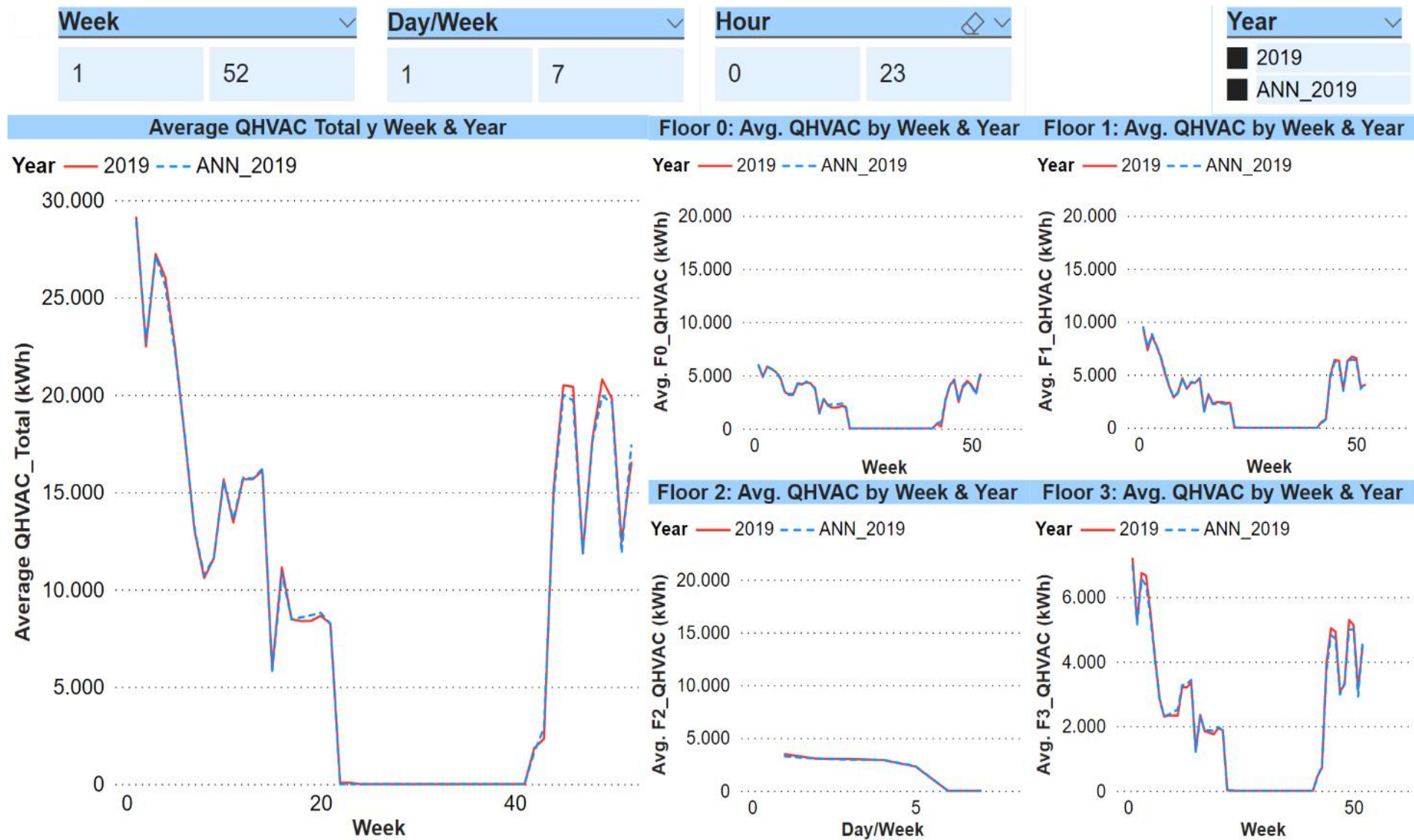


Figura 5.3. Año 2019: Consumo energético real por planta contra estimación ANN.



Week		Day/Week		Hour		Year
1	52	1	7	0	23	<input type="checkbox"/> 2019 <input checked="" type="checkbox"/> ANN_2019

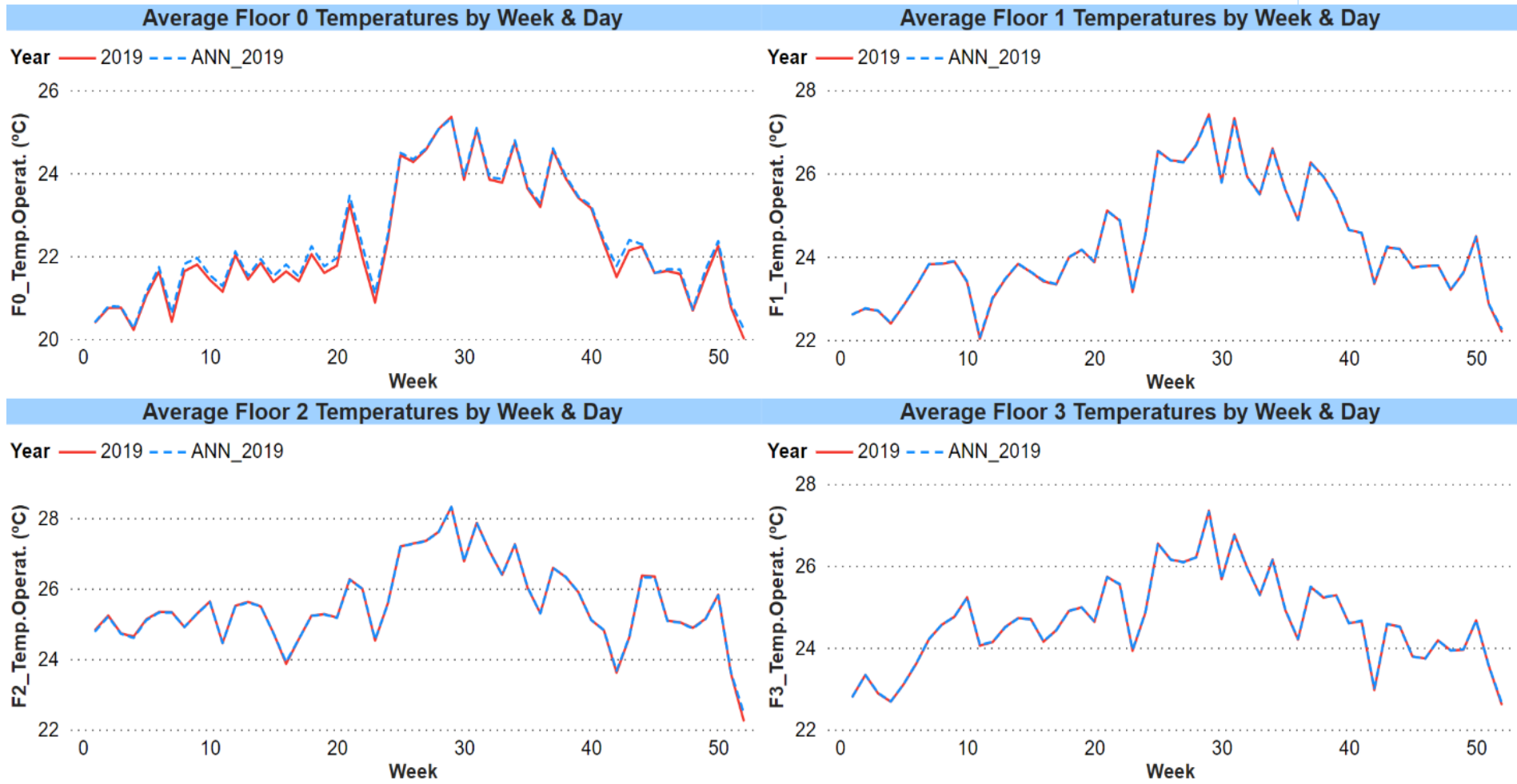


Figura 5.4. Año 2019: Temperatura operativa real por planta contra estimación ANN.



La Figura 5.2 muestra la evolución de datos reales comparándolos contra los datos estimados obtenidos a través de modelo ANN del consumo de energía total (kWh) durante el año 2019. En la Figura 5.3 se muestra el consumo de energía en cada una de las zonas térmicas definidas, en esta investigación cada planta. Y aún mejores son los resultados que se han obtenido con el modelo ANN de la temperatura operativa (°C), tal y como se muestra en la Figura 5.4:

Dichas comparativas con sus márgenes de error obtenidos, se muestran en la Tabla 5.1, donde puede comprobarse los valores en base a la RMSE, el MSE y el Error de Desviación Estándar para cada una de las zonas térmicas definidas, tanto para la temperatura operativa como para el consumo de energía durante el año 2019. También se muestra el valor calculado para la recomendación del modelo R<sup>2</sup>. Todos los valores obtenidos cumplen los criterios de calibración horaria indicados en la Tabla 4.5:

Tabla 5.1. Datos calibración, precisión y resultados del modelo ANN: año 2019

Año:		Temperatura Operativa				
2019	Calibración Horaria	Precisión resultados	Promedio Semanal	% min. (20,25 °C)	% media (22,41 °C)	% máx. (25,32 °C)
<b>Planta Baja</b>	<b>-0,45%</b>	RMSE (Test)	0,12609 °C	0,62%	0,56%	0,50%
<b>MBE (%) ≤±5%</b>		MSE (Test)	0,01590 °C <sup>2</sup>		<b>Recomendación Modelo:</b> <b>R<sup>2</sup> (&gt; 0,75)    0,97</b>	
		Error Dev. St.	0,01021			
<b>Primera Planta</b>				(22,07 °C)	(24,33 °C)	(27,38 °C)
<b>MBE (%) ≤±5%</b>	<b>-0,01%</b>	RMSE (Test)	0,01991 °C	0,09%	0,08%	0,07%
		MSE (Test)	0,00040 °C <sup>2</sup>		<b>Recomendación Modelo:</b> <b>R<sup>2</sup> (&gt; 0,75)    0,99</b>	
		Error Dev. St.	0,00275			
<b>Segunda Planta</b>				(22,48 °C)	(25,56 °C)	(28,32 °C)
<b>MBE (%) ≤±5%</b>	<b>0,02%</b>	RMSE (Test)	0,03635 °C	0,16%	0,14%	0,13%
		MSE (Test)	0,00132 °C <sup>2</sup>		<b>Recomendación Modelo:</b> <b>R<sup>2</sup> (&gt; 0,75)    0,99</b>	
		Error Dev. St.	0,00509			
<b>Tercera Planta</b>				(22,67 °C)	(24,65 °C)	(27,32 °C)
<b>MBE (%) ≤±5%</b>	<b>-0,01%</b>	RMSE (Test)	0,01272 °C	0,06%	0,05%	0,05%
		MSE (Test)	0,00016 °C <sup>2</sup>		<b>Recomendación Modelo:</b> <b>R<sup>2</sup> (&gt; 0,75)    0,99</b>	
		Error Dev. St.	0,00174			



### Consumo Energético

2019	Calibración	Precisión	Promedio	% min.	% media	% máx.
Planta Baja	Horaria	resultados	Semanal	(0 kWh)	(2.194 kWh)	(5.951 kWh)
<b>MBE (%) <math>\leq \pm 5\%</math></b>	<b>-1,23%</b>	RMSE (Test)	120,26 kWh	-	5,48%	2,02%
		MSE (Test)	14.463,10 kWh <sup>2</sup>	<b>Recomendación Modelo:</b> <b>R<sup>2</sup> (&gt; 0,75)    0,82</b>		
		Error Dev. St.	16,39			
<b>Primera Planta</b>				(0 kWh)	(2.722 kWh)	(9.498 kWh)
<b>MBE (%) <math>\leq \pm 5\%</math></b>	<b>1,07%</b>	RMSE (Test)	117,42 kWh	-	4,31%	1,24%
		MSE (Test)	13.787,81 kWh <sup>2</sup>	<b>Recomendación Modelo:</b> <b>R<sup>2</sup> (&gt; 0,75)    0,94</b>		
		Error Dev. St.	15,93			
<b>Segunda Planta</b>				(0 kWh)	(2.092 kWh)	(6.443 kWh)
<b>MBE (%) <math>\leq \pm 5\%</math></b>	<b>1,55%</b>	RMSE (Test)	91,11 kWh	-	4,35%	1,41%
		MSE (Test)	8.300,75 kWh <sup>2</sup>	<b>Recomendación Modelo:</b> <b>R<sup>2</sup> (&gt; 0,75)    0,93</b>		
		Error Dev. St.	12,17			
<b>Tercera Planta</b>				(0 kWh)	(2.075 kWh)	(6.993 kWh)
<b>MBE (%) <math>\leq \pm 5\%</math></b>	<b>1,66%</b>	RMSE (Test)	118,34 kWh	-	5,70%	1,69%
		MSE (Test)	14.005,53 kWh <sup>2</sup>	<b>Recomendación Modelo:</b> <b>R<sup>2</sup> (&gt; 0,75)    0,91</b>		
		Error Dev. St.	15,98			

De los resultados obtenidos se concluye que la estimación de las temperaturas operativas, tienen un grado de precisión muy elevado, dado su RMSE oscila entre un 0,12609 °C en la planta baja y un 0,01272 °C en la tercera planta. Estos valores indican que la estimación de las temperaturas operativas, son muy fiables a través del modelo ANN. Probablemente sea justificado porque el rango, donde se mueven estas temperaturas medidas en el interior del edificio, es bastante estrecho. Todo ello, a pesar de que la última planta está más expuesta a las condiciones climatológicas externas y la planta baja puede sufrir más perturbaciones por la acción de los usuarios del edificio. Estas alteraciones son compensadas por el sistema HVAC del edificio y se reflejan finalmente a través del consumo de energía, que es la variable que más alteraciones sufre. Esta afirmación se ratifica en los altos valores obtenidos del RMSE para el consumo de energía total del edificio analizado, que oscilan entre un 120,26 kWh en la planta baja y un 91,11 kWh en la segunda planta. Sin embargo, como puede observarse en su representación

gráfica, las estimaciones obtenidas de consumo de energía a través del modelo ANN son muy próximas a la realidad, comparadas con las mediciones realizadas en campo durante el año 2019.

Para ambas variables, temperatura operativa y consumo de energía, es la planta baja la que mayores discrepancias presenta. Esto tiene sentido dado que es el acceso al edificio. Teóricamente, es la planta más expuesta a las perturbaciones originadas por el uso y grado de ocupación de las personas que interactúan con el edificio, y el que se ve sometida a una mayor entrada de aire exterior cada vez que se abren las puertas de acceso al edificio.

### **5.3.- Conclusiones alcanzadas.**

Esta investigación ha mostrado una correlación razonable entre datos reales de la temperatura operativa y el consumo de energía en 4 zonas térmicas definidas en cada una de las plantas de un edificio público de oficinas. Las estimaciones obtenidas, a través de un modelo ANN (*Artificial Neural Networks*) entrenado con el algoritmo de Levenberg-Marquardt, han alcanzado un alto grado de correlación. Constatándose a través esta investigación que, mediante el desarrollo de un modelo basado en ANN se puede obtener una estimación de la temperatura operativa y el consumo de energía requerido para climatizar cada una de las plantas de un edificio de oficinas, con un margen de error aceptable.

Es decir, en base a los resultados obtenidos se ha concluido que es factible aplicar un modelo ANN para simplificar todo el proceso descrito de modelizado y simulación en un edificio público de oficinas.

Sin embargo, en base a las desviaciones obtenidas en el RMSE, MSE y el error de desviación estándar, las estimaciones especialmente para el consumo de energía son mejorables. Esta situación es ilustrada en la comparativa grafica que se dispone en el enlace indicado en el apartado anterior, el cual fue desarrollado a través de la aplicación *Power BI*. A modo ejemplo se muestran y explican algunas situaciones representadas en las Figuras 5.5 a 5.10:

Week		Day/Week		Hour	
14	14	1	1	0	23

Year
■ 2019
■ ANN_2019

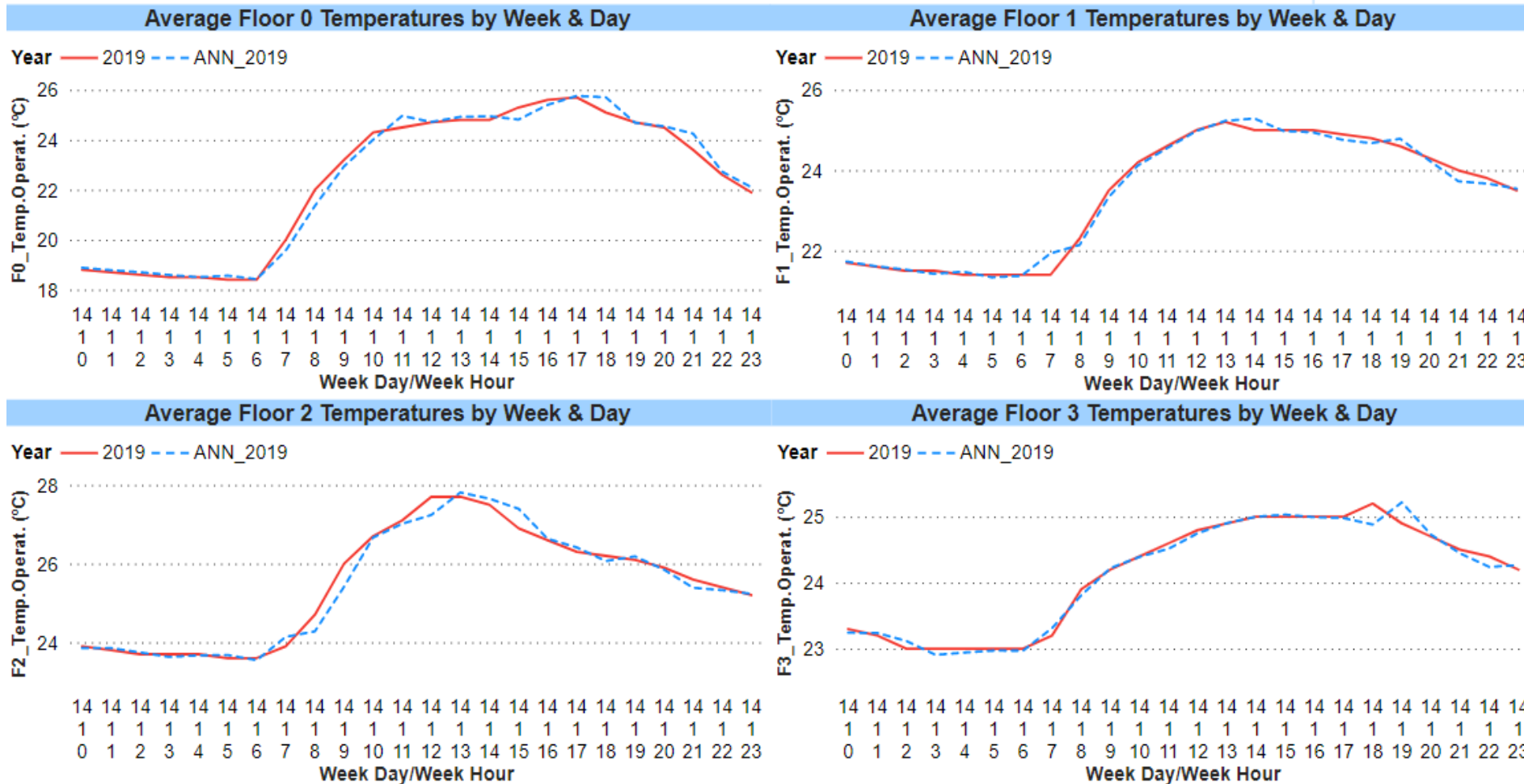


Figura 5.5. Graficas temperatura operativa por planta Real vs ANN: semana 14/1.



Figura 5.6. Graficas de consumo de energía Real vs ANN: semana 49/1.

En las gráficas mostradas en la Figura 5.5, se observa la evolución de la temperatura operativa en cada planta del edificio durante las 24 horas del primer día (lunes) de la semana 14. La línea discontinua de color azul, corresponde a la estimación realizada por el modelo ANN. Como se puede apreciar, no siempre está totalmente solapada con la línea continua roja, la cual representa las mediciones reales. Estas ligeras discrepancias, se producen sobretudo durante los periodos de uso del edificio, cuando el sistema HVAC está operativo, y puede influir la propia inercia térmica del edificio. Pero sobretudo se justificaría por la interacción de sus ocupantes, que provocan cambios o perturbaciones en el sistema, que el modelo ANN requiere un tiempo en ajustar.

Siguiendo la misma filosofía con el consumo de energía, en la Figura 5.6 se muestran la estimación realizada por el modelo ANN (representado con la línea discontinua color azul) y las mediciones reales (línea continua roja). Se ha seleccionado la semana 49 porque es donde se ha detectado la mayor discrepancia, sobretudo durante el primer día (lunes) de dicha semana. Un análisis en más detalle permite observar en la gráfica horaria, como el mayor desajuste se produce a primera hora de la mañana, donde en los datos reales (línea continua roja), se observa cómo se inicia el consumo energético en el sistema de climatización del edificio. Mientras que en las estimaciones del modelo ANN, representadas con la línea discontinua azul, se presenta un retraso que a posteriori se compensa con un ligero pico para luego descender y realizar ciertos rebotes, buscando seguir la línea con los datos reales.

Al igual que lo ocurrido con la temperatura operativa e indicado anteriormente, las discrepancias se producen durante los periodos de uso del edificio, con el sistema HVAC operativo e influye la inercia térmica del edificio. Principalmente, se considera que existen mayores perturbaciones debidas a la interacción de los ocupantes del propio edificio, que el modelo ANN requiere un tiempo para reconducir. Además, se ha detectado que el retraso inicial se produce principalmente el primer día de la semana, es decir el lunes, tras 2 días sin apenas actividad en lo relativo al consumo de energía.

Esta misma situación, puede observarse en las gráficas mostradas en la Figura 5.7, que representan los datos obtenidos en el lunes de la semana 14. En este caso, los picos y efecto rebote están más extendidos. Probablemente este hecho se produce, porque tras una desviación, el modelo ANN intenta reconducir su correlación con los datos reales, pero en cualquier caso como puede observarse en la gráfica inferior derecha, la estimación ANN vuelve a superponerse con los datos reales al final del periodo temporal indicado.

Circunstancias similares, donde el modelo ANN a través de su proceso de autoaprendizaje, se ajusta para alcanzar un alto grado de correspondencia con la realidad, pueden observarse en la Figura 5.8. En dichas graficas se visualizan los datos obtenidos el miércoles (día 3) de la semana 49.

La correlación entre ambas series de datos se contrasta perfectamente en las gráficas mostradas en la Figura 5.9, donde la línea discontinua color azul correspondiente a la estimación realizada por el modelo ANN, permanece solapada en gran medida con la línea continua roja, que corresponde a las mediciones reales del miércoles (día 3) de la semana 14:

Y por último de la Figura 5.10, sobre este mismo periodo de tiempo, el miércoles (día 3) de la semana 14, donde se muestra el detalle del consumo de energía del edificio completo y de cada una de sus plantas para el rango comprendido entre las 5:00am a las 16:00pm.



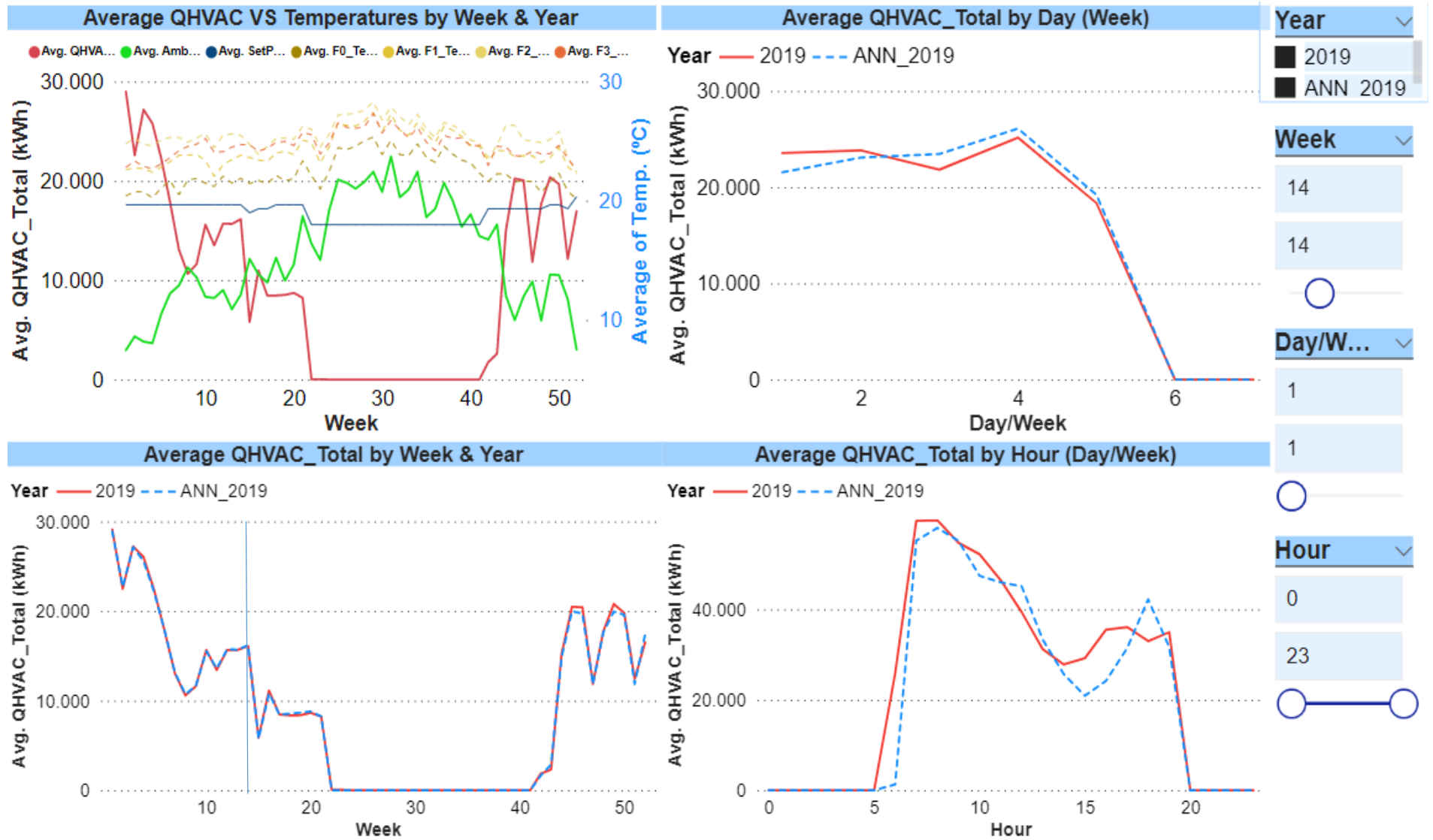


Figura 5.7. Graficas de consumo de energía Real vs ANN: semana 14/1.

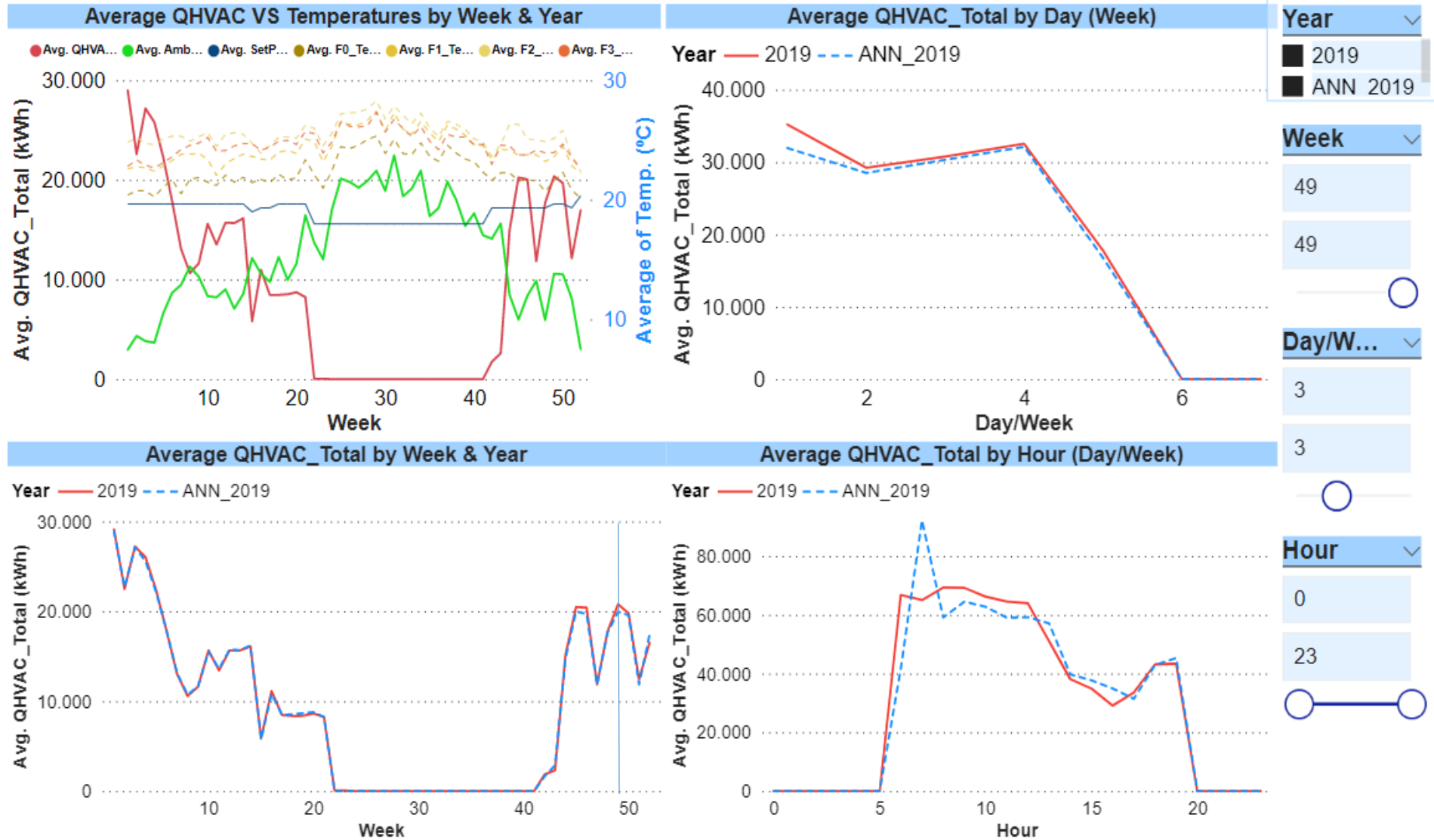


Figura 5.8. Graficas de consumo de energía Real vs ANN: semana 49/3.

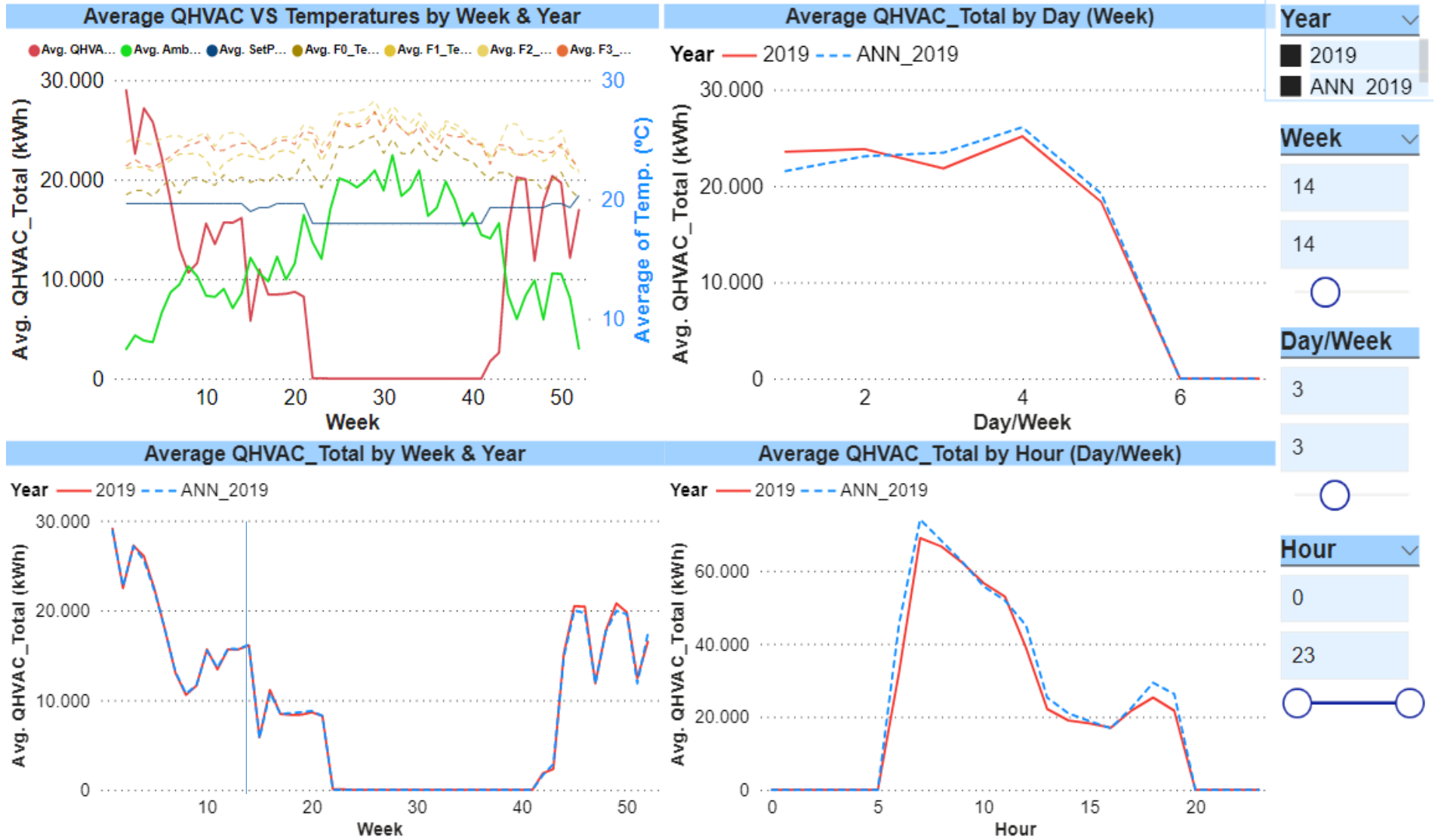


Figura 5.9. Graficas de consumo de energía Real vs ANN: semana 14/3.

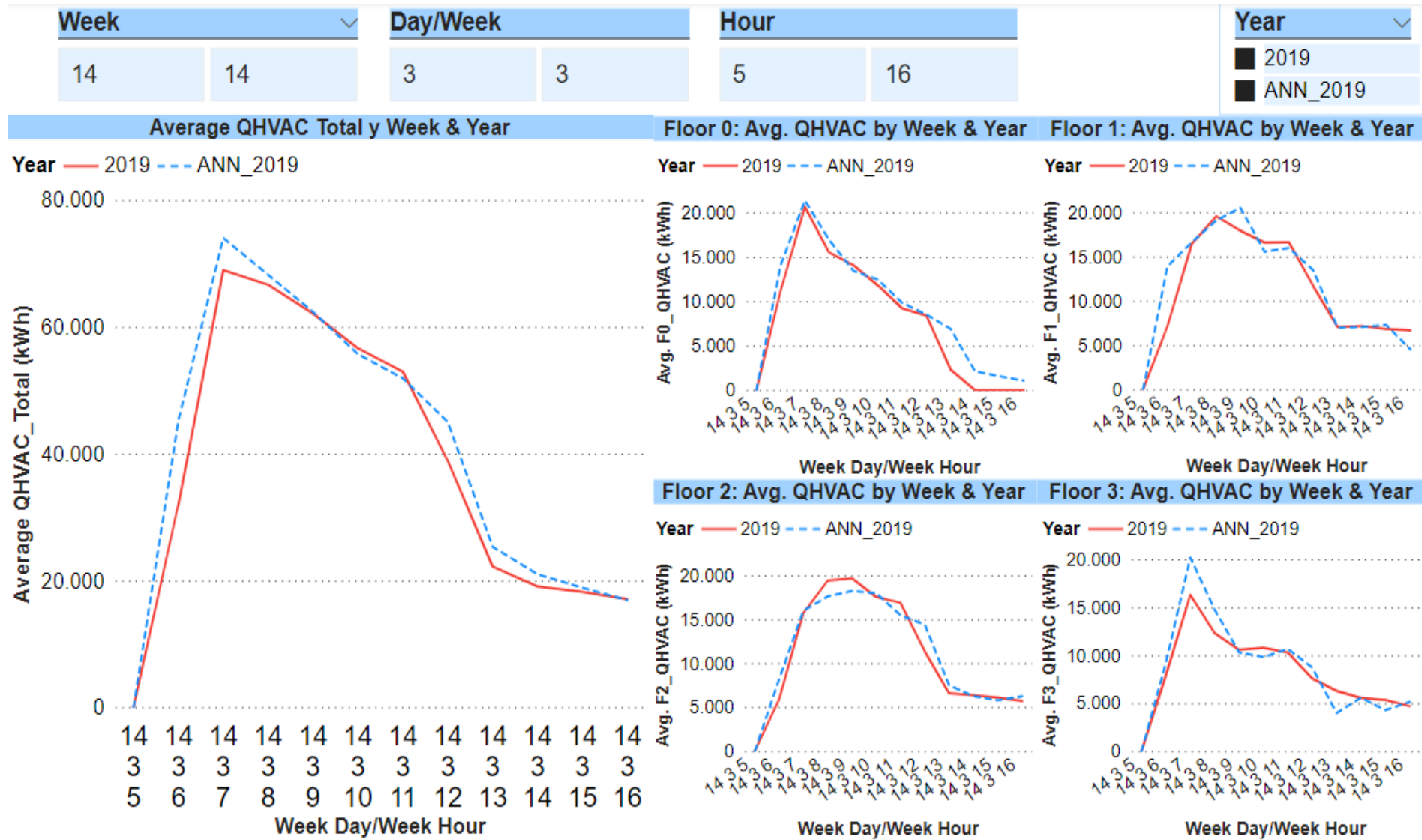


Figura 5.10. Graficas consumo por plantas Real vs ANN: semana 14/3 5:00-16:00.

De forma análoga a las anteriores figuras, las estimaciones del modelo ANN que están representadas con la línea discontinua azul, tienen una correlación con los datos de mediciones reales representados por la línea continua roja. Existe una correspondencia bastante elevada, tanto en el consumo energético en climatización del edificio y como dicho consumo en cada una de sus plantas. Los ligeros picos o rebotes que se observan, tienen las justificaciones ya indicadas, por la inercia térmica del propio edificio, así como por las perturbaciones originadas por los ocupantes durante su uso.

Concluyendo, el comportamiento del modelo ANN es coherente y consigue replicar con sus estimaciones la evolución de los datos reales. Tal y como se ha justificado y mostrado en la Tabla 5.1, con el grado de precisión alcanzado en los resultados obtenidos del RMSE, MSE y el error de desviación estándar. Estos ejemplos gráficos mostrados, justifican que existe una correlación razonable entre las mediciones reales y las estimaciones obtenidas del modelo ANN, tanto de la temperatura operativa como del consumo de energía para la climatización, de cada planta en el edificio público de oficinas donde se ha desarrollado esta investigación.

Otra conclusión relevante, es que el modelo ANN debe contemplar todos los factores que tienen influencia en el comportamiento térmico del edificio. Es fundamental, disponer de unas previsiones de condiciones atmosféricas de temperatura, para optimizar el consumo energético del edificio. Se considera interesante disponer de una WSN (*Wireless Sensor Network*), para proporcionar a dicho modelo ANN, las condiciones ambientales internas y el grado de ocupación real del edificio en tiempo cuasi real. De esta forma el modelo ANN, dispondría de toda la información para gestionar el sistema HVAC del edificio. Es decir, se estaría implementado una estrategia MPC (*Model Predictive Control*) para optimizar el consumo de energía requerido para la climatización de dicho edificio. Obviamente si además, el sistema HVAC está compuesto por dispositivos RES (*Renewable Energy Source*), alcanzar los estándares nZEB (*nearly-Zero Energy Buildings*), sería una meta totalmente realizable y la disminución CO<sub>2</sub> una de sus aportaciones más significativas.

Y como última conclusión, la aplicación de metodologías del sector industrial, como la denominada *Business Intelligence*. Las herramientas aplicadas en dicho ámbito, pueden aplicarse en gran medida al proceso de climatización de edificios, a fin de optimizar su consumo energético, y por tanto alcanzar una reducción de CO<sub>2</sub>. Las posibilidades para el análisis y comparación de datos a través de una aplicación ETL (*Extract – Transform – Load*), en el caso de esta investigación mediante *Microsoft Power BI Desktop*, ha sido muy práctico y útil. Estas herramientas informáticas permiten gestionar una gran cantidad de datos, para extraer las conclusiones pertinentes y presentarlas en una plataforma amigable e intuitiva.

#### **5.4.- Implicaciones de la teoría.**

La principal implicación de esta tesis, es que se ha validado la hipótesis inicial de trabajo, donde se planteaba la aplicación de un modelo ANN para realizar estimaciones fiables de la temperatura operativa y el consumo de energía de cada una de las plantas del edificio público de oficinas. Este planteamiento abre la posibilidad de reducir el proceso de modelizado y simulación de un edificio. Para ello, se puede partir únicamente de datos reales captados sobre el propio edificio, lo cual simplificaría notablemente el proceso de modelizado del edificio en cuestión. Esto también, implica que se puede simplificar el proceso calibración para validar la información sobre el comportamiento térmico de un edificio. La justificación es que se utilizaría el propio modelo ANN, para contrastar si tiene una correlación aceptable con la realidad del edificio.

Un modelo ANN puede ser generado partiendo de unas previsiones atmosféricas, bien de estaciones meteorológicas cercanas al edificio o mediante sensores aplicados en la tecnología BAS (*Building Automation System*). Considerando esta base, es planteable gestionar cualquier sistema HVAC para optimizar el consumo energético de un edificio, en base a su histórico de ocupación y los requerimientos de confort que tenga establecidos. Además, en el caso de edificios públicos de oficinas, donde puede haber fluctuaciones importantes en su grado de ocupación, se pueden instalar elementos como HP (*Heat Pump*) de alto rendimiento. Estos dispositivos de alta eficiencia energética, permiten reaccionar ante estas

variaciones bruscas, las cuales podrían ser detectadas a través de una WSN. Con todo ello, y a través del correspondiente procesamiento de la información capturada, mediante el modelo ANN se puede gestionar el funcionamiento del sistema HVAC. Esto aseguraría que se cumplan todos los requisitos de confort del edificio, sin penalizar el consumo de energía.

Continuando con la aplicación de los avances conseguidos en el sector industrial, se podrían aplicar estrategias de la Industria 4.0 en la climatización de edificios, a fin de que todos sus sistemas estén integrados y sincronizados en tiempo real. La Industria 4.0 exige que los sistemas de producción, tanto internos como externos, estén interconectados íntegramente y sincronizados en tiempo real. Es decir, considera un modelo de red donde sus diferentes procesos están interconectados, en lugar del modelo piramidal tradicional de automatización industrial. Esto permite la creación de sistemas más flexibles, a través de dicha conexión entre procesos y el consecuente intercambio continuo de datos. La computación en la nube o *Cloud Computing* y el *Big Data* son fundamentales para optimizar dicho modelo junto con el concepto *Internet* de las cosas o en su denominación en inglés: *Internet of things*, conocido por sus siglas IoT. Las herramientas IoT capturan y transmiten todo tipo de datos en tiempo real a través de *Internet*. La interacción de estos sistemas, permite procesar toda la información generada y realizar su análisis a través de “Cyber-Sistemas físicos” compuestos por el hardware y los algoritmos adecuados. Este proceso de análisis se basa en convertir una inmensa cantidad de datos en información útil. Para ello se emplean herramientas ETL a fin de tomar las decisiones oportunas en cada momento, aplicando filosofías de trabajo *Business Intelligence*.

El *Business Intelligence* se centra en los procesos de análisis de dichos datos, para convertirlos en información y tomar las decisiones de negocio oportunas. *Microsoft Power BI Desktop* como aplicación de *Business Intelligence*, dispone de utilidades analíticas que permiten realizar previsiones a partir de los promedios de los datos reales disponibles. A modo de ejemplo en la Figura 5.11 se muestra una simulación, donde se han graficado los promedios de la temperatura ambiente (°C) y consumo de energía (kWh) de los años 2016, 2017, 2018 y 2019 para realizar una previsión a 18 semanas con un grado confianza teórico del 95%.

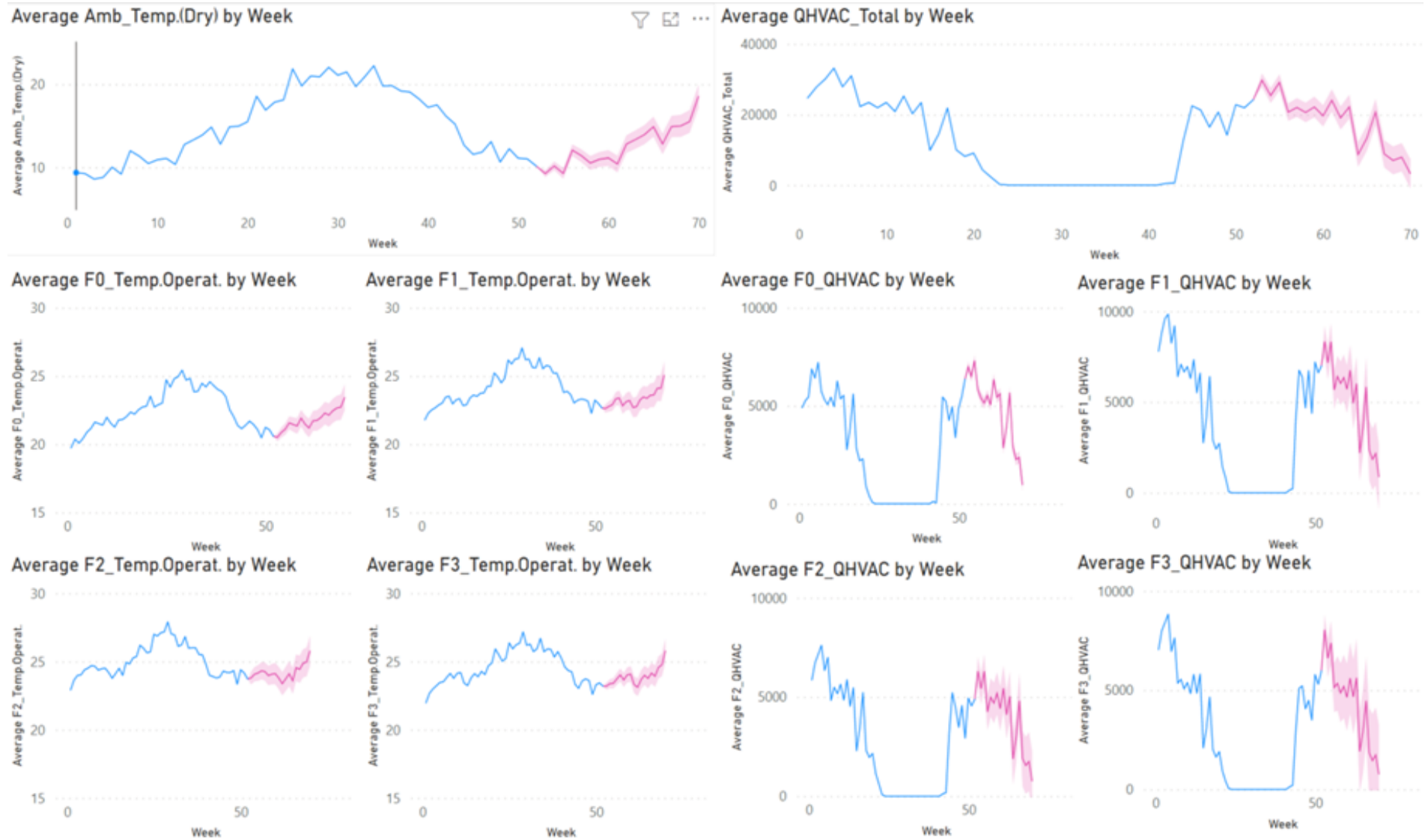


Figura 5.11. Graficas con datos promedios para obtener una previsión a 18 semanas.



El potencial existente en esta filosofía de trabajo es muy elevado por definición. La Industria 4.0 es la tendencia a la automatización y el intercambio de los datos en las tecnologías de fabricación mediante tres elementos principales: el *Internet* de las Cosas o IoT, los sistemas cibernéticos físicos y la *Cloud Computing*. Es un concepto que une las tecnologías que dieron paso a la tercera revolución industrial (procesos de automatización y nuevas tecnologías de producción), con las tecnologías propias de la era de la información (el almacenamiento, procesamiento y transmisión masiva de datos). Estas tecnologías tienen cabida en los actuales sistemas de climatización de los edificios.

Así los sistemas ciberfísicos, podrían recoger las mediciones reales de las condiciones ambientales internas y externas, la ocupación y los consumos energéticos a través de sensores implementados en una WSN. Considerando el concepto del Internet de las cosas, estos sistemas se pueden comunicar con otros sistemas ciberfísicos. Es factible que exista intercambio de datos entre los servicios meteorológicos (que pueden aportar las previsiones atmosféricas), los sistemas de la distribución de energía (con su previsión de capacidad, demanda, coste energético, ...) y los propios usuarios de edificio, dando lugar a un concepto de “tela de araña” absolutamente interconectada entre ella. Con todo ello se podría desarrollar una analítica avanzada, que tendría la capacidad para mejorar y optimizar el consumo de energía aplicado en la climatización de un edificio y por consiguiente reducir sus emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **5.5.- Limitaciones de la investigación.**

El desarrollo de esta investigación ha requerido un enfoque multidisciplinar, teniendo en consideración las distintas áreas que afectan a la eficiencia energética en la climatización de un edificio público de oficinas. Es necesario aplicar un punto de vista holístico, lo cual conlleva que los técnicos que desarrollen estas labores cuenten con una visión global de los sistemas de climatización, así como un conocimiento de las distintas áreas que influyen sobre dichos sistemas. Esta es una limitación, dado que en la actualidad existe una escasez de personas cualificadas

y con conocimientos en todas las áreas requeridas para que puedan desarrollar las labores necesarias. Actualmente existe una tendencia elevada a la especialización en todos los campos, lo cual obviamente tiene sus ventajas, pero en este caso, donde los equipos de trabajo no pueden contar con excesivos miembros es un gran inconveniente. Las personas que pueden desarrollar este tipo de implementaciones, requieren conocimientos de:

- soluciones arquitectónicas,
- el desarrollo de nuevos materiales aislantes,
- posibles mejoras planteables a nivel de ingeniería civil,
- sensorica para la captación de los datos,
- calibración de los equipos de medición,
- el hardware y software aplicado,
- redes de comunicación y *Cloud Computing*,
- gestión de todos los datos recopilados y *Big Data*
- herramientas viabilidad económica,
- aplicaciones ETL y *Business Intelligence*,
- conceptos sobre ANN y MPC,
- y un largo etcétera

Aun disponiendo de un equipo multidisciplinar, son tantas las áreas de conocimiento, que implica un reto para todos sus integrantes y requiere una importante formación para alcanzar el nivel requerido.

Por otro lado, la captación y fiabilidad de los datos requeridos son un factor limitante. La posibilidad de aplicar sistemas WSN que permitan conocer en tiempo real datos de ocupación y condiciones atmosféricas internas del edificio, son una opción muy interesante que dado no requerirían infraestructuras excesivamente complejas para su instalación. Ello lleva consigo el desarrollo de dichos dispositivos así como el desembolso económico para disponer de un sensorica fiable por todo el edificio y posiblemente con un sistema redundante para garantizar que dicha red capte los datos requeridos para alimentar un modelo ANN robusto, que garantice la optimización del sistema de climatización del edificio en cuestión.

También es importante considerar la opinión de los usuarios de dicho edificio, el sistema debería ser flexible para adaptarse a demandas particulares respetando los requerimientos de confort establecidos. En edificios donde sus usuarios son habituales sería interesante conocer su opinión y grado de satisfacción, por ejemplo, a través de *Smiles surveys* o cuestionarios sencillos, que un algoritmo podría tener en consideración para realizar pequeños ajustes en las condiciones ambientales del interior del edificio.

### **5.6.- Próximas investigaciones planteadas.**

Tras esta investigación, se abre un amplio abanico de posibilidades. Pero siguiendo una secuencia lógica, el primer paso es continuar perfeccionando y depurando el modelo ANN desarrollado para el edificio público de oficinas del Rectorado de la Universidad del País Vasco UPV/EHU, ubicado en Leioa (Vizcaya) a fin de mejorar la correlación de las estimaciones con respecto a los datos reales. Especialmente en la salida del consumo de energía, porque como ya se ha explicado presenta un margen de mejora y se considera que pueden ser minimizadas sus desviaciones.

Una vez perfeccionado dicho modelo ANN se plantearía su implementación en otros edificios públicos de oficinas en una primera fase para validarlo definitivamente. A posteriori se podría extender su aplicación a otros tipos de edificio, posiblemente comenzando por infraestructuras del sector terciario: centros comerciales o educativos o sanitarios, hoteles, cines, oficinas de administración o banca, donde los consumos energía son relativamente elevados y es posible establecer patrones de uso con previsiones relativamente fiables.

Una vez alcanzado y extendido los modelos ANN para gestionar la climatización de los distintos edificios del sector terciario, se podría considerar su aplicación en nuevos desarrollos para otro tipo de edificios y llegar hasta los residenciales, pero siendo consciente de la dificultad que entraña, al no disponer de patrones de uso y ocupación fiables. Para alcanzar modelos ANN con suficiente garantía, será necesaria la implementación de la tecnología BAS en su generación más avanzada, disponiendo de WSN y elementos HVAC como las HP que unido a los conceptos



explicados sobre Industria 4.0 y *Business Intelligence*, puedan permitir gestionar los sistemas de climatización del edificio soportados por un modelo ANN, que reciba todos los datos requeridos para su correcto funcionamiento.

Por otro lado, existe otra área de mejora que es interesante seguir profundizando sobre ella. Estaría basada en el propio concepto del *Business Intelligence*, que incorpora modelos *Machine Learning* y *Deep Learning*, en donde los algoritmos aplicados imitan las funciones cognitivas humanas, generando redes neuronales artificiales que pueden convertirse en el motor de un sistema de Inteligencia Artificial. Y a su vez, se disponen de lenguajes de programación como Python y R, con los que se puede realizar un tratamiento y análisis de datos para convertirlos en un input adecuado para un sistema de Inteligencia Artificial que permita la toma de decisiones de forma predictiva y prescriptiva. Esto podría llevar a un desarrollo más estandarizado y de fácil acceso para personas interesadas en optimizar la climatización de los edificios.

## Bibliografía

- [1] European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (Recast), Official Journal of the European Union, Brussels, Belgium (2010).
- [2] European Union, Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of December 16th, 2002 on the Energy Performance of Buildings, Official Journal of the European Union, Brussels, Belgium (2003).
- [3] European Union, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on Energy Efficiency, Official Journal of the European Union, Brussels, Belgium (2012).
- [4] European Union, 2030 Framework (2013/2135(INI)) of the European Parliament and of the Council of 22 January 2014 for Climate and Energy Policies, Official Journal of the European Union, Brussels, Belgium (2014).
- [5] I. Susorova, M. Tabibzadeh, A. Rahman, H.L. Clack, M. Elneimeiri, The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. *Energ Buildings* 57 (2013) 6-13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>
- [6] H.-W. Lin, T. Hong, On variations of space-heating energy use in office buildings. *Appl Energy* 111 (2013) 515-528. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.040>
- [7] N. Aste, P. Caputo, M. Buzzetti, M. Fattore, Energy efficiency in buildings: What drives the investments? The case of Lombardy Region. *Sustain Cities Soc* 20 (2016) 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.09.003>
- [8] M.H. Chung, J.C. Park, Development of PCM cool roof system to control urban heat island considering temperate climatic conditions. *Energ Buildings* 116 (2016) 341-348. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.056>
- [9] F. Oldewurtel, D. Sturzenegger, M. Morari, Importance of occupancy information for building climate control, *Appl Energy* 101 (2012) 521-532. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.014>
- [10] M. Reena, A.T. Mathew, L. Jacob, Energy Efficient Wireless Networked Building Automation System Controlled by Real Occupancy. *TENCON 2015 - IEEE Region 10 Conference, Macau* (2015)
- [11] M. Vaccarini, A. Giretti, L.C. Tolve, M. Casals, Model predictive energy control of ventilation for underground stations. *Energ Buildings* 116 (2016) 326-340. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.020>

- [12] J. Kurnitski, A. Saari, T. Kalamees, M. Vuolle, J. Niemelä, T. Tark, Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation. *Energy Buildings* 43 (2011) 3279–3288. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.033>
- [13] H.J. Kang, Development of a Nearly Zero Emission Building (nZEB) Life Cycle Cost Assessment Tool for Fast Decision Making in the Early Design Phase. *Energies* 59 (2017) 10. <https://doi.org/10.3390/en10010059>
- [14] T. Karlessi, N. Kampelis, D. Kolokotsa, M. Santamouris, L. Standardi, D. Isidori, C. Cristalli, The concept of smart and NZEB buildings and the integrated design approach. *Procedia Eng* 180 (2017) 1316-1325. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.294>
- [15] T.Q. Péan, J. Ortiz, J. Salom, Impact of Demand-Side Management on Thermal Comfort and Energy Costs in a Residential nZEB. *Buildings* 37 (2017) 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7020037>
- [16] S. Guillén-Lambea, B. Rodríguez-Soria, J.M. Marín, Comfort settings and energy demand for residential nZEB in warm climates. *Appl Energy* 202 (2017) 471-486. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.163>
- [17] M. Keltsch, W. Lang, T. Auer, Nearly Zero Energy Standard for Non-Residential Buildings with high Energy Demands—An Empirical Case Study Using the State-Related Properties of BAVARIA. *Buildings* 25 (2017) 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7010025>
- [18] M. Cellura, G. Ciulla, F. Guarino, S. Longo, Redesign of a Rural Building in a Heritage Site in Italy: Towards the Net Zero Energy Target. *Buildings* 68 (2017) 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7030068>
- [19] J. Monteiro, O. Castro, Application of the nZEB methodology in the retrofitting of a typical Portuguese dwelling from the 50's. 11th REHVA World Congress (CLIMA 2013), Prague (2013).
- [20] C. Becchio, E. Fabrizio, V. Monetti, M. Filippi, Cost optimality assessment of a single family house: building and technical systems solutions for the nZEB target. *Energy Buildings* 90 (2015) 173-187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.050>
- [21] R.S. Adhikari, N. Aste, C. Del Pero, M. Manfren, Net Zero Energy Buildings: Expense or Investment?. *Energy Procedia* 14 (2012) 1331-1336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.887>
- [22] K. Loukaidou, A. Michopoulos, T. Zachariadis, Nearly-Zero Energy Buildings: Cost-Optimal Analysis of Building Envelope Characteristics. *Procedia Environ Sci* 38 (2017) 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.069>
- [23] N. Aste, R.S. Adhikari, C. Del Pero, F. Leonforte, Multi-functional Integrated System for Energy Retrofit of Existing Buildings: A Solution Towards nZEB Standards. *Energy Procedia* 105 (2017) 2811-2817. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.608>

- [24] V.M. Barthelmes, C. Becchio, M.C. Bottero, S.P. Corgnati, The Influence of Energy Targets and Economic Concerns in Design Strategies for a Residential Nearly-Zero Energy Building. *Buildings* 4 (2014) 937-962. <https://doi.org/10.3390/buildings4040937>
- [25] G. Murano, I. Ballarini, D. Dirutigliano, E. Primo, V. Corrado, The significant imbalance of nZEB energy need for heating and cooling in Italian climatic zones. *Energ Procedia* 126 (2017) 258-265. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.150>
- [26] C. Cornaro, M. Pierro, V.A. Puggioni, D. Roncarati, Outdoor Characterization of Phase Change Materials and Assessment of Their Energy Saving Potential to Reach NZEB. *Buildings* 55 (2017) 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7030055>
- [27] C. Cornaro, G. Basciano, V.A. Puggioni, M. Pierro, Energy Saving Assessment of Semi-Transparent Photovoltaic Modules Integrated into NZEB. *Buildings* 9 (2017) 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7010009>
- [28] G. Paoletti, R. Pascual Pascuas, R. Perneti, R. Lollini, Nearly Zero Energy Buildings An Overview of the Main Construction Features across Europe. *Buildings* 43 (2017) 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7020043>
- [29] S. Attia, P. Eleftheriou, F. Xenii, R. Morlot, C. Ménézo, V. Kostopoulos, M. Betsi, I. Kalaitzoglou, L. Pagliano, M. Cellura, M. Almeida, M. Ferreira, T. Baracu, V. Badescu, R. Crutescu, J.M. Hidalgo-Betanzos, Overview and future challenges of nearly Zero Energy Buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energ Buildings* 155 (2017) 439-458. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043>
- [30] P. Zangheri, R. Armani, M. Pietrobon, L. Pagliano, Identification of cost-optimal and nZEB refurbishment levels for representative climates and building typologies across Europe. *Energ Effic* (2017). <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9566-8>
- [31] United Nations Environment Programme, Why buildings (2015). Available: <http://staging.unep.org/sbci/AboutSBCI/Background.asp>. Accessed on 20 March 2019
- [32] EU Energy in Figures. Statistical Pocketbook 2014, 2015 and 2016. European Commission (2016). Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-statistical-pocketbook>. Accessed on 20 March 2019.
- [33] U.S. Energy Information Administration, Monthly Energy Review 2017 (2017). Available: <https://www.eia.gov/consumption/commercial/reports.php/>. Accessed on 20 March 2019
- [34] R. Ruparathna, K. Hewage, R. Sadiq, Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings. *Renew Sust Energ Rev* 53 (2015) 1032-1045. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.084>
- [35] V.S.K.V. Harish, A. Kumar, A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renew Sust Energ Rev* 56 (2015) 1272-1292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>

- [36] S. Roberts, Altering existing buildings in the UK. *Energy Policy* 36 (2008) 4482-4486. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.023>
- [37] S.S. Chandel, A. Sharma, B.M. Marwaha, Review of energy efficiency initiatives and regulations for residential buildings in India. *Renew Sust Energy Rev* 54 (2016) 1443-1458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.060>
- [38] J.M. Santos-Herrero, J.M. Lopez-Guede, I. Flores, J.M. Sala, An ongoing review on building energy efficiency improvement systems. IV European Conference on Renewable Energy Systems, Istanbul (2016)
- [39] J. Kneifel, Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy Buildings* 42 (2010) 333-340. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.011>
- [40] L. Magnier, F. Haghghat, Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Build Environ* 45 (2010) 739–746. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.016>
- [41] L. De Boeck, S. Verbeke, A. Audenaert, L. De Mesmaeker, Improving the energy performance of residential buildings: A literature review. *Renew Sust Energy Rev* 52 (2015) 960-975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.037>
- [42] P. Valdiserri, C. Biserni, G. Tosi, M. Garai, Retrofit strategies applied to a tertiary building assisted by Trnsys energy simulation tool. *Energy Procedia* 78 (2015) 765-770. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.091>
- [43] P. Vocale, G. Pagliarini, S. Rainieri, Space Heating Load Estimation Procedure for CHP Systems sizing. 33rd UIT Heat Transfer Conference, L'Aquila (2015) <https://doi.org/10.1088/1742-6596/655/1/012008>
- [44] E. Carrascal, I. Garrido, A.J. Garrido, J.M. Sala, Optimization of the Heating System Use in Aged Public Buildings via Model Predictive Control. *Energies* 9 (2016) 251. <https://doi.org/10.3390/en9040251>
- [45] I. Sarbu, C. Sebarchievici, Performance Evaluation of Radiator and Radiant Floor Heating Systems for an Office Room Connected to a Ground-Coupled Heat Pump. *Energies* 9 (2016) 228. <https://doi.org/10.3390/en9040228>
- [46] I. Sarbu, C. Sebarchievici, *Advances in Geothermal Energy: Using Ground-Source Heat Pump Systems for Heating/Cooling of Buildings*. London: Basel I. Ismail 1-36 (2016). <https://doi.org/10.5772/61372>
- [47] V.S.K.V. Harish, A. Kumar, Reduced order modeling and parameter identification of a building energy system model through an optimization routine. *Appl Energy* 162 (2016) 1010-1023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.137>
- [48] A. Ogando, N. Cid, M. Fernández, Energy Modelling and Automated Calibrations of Ancient Building Simulations: A Case Study of a School in the Northwest of Spain. *Energies* 10 (2017) 807. <https://doi.org/10.3390/en10060807>



- [49] C. Baglivo, P. Congedo, M. Di Cataldo, L. Coluccia, D. D'Agostino, Envelope design optimization by thermal modelling of a building in a warm climate. *Energies* 10 (2017) 1808-1842. <https://doi.org/10.3390/en10111808>
- [50] R. González-Mahecha, A. Lucena, A. Szklo, P. Ferreira, A. Vaz, Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in zero/nearly zero energy buildings. *Energ Buildings* 172 (2018) 505-516. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.027>
- [51] B. Bozkaya, R. Li, W. Zeiler, A dynamic building and aquifer co-simulation method for thermal imbalance investigation. *Appl Therm Eng* 144 (2018) 681-694. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.095>
- [52] M. Palme, A. Salvati, UWG-TRNSYS Simulation Coupling for Urban Building Energy Modelling. 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge 635-641 (2018)
- [53] E. Iturriaga, U. Aldasoro, J. Terés-Zubiaga, A. Campos-Celador, Optimal renovation of buildings towards the nearly Zero Energy Building standard. *Energy* 160 (2018) 1101-1114. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.023>
- [54] S. Yoon, Y. Yu, Strategies for virtual in-situ sensor calibration in building energy systems. *Energ Buildings* 172 (2018) 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.043>
- [55] H. Sha, P. Xu, Z. Yang, Y. Chen, J. Tang, Overview of computational intelligence for building energy system design. *Renew Sust Energ Rev* 108 (2019) 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.018>
- [56] Y. Du; Q. Huang, A. Zhang; Q. Zhang; H. Jing, Prediction, comparison and analysis of comfort level and energy consumption of a passively remodeled dwelling based on BP neural network computation. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 329 (2019). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/329/1/012006>
- [57] R. Escandón, F. Ascione, N. Bianco, G.M. Mauro, R. Suárez, J.J. Sendra, Thermal comfort prediction in a building category: Artificial neural network generation from calibrated models for a social housing stock in southern Europe. *Appl Therm Eng* 150 (2019) 492-505. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.013>
- [58] G. Ciulla, A. D'Amico, Building energy performance forecasting: A multiple linear regression approach. *Appl Energy* 253 (2019) 113500. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113500>
- [59] S.A. Hussain, R.K.K. Yuen, E.W.M. Lee, Energy Modeling with Nonlinear-Autoregressive Exogenous Neural Network. *E3S Web of Conferences* 111 (CLIMA 2019) Bucharest (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103059>
- [60] K.B. Mehboob, Development of energy saving technique for setback time using artificial neural network. *Aus J Mech Eng* (2019) 1-15. <https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1605685>

- [61] Nasruddin, Sholahudin, P. Satrio, T.M.I. Mahlia, N. Giannetti, K. Saito, Optimization of HVAC system energy consumption in a building using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *Sustain Energy Technol Assess* 35 (2019) 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.06.002>
- [62] J. Drgoňa, J. Arroyo, I.C. Figueroa, D. Blum, K. Arendt, D. Kim, E.P. Ollé, J. Oravec, M. Wetter, D.L. Vrabie, L. Helsen, All you need to know about model predictive control for buildings, *Annual Reviews in Control* 50 (2020) 190-232. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.09.001>
- [63] C.E. García, D.M. Prett, M. Morari, Model predictive control: Theory and practice—A survey. *Automatica*, 25 (1989) 335-348. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(89\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(89)90002-2)
- [64] S.H. Cho, M. Zaheer-uddin, Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems. *Energy Convers Manage* 44 (2003) 1333-1342. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00116-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00116-4)
- [65] F. Oldewurtel, A. Parisio, C. Jones, M. Morari, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauch, B. Lehmann, K. Wirth, Energy efficient building climate control using stochastic model predictive control and weather predictions. *American Control Conference* 5100–5105 (2010)
- [66] F. Oldewurtel, A. Parisio, C. Jones, D. Gyalistras, M. Gwerder, V. Stauch, B. Lehmann, M. Morari, Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy Buildings* 45 (2011) 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.022>
- [67] J. Široký, F. Oldewurtel, J. Cigler, S. Prívvara, Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Appl Energy* 88 (2011) 3079-3087. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.009>
- [68] J. Cigler, D. Gyalistras, J. Široký, V-N Tiet, L. Ferkla, Beyond theory: the challenge of implementing Model Predictive Control in buildings. 11th REHVA World Congress (CLIMA 2013), Prague (2013).
- [69] L. Fabietti, Control of HVAC Systems via Explicit and Implicit MPC: an Experimental Case Study. Master's Degree Project of the KTH Electrical Engineering - No. XE-EE-RT 2014:006 (2014).
- [70] L. Xiwang, J. Wen, Review of building energy modeling for control and operation. *Renew Sust Energy Rev* 37 (2014) 517-537. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.056>
- [71] R. De Coninck, F. Magnusson, J. Akesson, L. Helsen, Toolbox for development and validation of grey-box building models for forecasting and control. *J Build Perform Simu* 9 (2015) 3. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1046933>
- [72] R. De Coninck, L. Helsen, Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels. *Energy Buildings* 111 (2016) 290-298. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.014>

- [73] Q. Hu, F. Oldewurtel, M. Balandat, E. Vrettos, D. Zhou, C.J. Tomlin, Building Model Identification during Regular Operation – Empirical Results and Challenges. IEEE American Control Conference, Boston (2016)
- [74] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G.M. Mauro, G.P. Vanoli, Simulation-based model predictive control by the multi-objective optimization of building energy performance and thermal comfort. *Energ Buildings* 111 (2015) 131-144. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.033>
- [75] D. Sturzenegger, D. Gyalistras, M. Morari, R.S. Smith, Model Predictive Climate Control of a Swiss Office Building: Implementation, Results, and Cost-Benefit Analysis. *Contr Syst Technology* 24 (2015) 1. <https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2415411>
- [76] M. Collotta, A. Messineo, G. Nicolosi, G. Pau, A Dynamic Fuzzy Controller to Meet Thermal Comfort by Using Neural Network Forecasted Parameters as the Input. *Energies* 7 (2014) 4727-4756. <https://doi.org/10.3390/en7084727>
- [77] A. Marvuglia, A. Messineo, G. Nicolosi, Coupling a neural network temperature predictor and a fuzzy logic controller to perform thermal comfort regulation in an office building. *Build Environ* 72 (2014) 287-299. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.020>
- [78] O.E. Dragomir, F. Dragomir, V. Stefan, E. Minca, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems as a Strategy for Predicting and Controlling the Energy Produced from Renewable Sources. *Energies* 8 (2015) 13047-13061. <https://doi.org/10.3390/en81112355>
- [79] Y.Y. Ghadi, M.G. Rasul, M.M.K. Khan, Design and development of advanced fuzzy logic controllers in smart buildings for institutional buildings in subtropical Queensland. *Renew Sust Energ Rev* 54 (2016) 738-744. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.105>
- [80] A.W. Hawila, A. Merabtine, N. Troussier, S. Mokraoui, A. Kheiri, A. Laaouatni, Dynamic model validation of the radiant floor heating system based on the object oriented approach. 4th International Renewable and Sustainable Energy Conference, Marrakech (2016)
- [81] H.-L. Tsai, Design and Evaluation of a Photovoltaic / Thermal-Assisted Heat Pump Water Heating System. *Energies* 7 (2014) 3319-3338. <https://doi.org/10.3390/en7053319>
- [82] F. Ruelens, S. Iacovella, B.J. Claessens, R. Belmans, Learning agent for a heat-pump thermostat with a set-back strategy using model-free reinforcement learning. *Energies* 8 (2015) 8300-8318. <https://doi.org/10.3390/en8088300>
- [83] D. D'Agostino, L. Mazzarella. What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions, *Building Eng* 21 (2019) 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019>

- [84] TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin: Madison, WI, USA, 2010; Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys> (accessed on 21 March 2019)
- [85] K. Martin, A. Erkoreka, E. Garcia, J. Teres, L. Del Portillo. Monitorización del Edificio de Rectorado de la UPV/EHU. IX Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica, Cartagena (2015)
- [86] J. Rios, A. Alanis, N. Arana-Daniel, C. Lopez-Franco. Neural Networks Modeling and Control (ed. Sanchez, E.N.) Chapter 2 (Academic Press, 2020) ISBN: 9780128170793.
- [87] A. Alanis, E. Sanchez. Discrete-Time Neural Observers (ed. Sanchez, E.N.) Chapter 5 (Academic Press, 2017) ISBN: 9780128105443.
- [88] M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts (U.S. Department of Energy, Washington DC, USA, 2015); Available: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/mv\\_guide\\_4\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/mv_guide_4_0.pdf) (accessed on 19 February 2022).
- [89] International Performance Measurement and Verification Protocol (Efficiency Valuation Organization, Toronto, Canada, 2012); Available: [http://www.eepformance.org/uploads/8/6/5/0/8650231/ipmvp\\_volume\\_i\\_\\_2012.pdf](http://www.eepformance.org/uploads/8/6/5/0/8650231/ipmvp_volume_i__2012.pdf) (accessed on 19 February 2022).
- [90] Measurement of Energy, Demand and Water Savings, ASHRAE Guideline 14-2014 (American Society of Heating, Ventilating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 2014) Available: [https://upgreengrade.ir/admin\\_panel/assets/images/books/ASHRAE%20Guideline%2014-2014.pdf](https://upgreengrade.ir/admin_panel/assets/images/books/ASHRAE%20Guideline%2014-2014.pdf) (accessed on 7 May 2021).
- [91] C. Fernández, G. Ramos G. Towards a New Generation of Building Envelope Calibration. *Energies*, 10 (2017) 2102. <https://doi.org/10.3390/en10122102>
- [92] G. Ramos, C. Fernández. Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. *Energies*, 10 (2017) 1587. <https://doi.org/10.3390/en10101587>
- [93] K. Martin-Escudero, G. Atxalandabaso, A. Erkoreka, A. Uriarte, M. Porta. Comparison between Energy Simulation and Monitoring Data in an Office Building. *Energies* 15 (2022) 239 <https://doi.org/10.3390/en15010239>



# Anexos

**A.-** Documentación relevante para el desarrollo del modelizado del edificio

**B.-** Proceso ilustrativo de caracterización del edificio objeto con *TRNSYS*

**C.-** Artículo de investigación tesis en publicación científica JCR - Q4: JES

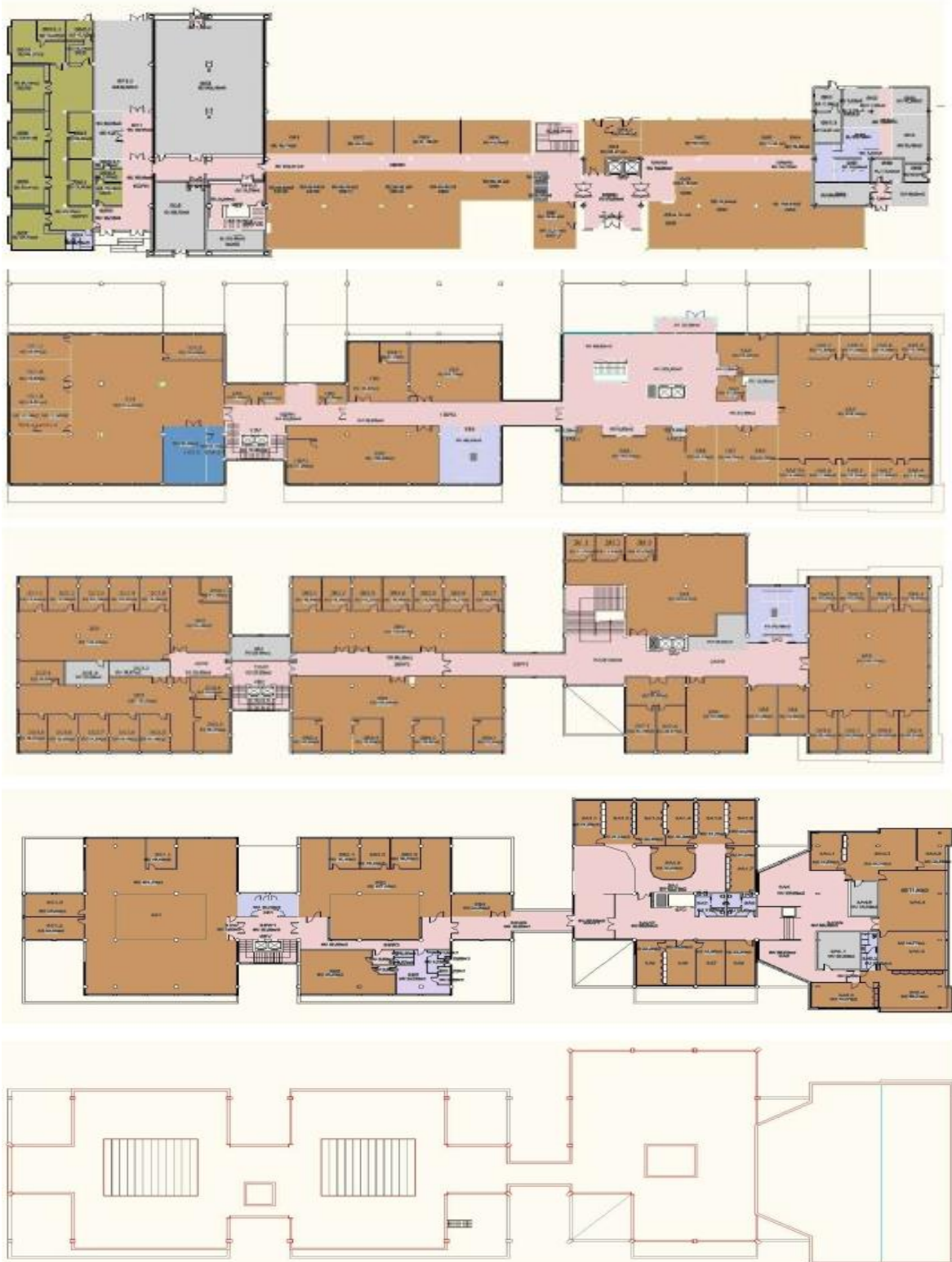
**D.-** Artículo de investigación tesis en publicación científica JCR - Q1: RSER

**E.-** Artículo de investigación tesis en publicación científica JCR - Q1: SREP.

## Anexo A:

### DOCUMENTACION RELEVANTE PARA EL DESARROLLO DEL MODELIZADO:

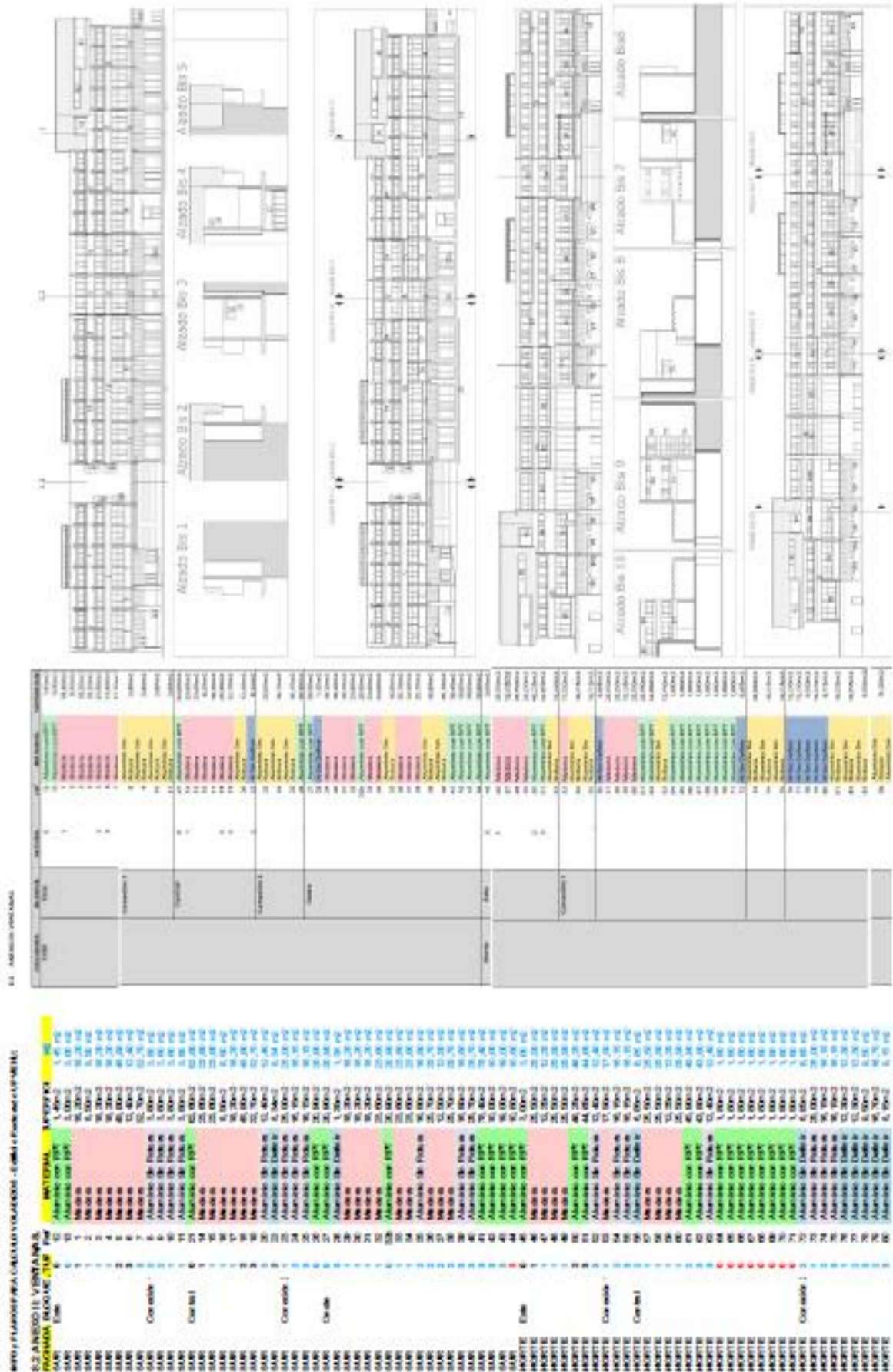
#### PLANOS DE CADA PLANTA - Edificio Rectorado UPV/EHU:



**PLANOS DE ALZADO DE CADA LATERAL - Edificio Rectorado UPV/EHU.**







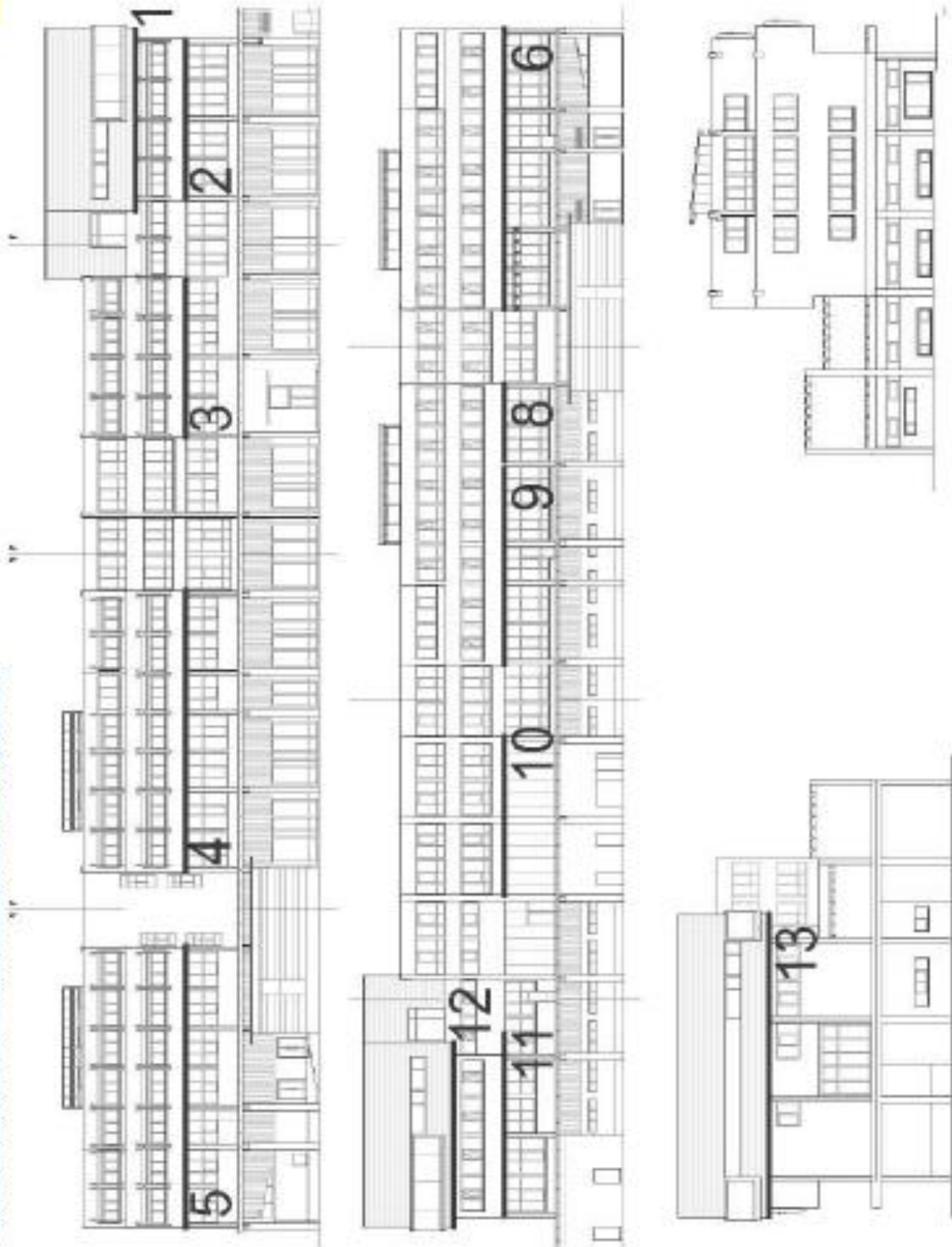


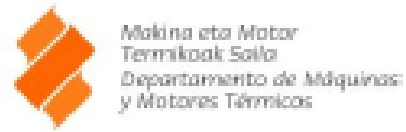
**Datos "ENVOLVENTE PROYECTO"**

Solera	0,252 m.
Ferjado 0-1	0,4046 m.
Ferjado 1-2	0,4046 m.
Ferjado 2-3	0,4046 m.
Techo	0,433 m.
Espesor "vidadibz"	0,25 m.
<b>μ &gt; SOMBRAS</b>	

ALZADOS. VOLADIZOS SUELOS

PLANOS PARA CALCULO VOLADIZOS - Edificio Rectorado UPV/EHU:





# A2PBEER. UPV/EHU

---

## MEASUREMENTS AND WORKS PROPOSAL

JULY 2014



# 1. ANNEX

Tables of surface areas and building elevation plans

## NOMENCLATURE

As mentioned in the first part of this report, the complex is made up of three buildings. Each dwelling has been named according to the following picture.



Moreover, it is a four-storey building, Façade can be divided in two different parts: below the "platform" (Ground Floor) and above the platform (P1-P3)



Table 7. FAÇADE AREAS (WINDOWS + OPAQUE WALLS).

FAÇADE	BLOCK	PLAN	REF. Nº	FRAME	AREA [m <sup>2</sup> ]
SOUTH	WEST	WP1	12	Aluminium with TB	1.45
		WP1	13	Aluminium with TB	3.00
		WP1	1	Wood	18.20
		WP1	2	Wood	8.50
		WP1	3	Wood	18.20
		WP1	4	Wood	18.20
		WP1	5	Wood	45.90
		WP1	6	Wood	12.40
		WP1	7	Wood	32.70
	CONNECTON1	WP1	8	Aluminium without TB	3.80
		WP1	9	Aluminium without TB	3.80
		WP1	10	Aluminium without TB	3.80
		WP1	11	Aluminium without TB	3.80
	CENTRAL	WP1	21	Aluminium with TB	62.60
		WP1	14	Wood	23.60
		WP1	15	Wood	23.60
		WP1	16	Wood	8.50
		WP1	17	Wood	18.20
		WP1	18	Wood	45.90
		WP1	19	Wood	32.70
		WP1	20	Aluminium without TB	12.40
		WP1	22	Aluminium without TB (HOLD)	8.34
	CONNECTON2	WP1	23	Aluminium without TB	25.00
		WP1	24	Aluminium without TB	16.15
		WP1	25	Aluminium without TB	16.15
		WP1	26	Aluminium with TB	20.90
	EAST	WP1	27	Aluminium with TB	20.90
		WP1	28	Aluminium without TB (HOLD)	1.35
		WP1	29	Wood	18.20
		WP1	30	Wood	18.20
		WP1	31	Wood	18.20
		WP1	32	Wood	23.60
		WP1	32b	Aluminium with TB	20.90
		WP1	33	Wood	23.60
		WP1	34	Wood	23.60
		WP1	35	Aluminium without TB	16.80
		WP1	36	Wood	25.70
		WP1	37	Wood	12.50
		WP1	38	Wood	25.70
		WP1	39	Aluminium without TB	16.80
WP1		40	Aluminium without TB	25.70	



		WP1	41	Aluminium with TB	78.40	
		WP1	42	Aluminium with TB	10.00	
		WP1	43	Aluminium with TB	19.00	
		WP1	44	Aluminium with TB	10.80	
NORTH	WEST	WP2	45	Aluminium with TB	3.00	
		WP2	46	Wood	25.50	
		WP2	47	Wood	12.35	
		WP2	48	Wood	25.50	
		WP2	49	Wood	25.50	
		WP2	50	Aluminium with TB	46.25	
		WP2	51	Aluminium with TB	44.65	
		WP2	52	Aluminium without TB	12.40	
		CONNECTON1	WP2	53	Wood	17.50
	WP2		54	Aluminium without TB	16.15	
	WP2		55	Aluminium without TB	16.15	
		CENTRAL	WP2	56	Aluminium without TB (HOLD)	6.85
	WP2		57	Wood	25.50	
	WP2		58	Wood	25.50	
	WP2		59	Wood	12.35	
	WP2		60	Wood	25.50	
	WP2		61	Aluminium with TB	45.90	
	WP2		62	Aluminium with TB	43.80	
	WP2		63	Aluminium without TB	12.40	
	WP2		64	Aluminium with TB	1.80	
	WP2		65	Aluminium with TB	1.80	
	WP2		66	Aluminium with TB	1.80	
	WP2		67	Aluminium with TB	1.80	
	WP2		68	Aluminium with TB	1.80	
	WP2		69	Aluminium with TB	1.80	
	WP2		70	Aluminium with TB	1.80	
	WP2		71	Aluminium with TB	1.80	
	WP2	72	Aluminium without TB (HOLD)	6.85		
		CONNECTON2	WP2	73	Aluminium without TB	25.00
	WP2		74	Aluminium without TB	16.15	
	WP2		75	Aluminium without TB	16.15	
		EAST	WP2	76	Aluminium without TB (HOLD)	12.30
WP2	77		Aluminium without TB (HOLD)	12.30		
WP2	78		Aluminium without TB (HOLD)	9.50		
WP2	79		Aluminium without TB (HOLD)	16.70		
WP2	80		Aluminium without TB (HOLD)	8.15		
WP2	81		Aluminium without TB	16.55		
WP2	82		Aluminium without TB	16.55		
WP2	83		Aluminium without TB	9.50		





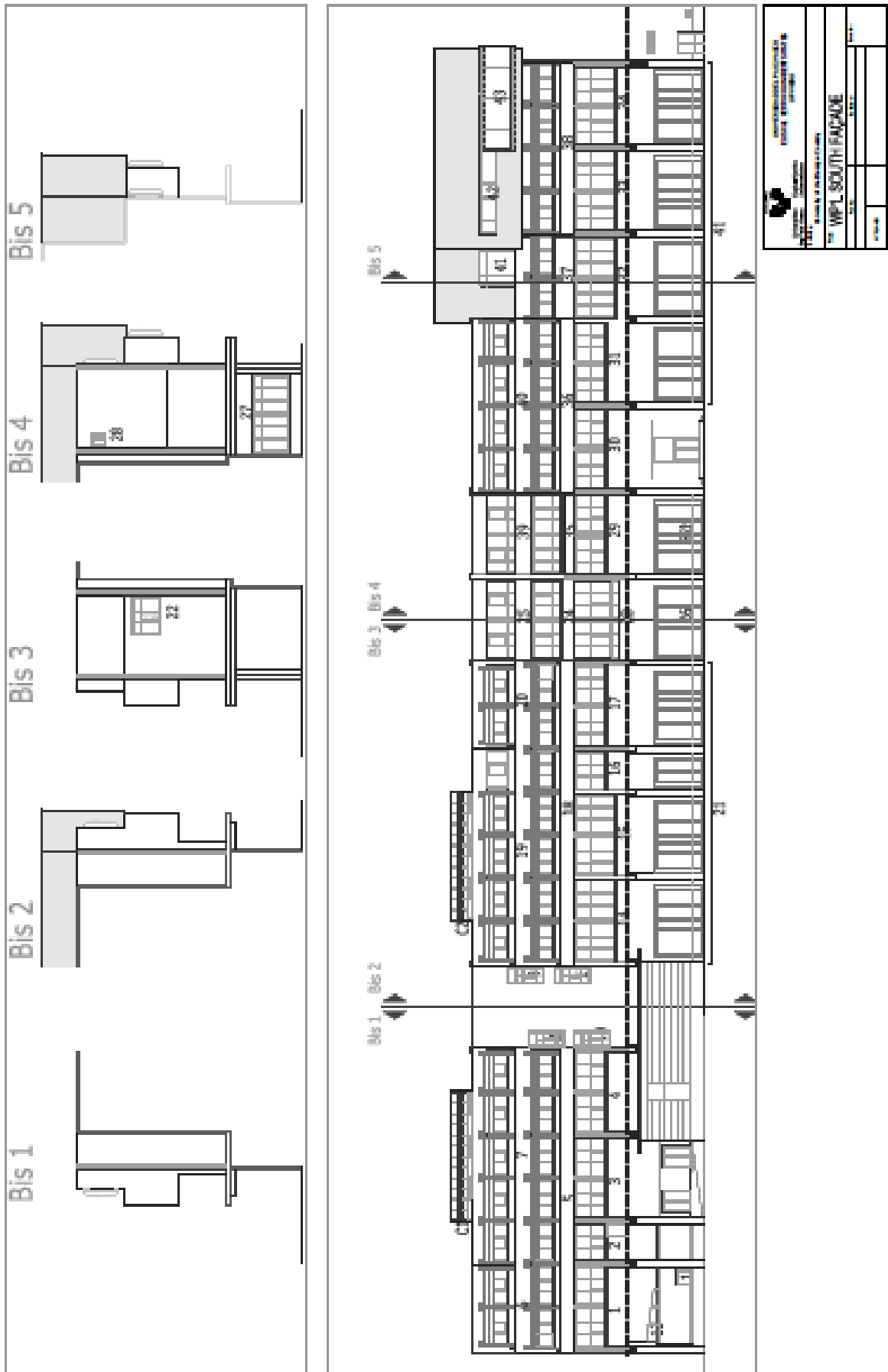
		WP2	84	Aluminium without TB	9.50
		WP2	85	Aluminium without TB	25.60
		WP2	86	Aluminium without TB	52.80
		WP2	87	Aluminium without TB (HOLD)	16.50
		WP2	88	Aluminium without TB (HOLD)	16.50
		WP2	89	Aluminium without TB (HOLD)	7.20
		WP2	90	Aluminium with TB	10.80
		WP2	91	Aluminium with TB	10.00
		WP2	92	Aluminium with TB	19.00
		WP2	93	Wood	19.70
		WP2	94	Wood	18.25
		WP2	95	Wood	23.40
		WP2	96	Aluminium with TB	1.80
		WP2	97	Aluminium with TB	1.80
		WP2	98	Aluminium with TB	1.80
		WP2	99	Aluminium with TB	1.80
		WP2	100	Aluminium with TB	1.80
		WP2	101	Aluminium with TB	1.80
WEST		WP3	102	Aluminium with TB	9.00
		WP3	103	Aluminium with TB	4.10
		WP3	104	Aluminium with TB	4.10
		WP3	105	Aluminium with TB	4.10
		WP3	106	Aluminium with TB	4.10
		WP3	107	Aluminium with TB	34.50
		WP3	112	Aluminium without TB	4.60
		WP3	113	Aluminium without TB	13.75
		WP3	114	Aluminium without TB	4.60
		WP3	115	Aluminium without TB	6.80
		WP3	116	Aluminium without TB	13.75
		WP3	117	Aluminium without TB	6.80
EAST		WP3	118	Aluminium without TB	6.00
		WP3	119	Aluminium without TB	16.30
		WP3	120	Aluminium without TB	6.00
		WP3	121	Aluminium with TB	2.80
		WP3	122	Aluminium with TB	5.50
		WP3	123	Aluminium without TB	29.70
		WP3	124	Aluminium without TB	12.00
		WP3	125	Aluminium without TB	6.00
		WP3	126	Aluminium without TB	4.10
		WP3	127	Aluminium with TB	30.20
		WP3	128	Aluminium with TB	8.20
		WP3	129	Aluminium with TB	8.20

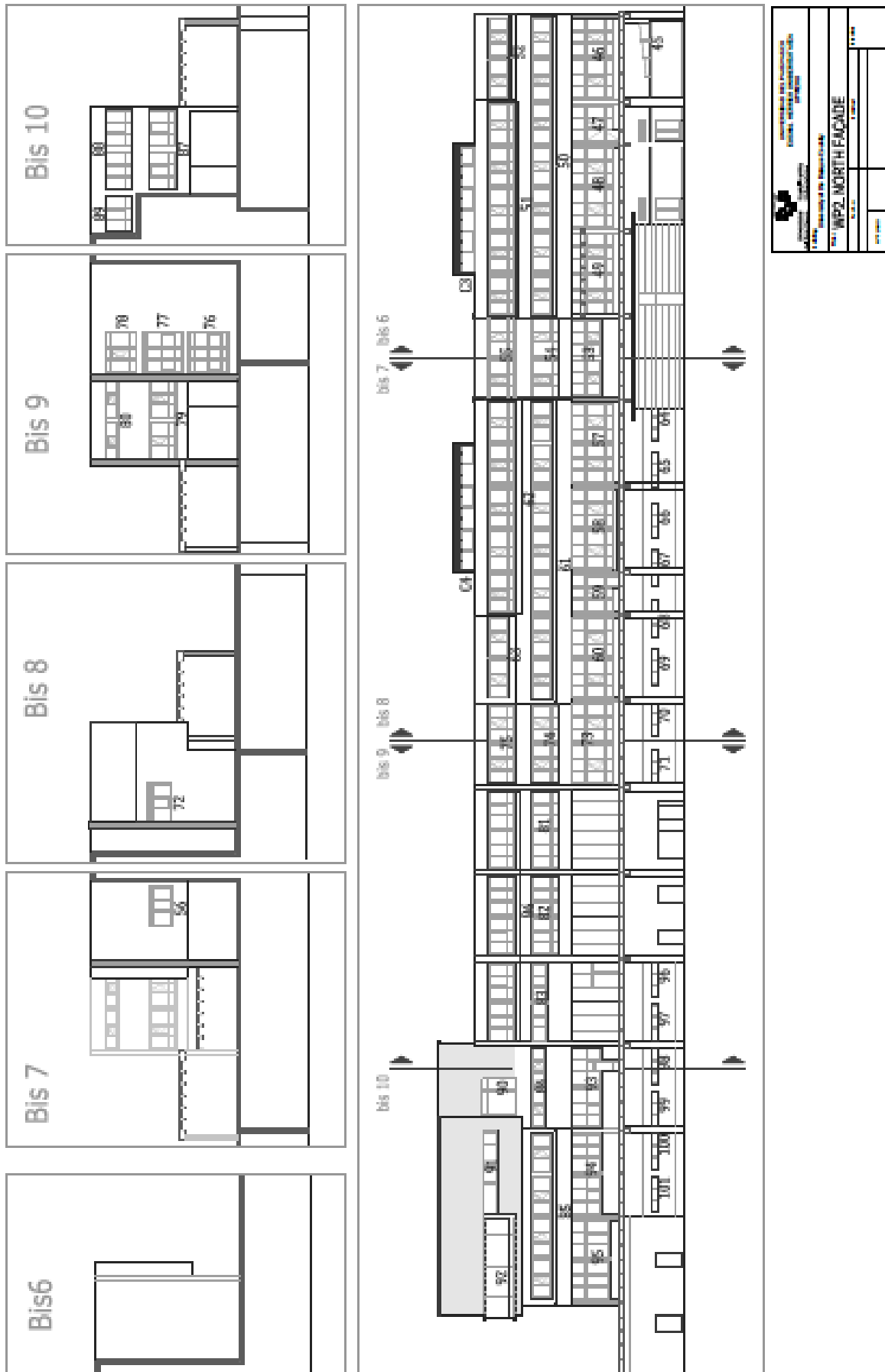
	REF.	FRAME	AREA [m <sup>2</sup> ]
ROOF	c1	Aluminium with TB	4.36
	c2	Aluminium with TB	4.36
	c3	Aluminium with TB	13.00
	c4	Aluminium with TB	13.00

Table 8. windows of skylights

FAÇADE	BUILDING PART	TOTAL AREA [m <sup>2</sup> ]	WINDOWS AREA [m <sup>2</sup> ]	OPAQUE AREA [m <sup>2</sup> ]	
SOUTH	P1-P3	WEST	334.10	154.10	180.00
		CONEX1	88.00	15.20	72.80
		CENTRAL	334.10	164.90	169.20
		CONEX2	88.00	57.30	30.70
		EAST	475.00	248.60	226.40
		RECTOR'S AREA	176.00	39.80	136.20
		BIS1 (SEE WP1)	63.70	0	63.70
		BIS2 (SEE WP1)	63.70	0	63.70
		BIS3 (SEE WP1)	127.00	8.34	118.66
		BIS4 (SEE WP1)	125.00	1.35	123.65
		BIS5 (SEE WP1)	11.00	0	11.00
	GROUND-FLOOR	870.00	208.15	661.85	
NORTH		WEST	334.10	192.15	141.95
		CONEX1	85.15	49.80	35.35
		CENTRAL	334.10	190.95	143.15
		CONEX2	87.80	57.30	30.50
		EAST	387.00	191.85	195.15
		RECTOR'S AREA	176.00	39.80	136.20
		BIS6 (SEE WP2)	101.20	0	101.20
		BIS7 (SEE WP2)	101.20	6.85	94.35
		BIS8 (SEE WP2)	132.00	6.85	125.15
		BIS9 (SEE WP2)	190.50	58.95	131.55
		BIS10 (SEE WP2)	77.25	40.20	37.05
	GROUND-FLOOR	726.90	28.20	698.70	
EAST		1 <sup>st</sup> & 2 <sup>nd</sup> FLOOR	204.00	51.80	152.20
		RECTOR'S AREA	208.00	46.60	161.40
		GROUND-FLOOR	150.00	8.30	141.70
WEST		NURSERY	315.60	78.60	237.00
		RECTOR'S AREA	88.00	0	88.00
		GROUND-FLOOR	171.20	59.90	111.30
	P1-P3	4707.50	1722.19	2985.31	
	TOTAL	6625.60	2005.84	4619.76	

 Table 9. Opaque and window surfaces. Areas [m<sup>2</sup>]



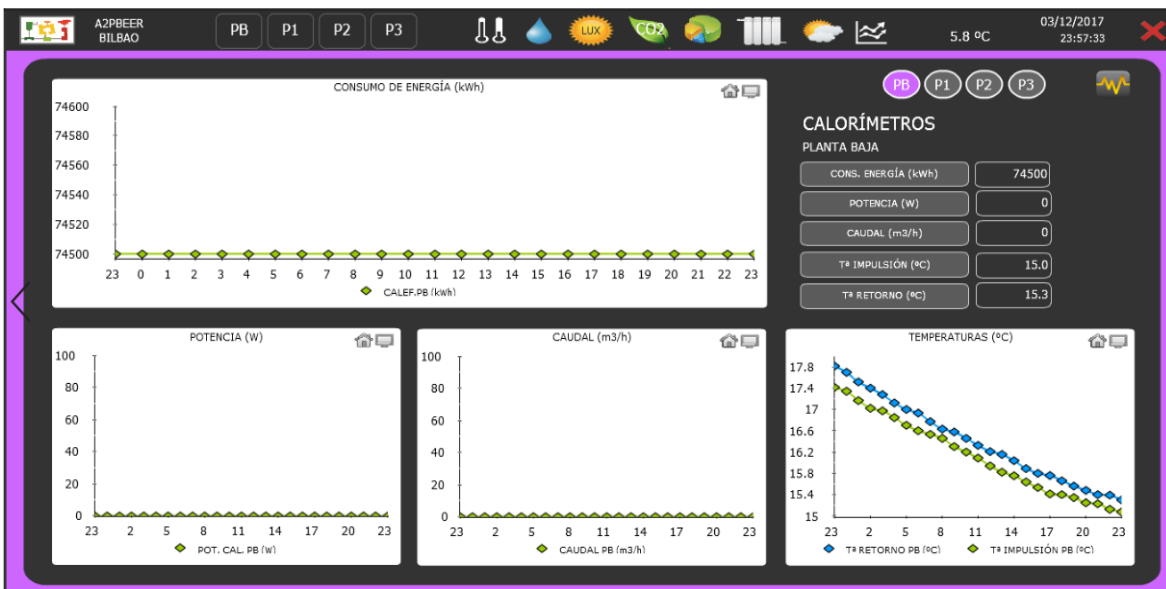




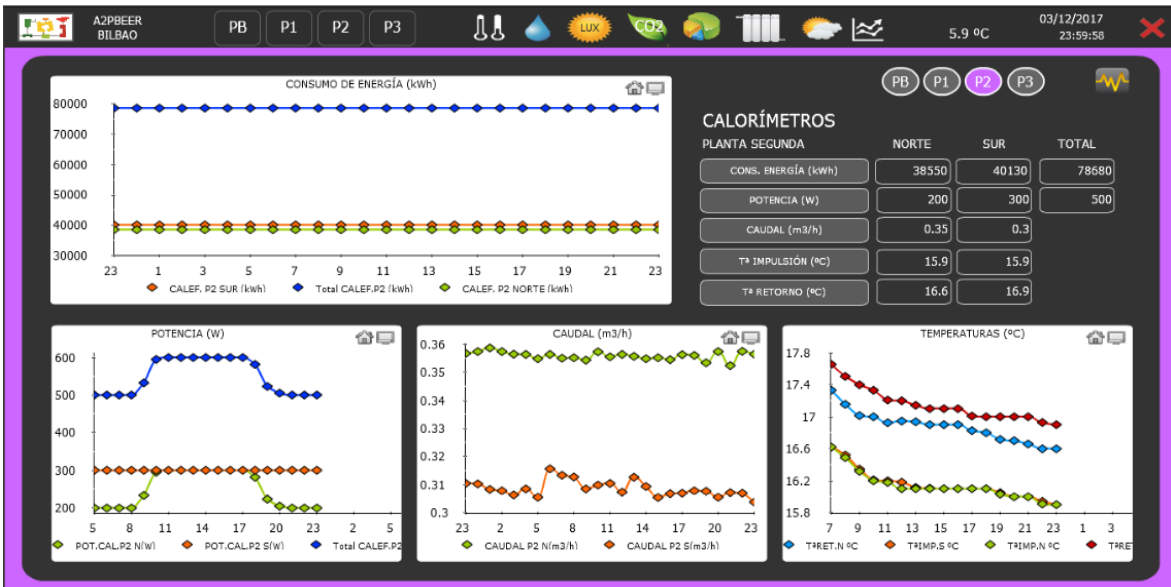




**EJEMPLOS DE CAPTURAS DE PANTALLA DE LA APLICACIÓN DE MONITORIZACION DEL EDIFICIO OBJETO DE ESTUDIO:**







**ACCESO WEB EUSKALMET:**

- **CON UBICACIÓN GEOGRAFICA DE ESTACIONES METEREOLÓGICAS:**

The screenshot shows the Euskalmet website interface. On the left, there is a navigation menu with sections for 'GENERAL' (including prediction, aerobiology, maps, etc.) and 'PROFESIONAL' (including station data, surveillance, etc.). A sidebar on the left also features social media links for Twitter and YouTube, and a 'Tweets por @Euskalmet' section. The main content area displays a map of the Galindo station location in Sestao, with a pop-up box showing coordinates: 'Nombre: Galindo, Municipio: SESTAO, Longitud: -2.99878, Latitud: 43.3062, Altitud: 5 m.'. Below the map, there is a date selector set to '30/03/2019' and a dropdown menu for 'Galindo'. A graph titled 'Meteorología ( C038-Galindo )' shows data for the period '30/03/2019 00:00 UTC - 30/03/2019 23:50 UTC'. The graph plots 'Irradiación' (irradiation) and 'Temperatura' (temperature) over time. The temperature line fluctuates between approximately 10°C and 25°C, while the irradiation line shows a clear diurnal cycle, peaking around 20°C during the day and dropping to near 0°C at night.

- **ACCESO A DATOS METEREOLÓGICOS:**

The screenshot shows the 'Datos estaciones' (Station Data) page for 'C038 - Galindo'. The page header includes the Euskalmet logo and navigation options. The main content area is divided into several sections:

- Imagen NO disponible:** A placeholder for a station image.
- Datos generales:** A table with the following information:
 

Nombre Técnico:	Galindo
Indicativo:	00038
Estación Ficticia:	No
Tipo:	
Observaciones:	
Función Desde:	13/11/2013
Función Hasta:	
Propietario:	D.F.B.
- Ubicación:** A table with the following information:
 

Provincia:	BI2K/KA1A
Municipio:	SESTAO
Altitud (m):	5
Longitud:	-2.99878
Latitud:	43.3062
Longitud UTM:	500099
Latitud UTM:	4794599
- Cuencas:** A section stating 'No existen cuencas disponibles'.
- Meteoros y sensores:** A table listing various meteorological parameters and their corresponding sensors:
 

Cod. Met.	Descripción del Metro	Alt. (m)	Código de sensor y tipo
11	Velocidad media del viento	13,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
11	Velocidad media del viento	16,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
12	Dirección media del viento	13,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
12	Dirección media del viento	16,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
17	Sigma de la dirección del viento	13,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
17	Sigma de la dirección del viento	16,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
14	Velocidad máxima del viento	13,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
14	Velocidad máxima del viento	16,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
16	Sigma de la velocidad del viento	13,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
16	Sigma de la velocidad del viento	16,7	YOW1 -Sensor de velocidad y dirección de viento de Young
21	Temperatura del aire	1,2	ROW1 -Sensor de temperatura aire STA212
21	Temperatura del aire	1,2	ROED -Sensor de temperatura y humedad de Rotronic
21	Temperatura del aire	1,2	ROGD -Sensor de temperatura y humedad de Rotronic
21	Temperatura del aire	1,2	ROAC -Sensor de temperatura y humedad de Rotronic
21	Temperatura del aire	1,2	ROSO -Sensor de temperatura y humedad de Rotronic
31	Humedad relativa del aire	1,2	ROAC -Sensor de temperatura y humedad de Rotronic
31	Humedad relativa del aire	1,2	ROED -Sensor de temperatura y humedad de Rotronic
31	Humedad relativa del aire	1,2	ROGD -Sensor de temperatura y humedad de Rotronic
31	Humedad relativa del aire	1,2	ROW1 -Sensor de temperatura aire STA212
31	Humedad relativa del aire	1,2	ROSO -Sensor de temperatura y humedad de Rotronic

DISPONIBILIDAD DE BAJAR DATOS METEREOLÓGICOS:



# Anexo B:

## CAPTURAS DE PANTALLA, A MODO ILUSTRATIVO, DEL PROCESO DE CARACTERIZACIÓN REALIZADO PARA EL MODELIZADO DEL EDIFICIO OBJETO, A TRAVES DE LA HERRAMIENTA: TRNSYS.

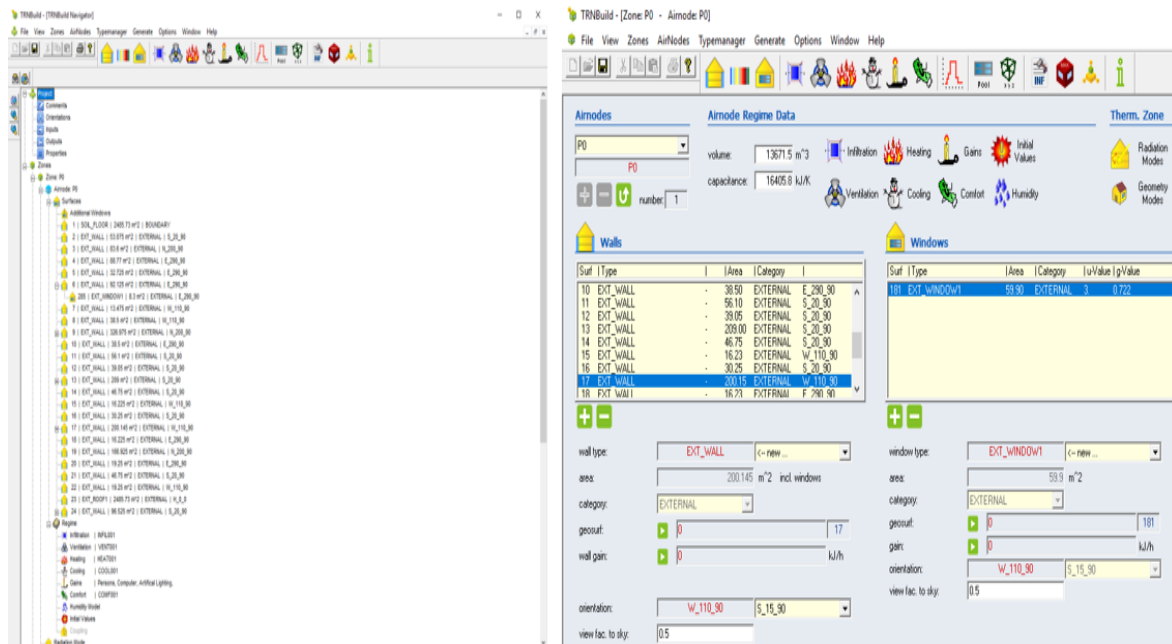


Figura B.1. Caracterización de la envolvente del edificio en TRNBuild 2.0.

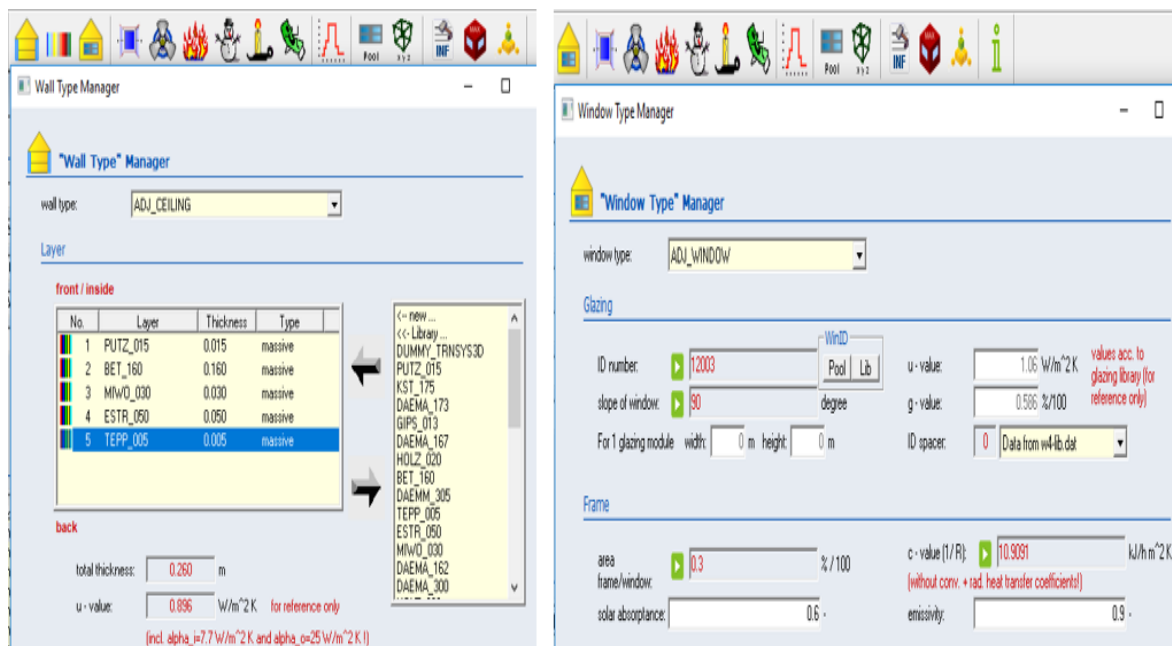


Figura B.2. Caracterización de techo y superficies acristaladas en TRNBuild 2.0.

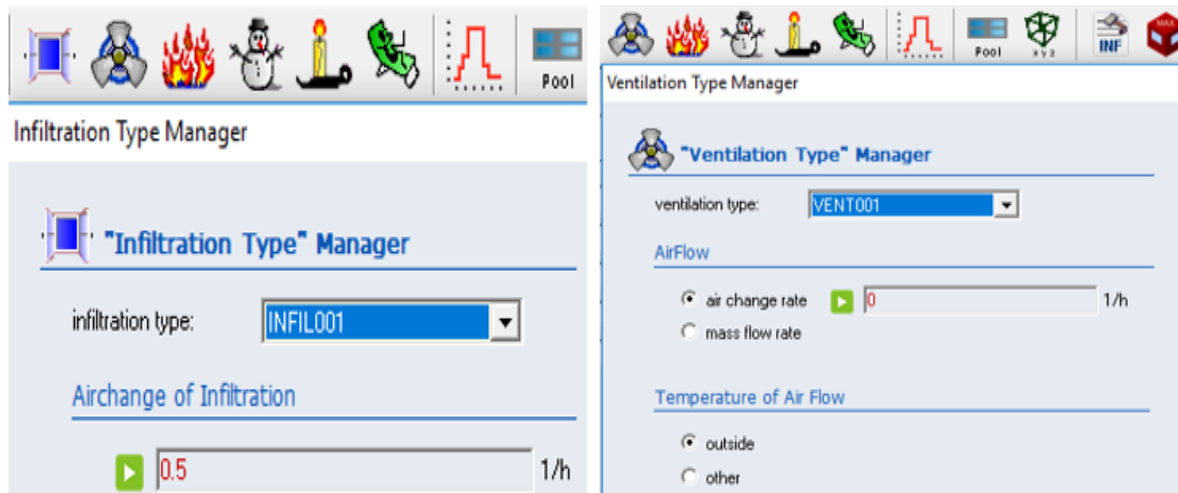


Figura B.3. Caracterización de Infiltración y Ventilación en *TRNBuild 2.0*.

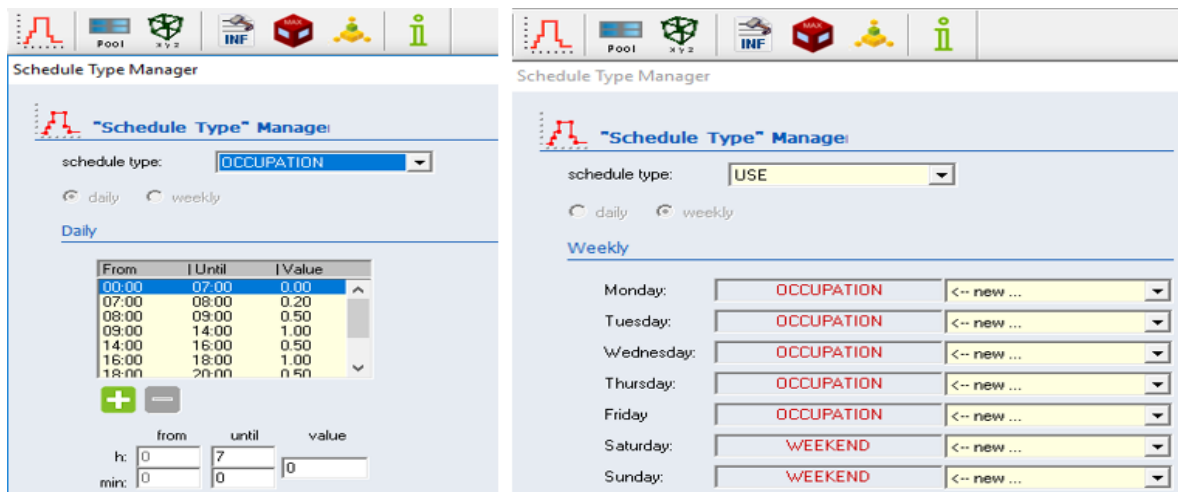


Figura B.4. Caracterización de la Ocupación y Uso del edificio en *TRNBuild 2.0*.

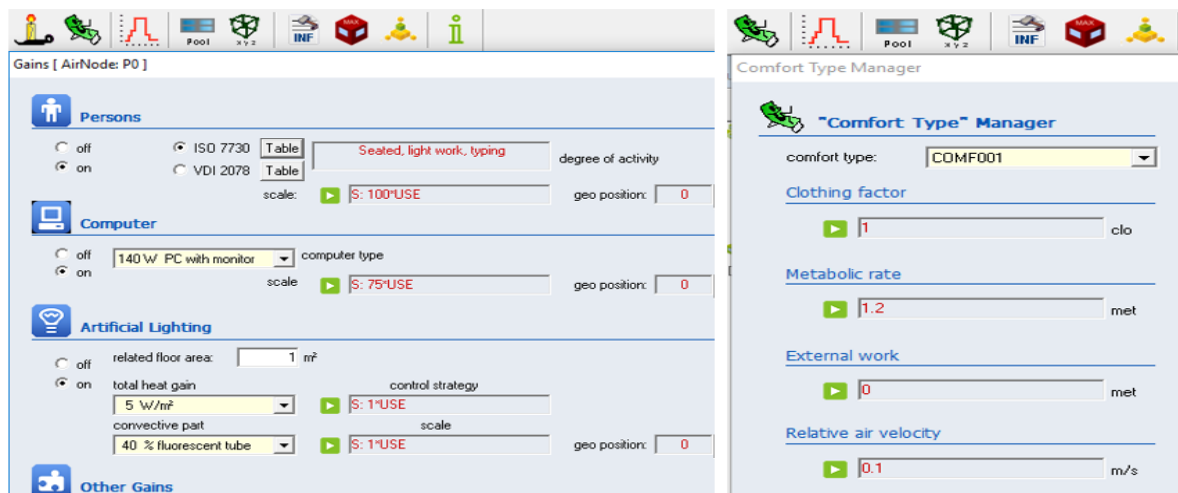


Figura B.5. Caracterización de ganancias y requerimientos confort en *TRNBuild 2.0*.

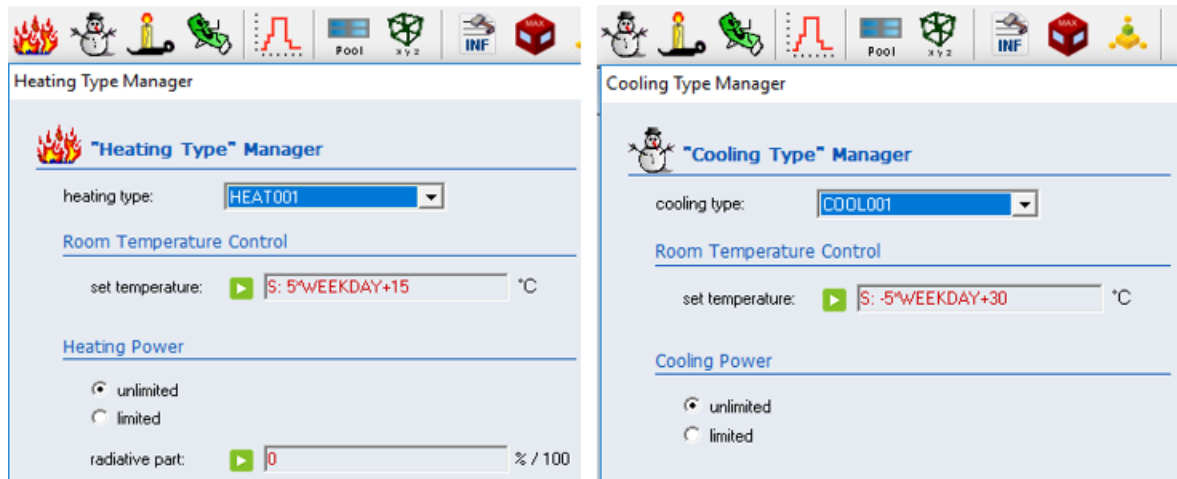


Figura B.6. Caracterización de la calefacción y refrigeración en *TRNBuild 2.0*.

```

B94_UPV.inf: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
-----
* I n p u t s
-----
INPUTS TGROUND TBOUNDARY BRIGHT SHADE_CLOSE SHADE_OPEN MAX_ISHADE MAX_ESHADE
-----
* S c h e d u l e s
-----
SCHEDULE WEEKEND
HOURS =0.000 1.000 24.0
VALUES=0 0 0
SCHEDULE OCCUPATION
HOURS =0.000 7.000 8.000 9.000 13.000 15.000 17.000 19.000 20.000 21.000 24.0
VALUES=0 0.2 0.5 1. 0.5 1. 0.5 0.2 0.1 0 0
SCHEDULE HEATING
HOURS =0.000 5.000 19.000 24.0
VALUES=0 1. 0 0
SCHEDULE USE
DAYS=1 2 3 4 5 6 7
HOURLY=OCCUPATION OCCUPATION OCCUPATION OCCUPATION OCCUPATION WEEKEND WEEKEND
SCHEDULE WEEKDAY
DAYS=1 2 3 4 5 6 7
HOURLY=HEATING HEATING HEATING HEATING HEATING WEEKEND WEEKEND
-----
* W a l l s
-----
WALL_EXT_WALL
LAYERS = _ACRÍLICOS(PINTURA?) _GUARNECIDO _PLACA_YESO _POLIESTIRENO _CAMARA_AIRE LANA_MINERAL _BLOQUE_HORMIGON
THICKNESS= 0.001 0.015 0.015 0.03 0 0.53 0.12
ABS-FRONT= 0.4 : ABS-BACK= 0.5
EPS-FRONT= 0.9 : EPS-BACK= 0.9
HFRONT = 11 : HBACK= 64
WALL_EXT_ROOF
LAYERS = _LOSA_ALVEOLAR _ARCILLA_EXPANDIDA LANA_MINERAL _ASFALTO _POLIESTER _MORTERO_CEMENTO _BALDOSAS
THICKNESS= 0.25 0.01 0.412 0.004 0.001 0.04 0.01
ABS-FRONT= 0.1 : ABS-BACK= 0.5
EPS-FRONT= 0.9 : EPS-BACK= 0.9
HFRONT = 11 : HBACK= 64

```

Figura B.7. Captura de pantalla del fichero ASCII generado tras el modelizado.

## Anexo C:

### Artículo de investigación de la tesis en publicación científica JCR: JES

Publicación: *Journal of Energy Systems*

Editorial: **DERGIPARK**

Categoría: JCR - Q4



**JOURNAL OF ENERGY SYSTEMS**  
Volume 1, Issue 3

DOI: 10.30521/jes.346653



### A Short review on the use of renewable energies and model predictive control in buildings

Jose Maria Santos-Herrero

University of the Basque Country (UPV/EHU) / ENEDI Research Group, Thermal Engineering Department,  
Faculty of Engineering of Bilbao, Alda. Urkijo s/n, 48013 Bilbao, Spain, jmsantos005@ikasle.ehu.es,  
orcid.org/0000-0002-2991-0126

Jose Manuel Lopez-Guede

University of the Basque Country (UPV/EHU), Systems and Automatic Control Department, University  
Faculty of Engineering of Vitoria, C/ Nieves Cano 12, 01006 Vitoria-Gasteiz, Spain, jm.lopez@ehu.es,  
orcid.org/0000-0002-5310-1601, tel. +0034 945 01 40 84

Ivan Flores

University of the Basque Country (UPV/EHU) / ENEDI Research Group, Thermal Engineering Department,  
Faculty of Engineering of Bilbao, Alda. Urkijo s/n, 48013 Bilbao, Spain, ivan.flores@ehu.eus,  
orcid.org/0000-0003-3379-8218

Arrived: 26.10.2017 Accepted: 09.12.2017 Published: 11.12.2017

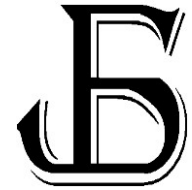
**Abstract:** This short review is based on an overview of the most recent works of the literature related to climatization in buildings. A total number of 40 relevant papers that have been published in the last years in prestigious international journals have been reviewed with the aim of showing the current state of the art in this field. It is very important as the new European regulations that will be applied in the next years in the construction of buildings, aiming to achieve nearly-Zero Energy Buildings (nZEBs), will require a multidisciplinary work in the different areas that affect the design of buildings. For this reason, it is relevant the envelope, the user behavior, the Heating, Ventilation and Air Conditioning applied (HVAC) and the influence of the meteorological conditions, among others. But apart from this, it would be very interesting any other alternative which helped to reach these targets. This article proposes the possibility of using Model Predictive Control (MPC) besides to Renewable Energies in order to optimize the energy management of air-conditioning in public and office buildings through a radiant floor by solar system and high-performance heat pump systems for their heating / cooling. In this paper, a short review is initially exposed where the different "Input data and information" are analyzed, to end up proposing an Operative for a Predictive Control using these Renewable Energies.

**Keywords:** *Building energy systems, Energy-efficient buildings, Model predictive control,*

*Cite this paper: Santos-Herrero, J.M., Lopez-Guede, J.M., Flores, I., A Short review on the use of renewable energies and model predictive control in buildings, Journal of Energy Systems 2017; 1(3): 112-120 DOI: 10.30521/jes.346653*

© 2017 Published by JES peer-review scientific journal at DergiPark ([www.dergipark.gov.tr/jes](http://www.dergipark.gov.tr/jes))

Nomenclature	
nZEBs	nearly-Zero Energy Buildings
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
MPC	Model Predictive Control
GHG	Greenhouse Gas emissions
WSN	Wireless Sensor Network
BAS	Building Automation System
GIS	Geographic Information Systems
WWR	Wall-Window Ratio
PCM	Phase Change Materials



## A Short review on the use of renewable energies and model predictive control in buildings

Jose Maria Santos-Herrero

University of the Basque Country (UPV/EHU) / ENEDI Research Group, Thermal Engineering Department, Faculty of Engineering of Bilbao, Alda. Urkijo s/n, 48013 Bilbao, Spain, jmsantos005@ikasle.ehu.es, orcid.org/0000-0002-2991-0126

Jose Manuel Lopez-Guede

University of the Basque Country (UPV/EHU), Systems and Automatic Control Department, University Faculty of Engineering of Vitoria, C/ Nieves Cano 12, 01006 Vitoria-Gasteiz, Spain, jm.lopez@ehu.es, orcid.org/0000-0002-5310-1601, tel. +0034 945 01 40 84

Ivan Flores

University of the Basque Country (UPV/EHU) / ENEDI Research Group, Thermal Engineering Department, Faculty of Engineering of Bilbao, Alda. Urkijo s/n, 48013 Bilbao, Spain, ivan.flores@ehu.eus, orcid.org/0000-0003-3379-8218

Arrived: 26.10.2017 Accepted: 09.12.2017 Published: 11.12.2017

**Abstract:** This short review is based on an overview of the most recent works of the literature related to climatization in buildings. A total number of 40 relevant papers that have been published in the last years in prestigious international journals have been reviewed with the aim of showing the current state of the art in this field. It is very important as the new European regulations that will be applied in the next years in the construction of buildings, aiming to achieve nearly-Zero Energy Buildings (nZEBs), will require a multidisciplinary work in the different areas that affect the design of buildings. For this reason, it is relevant the envelope, the user behavior, the Heating, Ventilation and Air Conditioning applied (HVAC) and the influence of the meteorological conditions, among others. But apart from this, it would be very interesting any other alternative which helped to reach these targets. This article proposes the possibility of using Model Predictive Control (MPC) besides to Renewable Energies in order to optimize the energy management of air-conditioning in public and office buildings through a radiant floor by solar system and high-performance heat pump systems for their heating / cooling. In this paper, a short review is initially exposed where the different "Input data and information" are analyzed, to end up proposing an Operative for a Predictive Control using these Renewable Energies.

**Keywords:** *Building energy systems, Energy-efficient buildings, Model predictive control,*

*Cite this paper: Santos-Herrero, J.M., Lopez-Guede, J.M., Flores, I., A Short review on the use of renewable energies and model predictive control in buildings, Journal of Energy Systems 2017; 1(3): 112-120 DOI: 10.30521/jes.346653*

© 2017 Published by JES peer-review scientific journal at DergiPark (www.dergipark.gov.tr/jes)

Nomenclature	
nZEBs	nearly-Zero Energy Buildings
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
MPC	Model Predictive Control
GHG	Greenhouse Gas emissions
WSN	Wireless Sensor Network
BAS	Building Automation System
GIS	Geographic Information Systems
WWR	Wall-Window Ratio
PCM	Phase Change Materials



## 1. INTRODUCTION

The energy consumption required to air-condition any building is very high. According to several institutional reports, it accounts for 40% of the total energy generated in the world and therefore it would be causing one third of the total Greenhouse Gas emissions (GHG) [1,2,3]. Obviously, these data justify the importance of improving in this area to achieve sustainability. On the other hand, a number of studies developed in the last years as well as the technological advances in applications of buildings modelling and the databases existing at the present time allow us to be optimistic with the launch of new strategies to improve the efficiency at technical and economic level in the management of the climatization in buildings: Ruparathna et al. [4] summarize different energy efficiency improvement initiatives and define a road map for improving the energy performance of operating commercial and institutional buildings, Harish et al. [5] review modeling and control of building energy systems, Roberts [6] analyzes passive and active measures in existing buildings, Chandel et al. [7] show codes, standards, regulations and energy efficiency alternatives, Santos et al. [8] identify the factors which have influence on any building energy systems and Kneifel [9] estimates life-cycle energy savings of energy efficiency actions in new commercial buildings. For feasibility to carry out a project to air-conditioning public and office buildings will be analyzed: Firstly, we review several researches which have been published in the recent state of the art with the objective of showing the current situation in this field and the different existing focus. Secondly, with the tools revised and determining the ones considered more appropriate, it will be proposed a first working hypothesis. For that, we will have to consider the historical data of the climatological conditions and the Geospatial information of the location of a building, as well as the expected occupancy data and the comfort conditions required by the current legislation. Also, we must assess several HVAC systems with renewables energies, in order to reach the required comfort levels. Finally, it will be presented an approach of modeling through an energy performance simulation software for a public building with offices. It arises how minimize the energy demanded, through the definition of a series of "recipes" based on previous calculations made. These "recipes" could be applied according to the weather and occupancy forecast. This would allow to predefine a pattern of use in advance so that the predicted conditions of the building will conform to a predictable theory. For this purpose, several investigations have been reviewed, as shown in Table 1.

## 2. LITERATURE REVIEW

Through the articles and researches reviewed (a summary of all these works have been shown in the Table 1), one can observe the evolution of MPC for buildings in the last years. Starting from late 80s till nowadays, there are many researches which study the best way to develop a MPC and also multiple trials and implementations have been carried out.

García et al. [10] substantiated that MPC is an excellent control option because it takes into account the weather and occupancy forecast to find an optimal management of the energy. Cho et al. [11] probed strategies as a means of improving the energy efficiency of intermittently heated radiant floor heating systems. The results show that using the predictive control strategy could save between 10% and 12% energy. Oldewurtel et al. [12,13,14] performed climate controls using Stochastic model predictive control. Široký et al. [15] developed an experimental analysis of model predictive control. Cigler et al. [16,17] made a MPC implementation in building. Fabietti et al. [18] controlled HVAC Systems via Explicit and Implicit MPC. Xiwang et al. [19] reviewed building energy modeling for control and operation. De Coninck et al. [20,21] developed a toolbox making validated grey-box building models and did practical implementation of MPC.

*Table 1. Overview of the literature about Predictive Control*

Ref.	Focus of the article	Type of building		Occupancy		HVAC System		Weather data		Energy Control	
		Dwelling	Public	Conduct	Demand	Sources	Device	Real	Forecast	Sensor	Predictive
[10]	Model predictive control: Theory and practice	-	No	No	No	No	No	No	Yes	No	Yes
[11]	Predictive control operated by radiant floor heating systems	-	No	Yes	No	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
[12]	Climate control using stochastic model predictive control	-	No	No	No	No	No	No	Yes	No	Yes
[13]	Stochastic Model Predictive Control	-	No	Yes	No	No	No	No	Yes	No	Yes
[14]	Use of model predictive control and weather forecasts	-	Yes	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
[15]	Experimental analysis of model predictive control	Yes	No	No	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
[16]	Implementing Model Predictive Control in building	No	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
[17]	Model Predictive Control for Buildings	No	Yes	No	No	No	No	No	Yes	No	Yes
[18]	Control of HVAC Systems via Explicit and Implicit MPC	No	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	No	Yes
[19]	Review of building energy modeling for control	-	No	No	No	No	No	No	Yes	No	Yes
[20]	Toolbox for development and validation of grey-box models	-	No	No	No	No	No	No	Yes	No	Yes
[21]	Practical implementation of model predictive control	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
[22]	Heating System use in aged buildings via MPC	Yes	No	No	Yes	No	No	No	Yes	No	Yes (8-20h.)
[23]	Simulation-based model predictive control	Yes	No	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	No	Yes (24h.)
[24]	Building Model Identification during Regular Operation	No	Yes	No	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes (24h.)
[25]	Model Predictive Climate Control of an Office Building	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes (58h.)
[26]	MPC of ventilation for underground stations	No	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes (1h.)
[27]	Coupling a neural network predictor and a fuzzy logic	No	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	No	Yes
[28]	A Dynamic Fuzzy Controller to Meet Thermal Comfort	-	Yes	Yes	No	No	No	Yes	Yes	No	Yes
[29]	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems as a Strategy	-	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No	Yes
[30]	Development of advanced fuzzy logic controllers in BAS	No	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No	No	Yes

During the year 2016, some implementations of MPC in different locations and types of building were realized: Carrascal et al. [22] a dwelling building in the Basque Country (Spain), Ascione et al. [23] a residential building in Naples (Italy), Hu et al. [24] a public building in California (USA), Sturzenegger et al. [25] a office building in Allschwil (Switzerland) and Vaccarini et al. [26] in a underground station in Barcelona (Spain). In this last implementation, a Wireless Sensor Network (WSN) was used to know real data of occupancy, temperature, humidity, etc, because nowadays, there are many possibilities that would allow do it. Other example with a WSN is shown by Reena et al. [31] in their paper where the real occupancy was obtained by means of sensors and used to control indoor climate in a Building

Automation System (BAS). A WSN could be considered the best way to avoid disturbances related with any alteration of temperature or occupancy information, because as indicated by Oldewurtel et al. [32], the occupancy information is a very important factor to reach a correct building climate control. Furthermore, nowadays these detectors could be harvesters because they would be more easily installed and maintained. Having a wireless network, it could transmit real data to a control system to make small adjustments in real time on the HVAC system. This would improve the efficiency because it could give a more appropriate response to the required comfort requirements and also, it would minimize the energy consumption of the building.

Finally, several papers have been reviewed which study different ways to manage the information and control the HVAC system, in order to have a nice comfort conditions but optimizing the energy consumption in the building: Marvuglia et al. [27] combined neuro-fuzzy model for indoor temperature dynamic and automatic regulation, Collotta et al. [28] proposed an artificial neural network to perform indoor temperatures forecast which were used to feed a fuzzy logic control unit, Dragomir et al. [29] identified the most used criteria, related to each modeling step, to define an optimal neural network forecasting tool and Ghadi et al. [30] developed an advanced fuzzy logic controllers in a smart building.

### **3. INPUT DATA AND INFORMATION**

#### **3.1. Meteorological Data (Associated with a location)**

In developed countries it is easy to access to the databases available from governmental organizations and National Meteorological Institutes [14,15] or even from meteorological stations located at airports or cities [24,28]. It is also possible to use applications which allow to calculate the incident solar radiation on flat surfaces arbitrarily oriented in any geographic location, for instance, Energyplus (<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>) [16,23] or others site webs [18]. This information is possible complemented it with other climatic parameters such as temperature, cloudiness, infrared radiation, luminance, atmospheric pressure, wind speed and direction, etc.

#### **3.2. Usage Data and Occupancy of the Building**

The number of people or occupancy density, the duration of the occupancy, the nature of the activity carried out in a building, the type and power of the lighting and other electrical elements (for example, computers) or ventilation requirements as well as the infiltrations, are determinant to perform a correct simulation [6,13].

It is also important to define its operation mode: continuous or intermittent, as well as a timetable of use at different seasons of the year.

It is complex to have a full certainty of this information. However, some standards can be defined according to the degree of occupancy forecast and the level of comfort required [32] with the possibility of making adjustments based on the actual data acquisition by field sensors [31]. This detector let us to know the real conditions and manage the HVAC system according to an optimal real demand.

### **3.3. HVAC System Design Data**

The type and operation of HVAC systems are fundamental, as well as their performance and their ability to achieve the required comfort values optimizing the energy required for it.

Furthermore, if the target is to minimize the economic cost, the electricity rates or fuels required in the HVAC system, they must be taken into account.

Firstly, considering the different existing HVAC systems, a radiant floor could be an efficient system as justified in [33,34]. It would allow for air-conditioning different areas of a building at a set point temperature pre-set in function of the weather forecast and occupancy. Moreover, it could take advantage of the thermal inertia of the building envelope to minimize the energy cost depending on the applicable energy rate in function of its schedule.

And finally, to improve the real requirements at different times, it would be possible to use a WSN that permits to know data of real temperature and occupancy online. For this last application of work Online, it is proposed to use high-performance heat pumps to adjust the comfort conditions demanded on a faster way and thereby avoid any disturbances in the system. These heat pumps can correct mismatches due to unexpected changes in the comfort and / or occupancy conditions. Nowadays, high performance heat pumps have a high efficiency and an excellent behavior as indicated in [35,36]. Both systems, radiant floor and high-performance heat pumps, have the capacity to heat or cool the space where they are installed. It is possible to adjust the air conditioning of the building during all the periods of the year, both in summer and winter.

### **3.4. Building Modelling Data**

Each building is unique, not only due to its location but also for its orientation, geometry, dimensions and distribution of the zones, its characterization according to its construction type, the building materials used in its envelope, its surrounding conditions or the use of each one of its spaces.

It is obvious that the building envelope is one of the most important factors because it includes fenestration properties, Wall-Window Ratio (WWR), wall and roof material properties, air leakage or envelope sealing, natural ventilation, orientation, building configuration, day lit area, shape and height of the building [37,38]. For this reason, a correct modelling of the building is necessary to develop an outstanding investigation.

Obviously, the replacement of windows [39] or using Phase Change Materials (PCM) in the roof [40] to enhance its thermal performance, or any other improvement over the thermal insulation of the opaque envelopes of a building, it is very interesting, because they can reduce thermal losses of the building. But in many situations, a MPC could be more effective, easier, cheaper and with better energy savings.

## **4. OPERATIVE FOR A PREDICTIVE CONTROL USING RENEWABLE ENERGIES**

Two levels are proposed for the control of the HVAC system: the first one is managed by means of a MPC. It is possible to anticipate the temperature / humidity conditions of the building according to the forecast of weather, occupancy and comfort requirements established. For this, the forecast of the meteorological data from a National Meteorological Institute or another source of confidence obtained by Internet with 24 hours in advance can be used [23,24]. Moreover, the schedule and timetable of the

building would be taken into account in order to create several recipes. These recipes will be generated thanks to the modelling and subsequent simulations by means of building energy performance simulation program, to optimize the energy consumption considering the building thermal inertia as well as the energy cost. For example, in a working day in winter, when the activity in the building begins at 8:00 am, it could take advantage of the thermal storage capacity of the building [12,19], to run the heating through the radiant floor with some hours in advance, based on a work pattern defined in a recipe considered the most adequate depending on the weather and occupancy forecasts defined. Even considering the energy cost, because we cannot forget that in some countries, it has a variable cost according to a time range. And above all, the operation of the HVAC system would be running in a controlled way to avoid energy peaks and achieve important energy savings [15,21]. The main target would be for the building to reach the comfort conditions required in the occupancy hours expected. Within the temperature range of these comfort conditions, the temperature set point of each building space would be adjusted according to incident solar radiation, its albedo, WWR, wall and roof material properties, air leakage or envelope sealing, natural ventilation, orientation, building configuration, day lit area, shape and height of the building.

The obtained data could be managed in a control system using a family of controllers without expert intervention for a long time [10]. Nowadays, Grey-Box is considered the most adequate model [20]. For instance, Stochastic Model Predictive Control (SMPC) strategies have been successfully applied in different studies [14,16,18] for energy efficient building climate control. Specifically, a Fuzzy Logic Controller (FLC) could be a nice way [27,28,29,30] to manage the different recipes generated by TRNSYS application in function of the input signals available (forecasts and in real time). The objective would be optimize the control over the HVAC system, composed of radiant floor and high efficiency heat pumps, whose sources are renewable energies, to reduce energy consumption adjusting the heating or cooling depending on occupancy profile and comfort requirement defined.

With a second work mode, let's call it Online Mode, it would be used the high performance heat pumps because they can cool or heat the spaces of the building achieving a more flexible system. This would allow a faster response to sudden variations of conditions or simply any user could have a certain control over range temperature which it would improve its own sensation of comfort [6]. Online Mode would work with a WSN which would capture temperature and occupancy data in real-time of the different spaces of the building, it would make it possible to correct misalignments through the control of the high efficiency heat pumps. This approach with both indicated modes is shown in Figure 1:

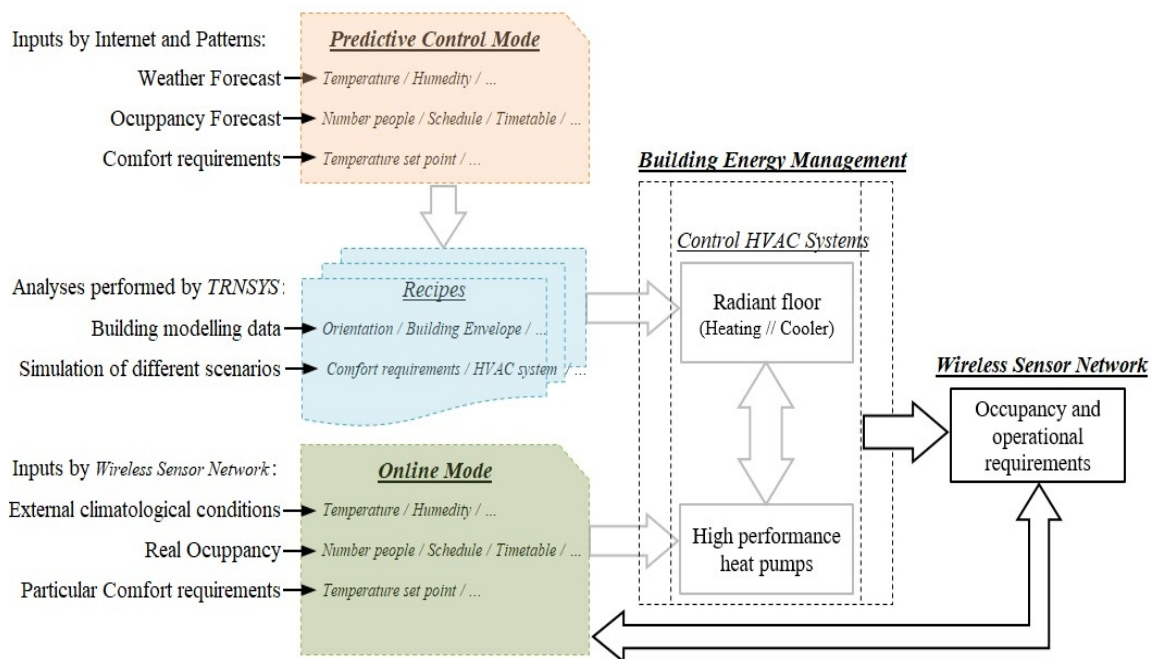


Figure 1. Scheme of the two working modes: Predictive and on-line.

## 5. CONCLUSIONS and FUTURE WORKS

As it has been justified through the mentioned references, it is currently possible to improve the energy efficiency of any building with the available technologies and tools. But specifically in public and office buildings, the possibilities are huge with a predictive control system. It could be possible to manage a HVAC system with source from renewable energies, in an effective way, achieving considerable energy savings, and therefore, reducing CO<sub>2</sub> emissions. It will be possible to reach the goal of ZERO EMISSIONS and in the not too distant future to have buildings that can supply themselves without external energy resources.

Our next work will be a review of the application of renewable energy in buildings, especially solar collectors used with a radiant floor and high efficiency heat pumps. Furthermore, we will consider developing a modeling of an office building in the Basque Country (Spain) by a building energy performance simulation program, for instance the TRNSYS application.

### Acknowledgment

The authors are also grateful to European Union Ministry of Turkey, National Agency of Turkey for the support of this project under the Project Code: 2015-1-TR01-KA203-021342 entitled Innovative European Studies on Renewable Energy Systems.

### REFERENCES

- [1] United Nations Environment Programme, “Why buildings”, 2015. Available: <http://staging.unep.org/sbci/AboutSBCI/Background.asp> (accessed on 24 April 2017).
- [2] European Commission, “EU Energy in Figures. Statistical Pocketbook 2014, 2015 and 2016”. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-statistical-pocketbook> (accessed on 24 April 2017).
- [3] U.S. Energy Information Administration, “Commercial Buildings Energy Consumption Survey 2012” and “Monthly Energy Review 2017”. Available: <https://www.eia.gov/consumption/commercial/reports.php/>.
- [4] Ruparathna, R., Hewage, K., Sadiq, R., “Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1032-1045 (2015).
- [5] Harish, V.S.K.V., Kumar, A., “A review on modeling and simulation of building energy systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1272-1292, (2015).
- [6] Roberts, S., “Altering existing buildings in the UK”, *Energy Policy*, 36, 4482-4486 (2008).
- [7] Chandel, S.S., Sharma A., Marwaha B.M., “Review of energy efficiency initiatives and regulations for residential buildings in India”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1443-1458 (2016).
- [8] Santos-Herrero, J.M., Lopez-Guede, J.M., Flores, I., Sala, J.M., “An ongoing review on building energy efficiency improvement systems”, *4<sup>th</sup> European Conference on Renewable Energy Systems*, Istanbul, 28-31 August 2016.
- [9] Kneifel, J., “Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings”, *Energy and Buildings*, 42, 333-340 (2010).
- [10] García, C.E., Prett, D.M., Morari, M., “Model predictive control: Theory and practice—A survey”, *Automatica*, 25, 335-348 (1989).
- [11] Cho, S.H., Zaheer-uddin, M., “Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems”, *Energy Conversion and Management*, 44, 1333-1342 (2003).
- [12] Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C., Morari, M., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., Wirth, K., “Energy efficient building climate control using stochastic model predictive control and weather predictions”, *American Control Conference*, 5100–5105, 30 June – 2 July 2010.
- [13] Oldewurtel, F., “Stochastic Model Predictive Control for Energy Efficient Building Climate Control”, Ph.D. Dissertation ETH Zurich - No. 19908 (2011).
- [14] Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., Morari, M., “Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control”, *Energy and Buildings*, 45, 15-27 (2011).

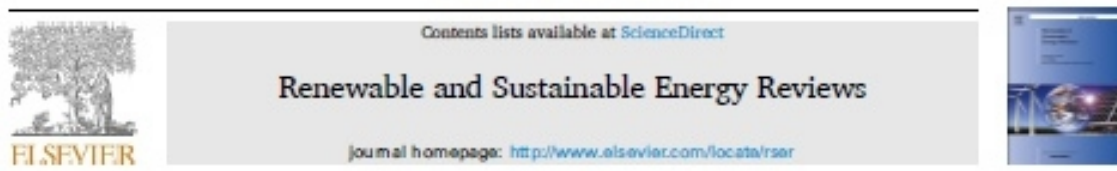
- [15] Široký, J., Oldewurtel, F., Cigler, J., Prívar, S., “Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system”, *Applied Energy*, 88, 3079-3087 (2011).
- [16] Cigler, J., Gyalistras, D., Široký, J., Tiet, V.-N., Ferkla, L., “Beyond theory: the challenge of implementing Model Predictive Control in buildings”, *CLIMA 2013: 11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC*, Prague, 16-19 June 2013
- [17] Cigler, J., “Model Predictive Control for Buildings”, *Ph.D. dissertation Czech Technical University in Prague Faculty of Electrical Engineering* (2013).
- [18] Fabietti, L., “Control of HVAC Systems via Explicit and Implicit MPC: An Experimental Case Study”, *Master's Degree Project of the KTH Electrical Engineering - No. XE-EE-RT 2014:006* (2014).
- [19] Xiwang, L., Wen, J., “Review of building energy modeling for control and operation”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 517-537 (2014).
- [20] De Coninck, R., Magnusson, F., Akesson, J., Helsen, L., “Toolbox for development and validation of grey-box building models for forecasting and control”, *Journal of Building Performance Simulation*, 9(3) (2015).
- [21] De Coninck, R., Helsen, L., “Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels”, *Energy and Buildings*, 111, 290-298 (2016).
- [22] Carrascal, E., Garrido, I., Garrido, A.J., Sala, J.M., “Optimization of the Heating System Use in Aged Public Buildings via Model Predictive Control”, *Energies*, 9, 251 (2016).
- [23] Ascione, F., Bianco, N., De Stasio, C., Mauro, G.M., Vanoli, G.P., “Simulation-based model predictive control by the multi-objective optimization of building energy performance and thermal comfort”, *Energy and Buildings*, 111, 131-144 (2015).
- [24] Hu, Q., Oldewurtel, F., Balandat, M., Vrettos, E., Zhou, D., Tomlin, C.J., Building Model Identification during Regular Operation – Empirical Results and Challenges, *IEEE American Control Conference*, 6-8 July 2016.
- [25] Sturzenegger, D., Gyalistras, D., Morari, M., Smith, R.S., “Model Predictive Climate Control of a Swiss Office Building: Implementation, Results, and Cost-Benefit Analysis”, *Control Systems Technology*, 24(1) (2015).
- [26] Vaccarini, M., Giretti, A., Tolve, L.C., Casals, M., “Model predictive energy control of ventilation for underground stations”, *Energy and Buildings*, 116, 326-340 (2016).
- [27] Marvuglia, A., Messineo, A., Nicolosi, G., “Coupling a neural network temperature predictor and a fuzzy logic controller to perform thermal comfort regulation in an office building”, *Building and Environment*, 72, 287-299 (2014).
- [28] Collotta, M., Messineo, A., Nicolosi, G., Pau, G., “A Dynamic Fuzzy Controller to Meet Thermal Comfort by Using Neural Network Forecasted Parameters as the Input”, *Energies*, 7, 4727-4756 (2014).
- [29] Dragomir, O.E., Dragomir, F., Stefan, V., Minca, E., “Adaptive neuro-fuzzy inference systems as a strategy for predicting and controlling the energy produced from renewable sources”, *Energies*, 8, 13047-13061, (2015).
- [30] Ghadi, Y.Y., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., “Design and development of advanced fuzzy logic controllers in smart buildings for institutional buildings in subtropical Queensland”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 738-744 (2015).
- [31] Reena, M., Mathew, A.T., Jacob, L., “Energy Efficient Wireless Networked Building Automation System Controlled by Real Occupancy”, *TENCON 2015 - IEEE Region 10 Conference*, Macau, 1-4 November 2015.
- [32] Oldewurtel, F., Sturzenegger, D., Morari, M., “Importance of occupancy information for building climate control”, *Applied Energy*, 101, 521-532 (2012).
- [33] Hawila, A.W., Merabtine, A., Troussier, N., Mokraoui, S., Kheiri, A., Laaouatni, A., “Dynamic model validation of the radiant floor heating system based on the object oriented approach”, *4. International Renewable and Sustainable Energy Conference*, Marrakech, 14-17 November 2016.
- [34] Sarbu, I., Sebarchievici, C., “Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump”, *Energies*, 9, 228 (2016).
- [35] Ruelens, F., Iacovella, S., Claessens, B.J., Belmans, R., “Learning agent for a heat-pump thermostat with a set-back strategy using model-free reinforcement learning”, *Energies*, 8, 8300-8318, 2015.
- [36] Tsai, H.L., “Design and Evaluation of a Photovoltaic / Thermal-Assisted Heat Pump Water Heating System”, *Energies*, 7, 3319-3338 (2014).
- [37] Susorova, I., Tabibzadeh, M., Rahman, A., Clack, H.L., Elnimeiri, M., “The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings”, *Energy and Buildings*, 57, 6-13 (2013).
- [38] Lin, H.-W., Hong, T., “On variations of space-heating energy use in office buildings”, *Applied Energy*, 111, 515-528 (2013).
- [39] Aste, N., Caputo, P., Buzzetti, M., Fattore, M., “Energy efficiency in buildings: What drives the investments? The case of Lombardy Region”, *Sustainable Cities and Society*, 20, 27-37 (2016).
- [40] Chung, M.H., Park, J.C., “Development of PCM cool roof system to control urban heat island considering temperate climatic conditions”, *Energy and Buildings*, 116, 341-348 (2016).

# Anexo D:

## Artículo de investigación de la tesis en publicación científica JCR: RSER

**Publicación:** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*  
**Editorial:** **ELSEVIER** **Categoría:** JCR - Q1

Renewable and Sustainable Energy Reviews 142 (2021) 110851



### Modeling, simulation and control tools for nZEB: A state-of-the-art review

J.M. Santos-Herrero<sup>a,\*</sup>, J.M. Lopez-Guede<sup>b</sup>, I. Flores-Abascal<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup> University of the Basque Country UPV/EHU, Faculty of Engineering of Bilbao, Spain  
<sup>b</sup> University of the Basque Country UPV/EHU, Faculty of Engineering of Vitoria, Spain  
<sup>c</sup> ENEEK Research Group, Faculty of Engineering of Bilbao, Spain

#### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
 Nearly-zero energy buildings  
 nZEB  
 Model predictive control  
 MPC  
 Energy-efficient buildings  
 Building energy systems

#### ABSTRACT

Nowadays, most areas of human activity should be reviewed with the aim of reducing CO<sub>2</sub> emissions, since these activities are producing the majority of these emissions. Specifically, the building sector is one of the main responsible activities. In order to minimize the ecological footprint and ensure energy sufficiency, European Union created the nearly-Zero Energy Building (nZEB) concept. More than ten years have elapsed and it worth to review the current state around the concept, considering the new advances in computer development that are already applicable to this field. Accordingly, recent researches published in reputed indexed journals and international conferences have been reviewed. This paper explains the nZEB concept and reviews research articles focused on achieving it. A research gap is detected, so enabling concepts and technologies as Building Energy Performance Simulation (BEPS) tools and Model Predictive Control (MPC) are recalled, and relevant researches where used are included in a specific state-of-the-art for each concept, since the academia considers that these tools should be applied in building air conditioning to achieve nZEB. After this deep analysis, we conclude that the possibilities to optimize the energy consumption are huge combining properly in a holistic way BEPS tools for modeling and simulation and MPC for control strategies. It is possible to manage a Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system using Renewable Energy Sources (RES) in an effective means, reducing CO<sub>2</sub> emissions problems worldwide and reaching considerable energy savings.

#### 1. Introduction

The environmental degradation with its subsequent risk of natural disasters requires prompt action to be taken, because we, human beings, are the main culprits of this situation. The most important goal is to decrease CO<sub>2</sub> gases produced because our planet is facing a climate change without precedent and with unforeseen consequences due to the greenhouse effect. The building sector is one of the major liable human activity given the level of CO<sub>2</sub> emissions it generates. "Buildings account for 40% of total energy consumption in the Union. The sector is expanding, which is bound to increase its energy consumption. Therefore, reduction of energy consumption and the use of energy from renewable sources in the buildings sector constitute important measures needed to reduce the Union's energy dependency and greenhouse gas emissions", was stated in the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) 2010/31/EU [1]. This directive set a new term called "nearly-Zero Energy Building" (nZEB) when it was released by European Parliament.

More than ten years after the term nZEB was established in the EU, it

worth assessing the advances that have been achieved in the scope through a state-of-the-art review, paying an especial attention to the tools that are the hand of scientists and practitioners. They are usually computer programs devoted to modeling, simulation, and control, and given the technological evolution and its progressive cheapening, it is expected to find out an interesting variety of modeling, simulation and control tools to achieve the goal of nZEB.

Hence the use of Building Energy Performance Simulation (BEPS) and Model Predictive Control (MPC) to help the achievement of nZEBs, the authors have reviewed different papers about these concepts published in the last years in reputed scientific journals and international conferences, and have analyzed the main factors to be taken into consideration. Obviously, the location of each building and also its surroundings, which includes topography conditions, vegetation, the distance between buildings, and the use of open spaces, are very important factors and should be taken into account by the architects in the design phase. It must also not be forgotten the climatic conditions to which this building will be subjected, that could change very quickly in function of the season of the year and the moment of the day. With the

\* Corresponding author University of the Basque Country (UPV/EHU), Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, Alda. Urkijo s/n, Bilbao, 48013, Spain.  
 E-mail address: jmsantos005@kade.ehu.es (J.M. Santos-Herrero).

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110851>

Received 1 June 2020; Received in revised form 7 February 2021; Accepted 16 February 2021

Available online 3 March 2021

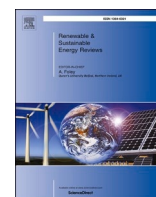
1364-0321/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.





Contents lists available at ScienceDirect

## Renewable and Sustainable Energy Reviews

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/rser>

## Modeling, simulation and control tools for nZEB: A state-of-the-art review

J.M. Santos-Herrero<sup>a,\*</sup>, J.M. Lopez-Guede<sup>b</sup>, I. Flores-Abascal<sup>a,c</sup><sup>a</sup> University of the Basque Country UPV/EHU, Faculty of Engineering of Bilbao, Spain<sup>b</sup> University of the Basque Country UPV/EHU, Faculty of Engineering of Vitoria, Spain<sup>c</sup> ENEDI Research Group, Faculty of Engineering of Bilbao, Spain

## ARTICLE INFO

## Keywords:

Nearly-zero energy buildings  
nZEB  
Model predictive control  
MPC  
Energy-efficient buildings  
Building energy systems

## ABSTRACT

Nowadays, most areas of human activity should be reviewed with the aim of reducing CO<sub>2</sub> emissions, since these activities are producing the majority of these emissions. Specifically, the building sector is one of the main responsible activities. In order to minimize the ecological footprint and ensure energy sufficiency, European Union created the nearly-Zero Energy Building (nZEB) concept. More than ten years have elapsed and it worth to review the current state around the concept, considering the new advances in computer development that are already applicable to this field. Accordingly, recent researches published in reputed indexed journals and international conferences have been reviewed. This paper explains the nZEB concept and reviews research articles focused on achieving it. A research gap is detected, so enabling concepts and technologies as Building Energy Performance Simulation (BEPS) tools and Model Predictive Control (MPC) are recalled, and relevant researches where used are included in a specific state-of-the-art for each concept, since the academia considers that these tools should be applied in building air conditioning to achieve nZEB. After this deep analysis, we conclude that the possibilities to optimize the energy consumption are huge combining properly in a holistic way BEPS tools for modeling and simulation and MPC for control strategies. It is possible to manage a Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system using Renewable Energy Sources (RES) in an effective means, reducing CO<sub>2</sub> emissions problems worldwide and reaching considerable energy savings.

## 1. Introduction

The environmental degradation with its subsequent risk of natural disasters requires prompt action to be taken, because we, human beings, are the main culprits of this situation. The most important goal is to decrease CO<sub>2</sub> gases produced because our planet is facing a climate change without precedent and with unforeseen consequences due to the greenhouse effect. The building sector is one of the major liable human activity given the level of CO<sub>2</sub> emissions it generates. *“Buildings account for 40% of total energy consumption in the Union. The sector is expanding, which is bound to increase its energy consumption. Therefore, reduction of energy consumption and the use of energy from renewable sources in the buildings sector constitute important measures needed to reduce the Union’s energy dependency and greenhouse gas emissions”*, was stated in the Energy Performance of Buildings Directive (EPDB) 2010/31/EU [1]. This directive set a new term called “nearly-Zero Energy Building” (nZEB) when it was released by European Parliament.

More than ten years after the term nZEB was established in the EU, it

worth assessing the advances that have been achieved in the scope through a state-of-the-art review, paying an especial attention to the tools that are the hand of scientists and practitioners. They are usually computer programs devoted to modeling, simulation, and control, and given the technological evolution and its progressive cheapening, it is expected to find out an interesting variety of modeling, simulation and control tools to achieve the goal of nZEB.

Hence the use of Building Energy Performance Simulation (BEPS) and Model Predictive Control (MPC) to help the achievement of nZEBs, the authors have reviewed different papers about these concepts published in the last years in reputed scientific journals and international conferences, and have analyzed the main factors to be taken into consideration. Obviously, the location of each building and also its surroundings, which includes topography conditions, vegetation, the distance between buildings, and the use of open spaces, are very important factors and should be taken into account by the architects in the design phase. It must also not be forgotten the climatic conditions to which this building will be subjected, that could change very quickly in function of the season of the year and the moment of the day. With the

\* Corresponding author University of the Basque Country (UPV/EHU), Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, Alda. Urkijo s/n, Bilbao, 48013, Spain.

E-mail address: [jmsantos005@ikasle.ehu.es](mailto:jmsantos005@ikasle.ehu.es) (J.M. Santos-Herrero).

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110851>

Received 1 June 2020; Received in revised form 7 February 2021; Accepted 16 February 2021

Available online 3 March 2021

1364-0321/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Nomenclature			
ANN	Artificial Neural Networks	MS	European Union Member States
BAS	Building Automation System	nZEB	nearly-Zero Energy Building
BEPS	Building Energy Performance Simulation	PCM	Phase Change Material
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive	PID	Proportional-Integral-Derivative
FLC	Fuzzy Logic Controller	PV	Photovoltaic system
GHG	Greenhouse Gas emissions	REHVA	Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations
HP	Heat Pump	RES	Renewable Energy Source
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning	SMPC	Stochastic Model Predictive Control
LCC	Life Cycle Cost	STPV	Photovoltaic semi-transparent materials
MPC	Model Predictive Control	WSN	Wireless Sensor Network
		WWR	Window to Wall Ratio

implementation of suitable Passive Strategies during the design phase, the following steps, as the definition of the appropriate Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system and its possible control alternatives, will be much more effective. To determine the active strategies is fundamental to consider an economic analysis: for instance, the selection of the type of HVAC system and the most adequate Renewable Energy Source (RES) to ensure the comfort levels required, as well as to reduce the impact of the climate inside the building. The behavior of the occupation is another crucial point. Such a varied set of factors advises the definition of strategies in a multidisciplinary way so that high levels of energy efficiency can be achieved, even reaching nZEB standards.

Due to the previous reasons, bearing in mind the different technological advances currently available, the efficiency of building management could also be improved by BEPS and MPC. These tools are barely being used in buildings now and, despite they have great potential. Their economic cost can be relatively low to achieve satisfactory results if we compare it to other passive approaches mentioned later. Based on the papers shown in Table 3 and discussed in Subsection 2.6, it can be stated that MPC is an interesting tool since its use allows optimizing the energy consumption of the buildings. For example, to manage cooling or heating with RES through occupancy and climate forecasts accessible from various existing modeling applications and meteorological services.

The major contribution of this work is to make a comprehensive review of the state of art on the scope of nZEBs, BEPS tools and MPC based systems for building climatization, providing a structured framework to understand and deepen into those concepts.

The structure of this paper is as follows. Within Section 2, the methodology applied for this review paper is explained in Subsection 2.1. The nZEB concept is outlined in Subsection 2.2, followed by a review of relevant literature conducted to achieve it in Subsection 2.3. In Subsection 2.4, a background is given to introduce the concept of the BEPS tools, and several successful investigations where these tools have been applied are reviewed. In Subsection 2.5 the MPC concept is explained, and Subsection 2.6 analyzes several relevant papers of MPC applied to buildings climatization. The main factors which influence an MPC implementation are discussed in Section 3. Finally, in Section 4 a critical review is made, the main conclusions are summarized and the future challenges are proposed.

## 2. Methodology, concepts and literature review

### 2.1. Methodology

This paper aims to clarify the nZEB concept, the reasons for its definition and importance, as well as the tools and the main factors that are required to achieve it. For this, it has been searched, using the keyword “nZEB” and “nZEB buildings”, in articles published in prestigious scientific journals and international conferences during the last ten

years. A summary of all these investigations is shown in Table 1. After a preliminary analysis, it has been considered that there is a research gap that is worth studying. All the researches reviewed had a specific focus, in most cases only considering passive actions on the building envelope. For these reasons, it was considered interesting to tackle the issue with a multidisciplinary approach and investigate studies where energy efficiency was improved by applying BEPS tools.

Following the same previous methodology, articles published in reputed scientific journals since 2010 have been reviewed, using the keywords “BEPS Tools”, “Building Modeling” and “Building Simulation”. These articles allowed us to check and compare the different BEPS tools that have been applied successfully, as shown in Table 2. This summary indicates these implementations together with the BEPS tool applied.

Finally, it was decided to provide further insight into this subject, specifically on the implementation of MPC systems. Nowadays, this seems the most logical choice in changing environment but where usage profiles can be established. Scientific articles on the development of “MPC” in buildings over the last ten years were researched, except for two previous articles (1989 and 2003) for being historical references. In these investigations, the main factors to be considered for its correct application have been found, as shown in Table 3. These factors have been analyzed and reviewed in the section Discussion, to finally state the pertinent Conclusions after all these analyses have been carried out.

### 2.2. nZEB concept

As indicated in the section Introduction, the EPBD 2010/31/EU [1] introduced the concept named nZEB and set down under its Art.9 that European Union Member States (MS) shall ensure that all new building constructions after December 31, 2020 must achieve all key principles of nZEBs. That means that these new buildings will have highly energy-efficient systems because the very low energy demand that requires an nZEB will have to be mainly covered by nearby or on-site energy production from RES, as stated in its Art.2 [1].

The EPBD 2010/31/EU [1] is an update of the EPBD 2002/91/EC [2]. MSs tried to tackle this global challenge by focusing their efforts on all components that affect building performance and laying down their minimum requirements to enhance the energy performance, setting nZEB as a policy objective. Indeed, to stave off a further growth in the Greenhouse Gas emissions (GHG) levels, MS decided to issue several directives with the target of encouraging the reduction of energy consumption and promoting the use of RES. A framework was initially defined for all the MS in order to:

- reduce GHG at least 20% below 1990 levels by 2020,
- increase the REs share in the overall energy mix to 20% within MS (and a share of biofuels of 10% in fuels for transport),
- achieve the 20% energy efficiency target by 2020, reducing the consumption of primary energy through the implementation of energy efficiency instruments and technologies.

This was denominated 20/20/20. The European policy statement issued with it a cross-cutting guideline of challenging objectives to realize high-energy efficiency in buildings. Later, the new guidelines have kept following with the same working policy and set out even more challenging goals as provided on energy performance [3] in 2012, that underlines key issues like “smart” grids. Another key factor was highlighted in January 2014 [4], where goals were established in terms of energy and climate looking forward to 2030. This new guideline seeks to decrease by 40% GHG compared to the levels reached in 1990, as well as to enhance energy performance by 30% to reach a binding target of at least 27% of RES along the MS.

These European regulatory frameworks about the EPBD mean a real change of the current way of designing (inside of the discipline of Architecture) and building (at Engineering level), through technical systems: from the HVAC to the lighting. In addition, a methodology about cost-optimal levels was defined for energy efficiency standards (both for existing and new buildings), which instructs MS on the way to lay down concerning minimum standards and keep them away from high costs of investment.

### 2.3. Literature review of nZEBs

The methodology followed in this work has been to review different papers published in the last years dealing with nZEB concept, in order to obtain a global vision and to detect if there is any knowledge gap. Several architectural researches [5–10] assess different passive strategies, which must be used from the design stage with the implementation of passive encourage natural techniques profiting from solar shading efficiency such as ground exchangers, night sky radiation or evaporative cooling. The building envelope performance can also be improved with new insulating materials, changing its inertia through Phase Change Material (PCM) or by modifying its Window to Wall Ratio (WWR). And in the same way, when it comes to a retrofitting building, where there are usually more restrictions and the original structure of the building often must be maintained, also attempts to apply new passive strategies that serve to improve its energy efficiency are considered. Among the most common there are the windows replacement and the improvement of the air-tightness.

Several researches analyze and suggest some improvements reported from different technical points of view at the engineering level, comparing the advantages of different HVAC systems using RES [11–13] or at the end-user level, following distinct strategies of comfort [14]. Nonetheless, other authors give more priority to economic issues [15–20] and examine the economic return of several alternatives, trying to seek the best cost-effective solution.

The analyzed papers are summarized in Table 1, where are listed including the following information:

- Focus of the article.
- Type of building analyzed (residential dwelling and/or public building).
- Contribution and strategy at the level of the building envelope (features, comparatives or new passive strategies).
- Whether occupancy behavior or analysis of comfort requirements were considered.
- Type of HVAC System, highlighting the use of renewable sources (Solar Thermal, Photovoltaic system (PV) or Heat Pump (HP)) and the kind of emitter (radiant floor, fan coil or radiator).
- How was defined its building energy management, if they have used some Wireless Sensor Network (WSN), it was applied MPC or any simulation programs.

- And finally, the country or region where they were implemented.

Loukaidou et al. [5] performed tests with different test-cell buildings for cost-optimal analysis of building envelope characteristics. Aste et al. [6] evaluated the energy efficiency of an integrated multifunctional system engineered to satisfy the HVAC requirements utilizing RES on residential buildings. Barthelmes et al. [7] analyzed an example building of a single-family house newly built using the cost-optimal methodology from the preliminary design phase of the project. Murano et al. [8] investigated under what conditions and extent a large imbalance of the energy needs occurs for heating versus cooling in different types of buildings located in several Italian climatic zones. Cornaro et al. [9] characterized a commercial PCM panel, and subsequently from their experimental data validated a PCM computerized tool performed in an energy and indoor environment computer application. In Ref. [10] authors presented an appraisal of potential energy savings of four distinct kinds of photovoltaic semi-transparent materials (STPV) compared to conventional double panel glass. Kurnitski et al. [11] determined cost-optimal and nZEB energy performance levels following the “Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations” (REHVA) definition. Kang et al. [12] developed a method for the optimization of the economic sustainability of the Life Cycle Cost (LCC) to implement energy-saving technologies in the early stages of building design. Karlessi et al. [13] proved the fundamentals of the integrated design process and linked the method to technologies of a smart building, and presented some methodologies for energy efficiency and others pioneering solutions implemented at the construction level. Péan et al. [14] carried out a simulation work to look into the impact of a strategy of control demand-side energy management in a refurbished nZEB dwelling. Guillén et al. [15] performed simulations to check the success of comfort criteria concerning power consumption for the climatization of nZEB dwellings following the Passivhaus (“Passive House”) standard. Keltch et al. [16] investigated the potential of nZEB standard by studying ten cases of non-residential buildings for various purposes uses in Bavaria. Cellura et al. [17] explained the experience of re-designing an already existing rural building located in Sicily, performed an energy audit on this building and its energy consumptions were fully inquired to validate a model aimed towards the achievement of the nZEB target. Monteiro et al. [18] evaluated the proper implementation of the nZEB process in the updating of a Portuguese typical house built in 1950. Becchio et al. [19] introduced a guideline for designing reference technical systems solutions and building envelopes for residential nZEB while, Adhikari et al. [20] showed that a zero-energy building can pose an affordable investment cost, especially if integrated with PV facilities. Paoletti et al. [21] made an overall description of the construction key characteristics in 17 countries from Europe, for both residential and public buildings, checking their efficiency performance and insulating materials together with the use of RES as solar thermal and PVs facilities. Attia et al. [22] made a general overview and identified the future challenges of nZEB design in Southern Europe. And lastly, Zangheri et al. [23] defined cost-optimal and nZEB retrofitting levels for different building typologies and several meaningful climates over Europe.

All these mentioned researches are highly interesting and worthy since they open up the opportunity to further develop in its field, but they do it from partial points of view of specific disciplines: new thermal insulation materials development, economic viability, engineering level solutions, architectural solutions, comparatives. However, it would be advisable to tackle the issue from a more holistic point of view, with a multidisciplinary approach taking into account that several areas can help to improve energy efficiency. More global management should help to reach the target attainment in a faster, more economic and

**Table 1**  
List of the reviewed papers about nZEB.

Ref.	Authors	Focus of the article	Type of building		Building Envelope		Occupancy		HVAC System		Building Energy Management			Country /Region
			Dwelling	Public	Contribution	Passive Strategies	Behavior	Requirements	Renewable Sources	Emitter	WSN	MPC	Simulation Program	
[5]	Loukaïdou et al. (2017)	"nZEBs: Cost-Optimal Analysis of Building"	Yes	Yes	Envelope features	Insulating & Windows	Yes	No	Boiler & HP	-	No	No	Energyplus	Cyprus
[6]	Aste et al. (2017)	"Multi-functional Integrated System for Energy retrofit"	Yes	No	Envelope features	Insulating & Windows	Yes	No	Air-Water HP & PVs	Radiant floor	No	No	Energyplus TRANSYS	Italy
[7]	Barthelemy et al. (2014)	"The Influence of Energy Targets and Economic ..."	Yes	No	Comparative insulation	Insulating materials	-	-	Water HP & Ventilator	Radiant panels	No	No	Energyplus	Italy
[8]	Murano et al. (2017)	"The significant imbalance of nZEB energy need"	Yes	Yes	Envelope features	Insulating & Shading	-	-	-	-	No	No	Design Builder	Italy
[9]	Cornaro et al. (2017)	"Outdoor Characterization of PCMs and Assessment"	No	Yes	Envelope features	PCM	Yes	Yes	No (boiler + chiller)	Fan coil	No	No	IDA-ICE environment	Italy
[10]	Cornaro et al. (2017)	"Energy Saving Assessment of Semi-Transparent PVs"	No	Yes	Envelope features	STPV	No	No	PVs	-	No	No	IDA-ICE (EQUA Sim)	Italy
[11]	Kurmitski et al. (2011)	"Cost optimal and nearly zero energy performance ..."	Yes	No	Comparative HVAC systems	Insulating & Windows	-	-	Solar Th., HP vs Boilers	Radiant floor	No	No	IDA-ICE	Estonia
[12]	Kang et al. (2017)	"Development of an nZEB Life Cycle Cost Assessment"	No	Yes	Comparative HVAC systems	Insulating & Windows	-	-	-	-	-	-	Energyplus	Korea
[13]	Karllesi et al. (2017)	"The concept of smart and nZEB buildings"	Yes	Yes	Comparative Smart Build.	Thermal mass	-	Yes	Solar Th., HP & PVs	Radiant floor	No	Yes	MyLeaf, Idea Fresco	Greece, Crete, Italy
[14]	Péan et al. (2017)	"Impact of Demand-Side Management on Thermal"	Yes	No	Efficiency Analysis	Thermal mass	Comfort Strategy	Comfort Criteria	HP & PVs	Radiator	No	Yes	TRANSYS	Spain
[15]	Guillén et al. (2017)	"Comfort settings and energy demand for residential nZEB"	Yes	No	Efficiency Analysis	-	-	Thermal Comfort	-	-	No	No	TRANSYS	France, Spain, Italy
[16]	Keltsch et al. (2017)	"nZEB Standard for Non-Residential buildings"	No	Yes	Efficiency Analysis	Thermal mass	No	No	Geo, Solar Th., HP & PV	-	No	No	No	Germany
[17]	Cellura et al. (2017)	"Redesign of a Rural Building in a Heritage Site"	No	Yes	Efficiency Analysis	Insulating materials	Yes	Yes	HP & PVs	Fan coil	No	No	TRANSYS	Italy
[18]	Monteiro et al. (2013)	"Application of the nZEB methodology in retrofitting"	Yes	No	Efficiency Analysis	Thermal Envelope	-	-	Solar Th., HP & PVs	-	No	No	No	Portugal
[19]	Becchio et al. (2015)	"Cost optimality assessment of a single-family house"	Yes	No	Efficiency Analysis	Insulating materials	-	-	Ventilation, HP & PVs	Radiant floor	No	No	Energyplus	Italy
[20]	Adhikari et al. (2012)	"Net Zero Energy Buildings: Expense or Investment?"	Yes	No	Efficiency Analysis	-	-	-	Ground HP & PVs	Radiant floor	No	No	Energyplus	Italy
[21]	Paoletti et al. (2017)	"nZEBs: An Overview of the Main Construction Features"	Yes	Yes	Efficiency Analysis	Insulating materials	-	-	Solar Th. & PVs	-	No	No	No	Europe
[22]	Atia et al. (2017)	"Overview and future challenges of nZEB design"	Yes	Yes	Challenges of design	Passive cooling	-	-	Solar Th., HP & PVs	Yes	-	-	-	Southern Europe
[23]	Zangheri et al. (2017)	"Identification of cost-optimal and nZEB refurbishment"	Yes	Yes	Benchmark	-	-	Comfort levels	PVs systems	-	-	-	-	Europe

straightforward way.

#### 2.4. Literature review of buildings modeling and simulation tools

The energy consumed by air conditioning systems in buildings is very high, and therefore, it is the origin of much of the total GHG, as indicated in different studies and statistical reports as “*Why buildings*” [24] by United Nations Environment Programme, “*EU Energy in Figures*” [25] by the European Union and “*Monthly Energy Review*” [26] by the United States. These figures validate the worth of enhancing the effectiveness, at both economic and technical levels, of the management of heating and cooling in buildings. Furthermore, it is to be noted that several researches carried out in recent years, technological developments in building modeling applications and the existing databases enable us to be confident: Ruparathna et al. [27] went over distinct initiatives to enhance the building energy performance, and defined a road map in order to improve the energy performance in official and commercial buildings; Harish et al. [28] reviewed modeling and control of power systems in buildings; Roberts [29] analyzed passive and active actions implemented in existing constructions; Chandel et al. [30] showed norms, bylaws, codes, and energy performance metrics; Santos et al. [31] exposed the factors that influence the energy system of any building and Kneifel [32] calculated the LCC to make different cost-effective energy efficiency improvements in novel commercial buildings.

Every building is singular, not only because of its emplacement, orientation, or its surrounding conditions but also because of its dimensions, geometry, the construction materials utilized in its envelope, the distribution of each area, the use of each space, and its identification depending on its construction type. It is clear that the envelope of a building is one of the most significant factors since it takes into account the fenestration characteristics, air leakage or tightness of the envelope, building configuration, shape and height of the building, orientation, WWR, daylight areas, natural ventilation, characteristics of the wall and ceiling materials, as explained by Susorova et al. [33] and Lin et al. [34]. Many researchers have proposed actions to increase the thermal efficiency of the building. Among them, one possibility is to replace windows with better insulation as in Aste et al. [35] or to use PCM on the roof, as developed in Chung et al. [36]. Any improvement in a building opaque envelope in terms of its thermal insulation is very important because it can change its thermal inertia and significantly reduce its energy losses. For this purpose, the previous modeling of the building helps to make a correct analysis and development. At the same time, it allows evaluating different alternatives to obtain the desired result, reducing the time and investment required for it.

There are different Building Energy Performance Simulation (BEPS) tools that allow to model and perform energy simulations of buildings such as *IDA-ICE*, *EnergyPlus*, *Cplex*, or *TRNSYS*, as shown in Table 2 along with a review of several researches with their focus and the BEPS tool used in each case. These investigations are mentioned throughout this paper and they have shown how the use of BEPS tools is applied successfully to optimize the climatization of buildings, and therefore they could also be applied in nZEBs.

BEPS tools can be used during their design phase, but they are also very useful during other phases of the buildings life-cycle because they enable to optimize energy consumption, especially in the retrofitting processes of buildings. Traditionally the BEPS concept consists of determining the building performance using mathematical models created on the basis of fundamental physical principles through a computer-based tool. Sha et al. [52] suggested a working process for a tool of integrated HVAC improvement design and explained the following concepts:

- “*White box*” or physical-based modeling: a method where a series of mathematical models are created relying on first principles of previous physical data of mass, momentum and energy conservation

**Table 2**  
List of the reviewed papers about BEPS.

Ref.	Authors	Focus of the article	BEPS Tool
[37]	Magnier et al. (2010)	“Optimization of building design using TRNSYS simulations and algorithms”	TRNSYS
[11]	Kurnitski et al. (2011)	“Cost optimal and nZEB energy performance calculations for residential buildings”	IDA-ICE
[20]	Adhikari et al. (2012)	“nZEBs: Expense or Investment?”	EnergyPlus
[7]	Barthelmes et al. (2014)	“The influence of energy targets and economic concerns in design strategies for a residential nZEB”	EnergyPlus
[19]	Becchio et al. (2015)	“Cost optimality assessment of a single-family house for the nZEB target”	EnergyPlus
[28]	Harish et al.	“A review on modeling and simulation of building energy systems”	TRNSYS
[38]	De Boeck et al. (2015)	“A literature review about improving the energy performance of residential buildings”	TRNSYS
[39]	Valdiserri et al. (2015)	“Retrofit strategies applied to a tertiary building assisted by TRNSYS”	TRNSYS
[40]	Vocale et al. (2015)	“Space heating load estimation procedure for CHP systems sizing”	TRNSYS
[41]	Carrascal et al. (2016)	“Heating System use in aged buildings via MPC”	TRNSYS
[42]	Sarbu et al. (2016)	“Evaluation of radiator and radiant floor heating systems”	TRNSYS
[43]	Sarbu et al. (2016)	“Advances in geothermal energy, using ground-source heat pump systems”	TRNSYS
[44]	Harish et al. (2016)	“Reduced order modeling of a building energy system model through an optimization routine”	TRNSYS
[12]	Kang et al. (2017)	“Development of an nZEB life cycle cost assessment tool for fast decision making in the early design phase”	EnergyPlus
[6]	Aste et al. (2017)	“Multi-functional integrated system for energy retrofit of existing buildings: a solution towards nZEB standards”	TRNSYS
[45]	Ogando et al. (2017)	“Energy modeling and automated calibrations of ancient building simulations: a school”	TRNSYS
[46]	Baglivo et al. (2017)	“Envelope design optimization by thermal modeling of a building in a warm climate”	TRNSYS
[14]	Péan et al. (2017)	“Impact of management on thermal comfort vs energy costs in a residential nZEB”	TRNSYS
[15]	Guillén et al. (2017)	“Comfort settings and energy demand for residential nZEB in warm climates”	TRNSYS
[17]	Cellura et al. (2017)	“Redesign of a rural building in a Heritage site in Italy: towards the nZEB target”	TRNSYS
[8]	Murano et al. (2017)	“The significant imbalance of nZEB energy needs for heating and cooling in Italian climatic zones”	EnergyPlus
[9]	Cornaro et al. (2017)	“Energy saving assessment of STPV modules Integrated into nZEB”	IDA-ICE
[10]	Cornaro et al. (2017)	“Outdoor characterization of PCM and assessment of their energy saving potential to reach nZEB”	IDA-ICE
[5]	Loukaidou et al. (2017)	“nZEBs: Cost-optimal analysis of building envelope characteristics”	EnergyPlus
[47]	González et al. (2018)	“Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in nZEBs”	Cplex
[48]	Bozkaya et al. (2018)	“A dynamic building and aquifer co-simulation method for thermal imbalance investigation”	TRNSYS
[49]	Palme et al.	“UWG-TRNSYS Simulation coupling for urban building energy modeling”	TRNSYS
[50]	Iturriaga et al. (2018)	“Optimal renovation of buildings towards the nZEB standard”	TRNSYS
[51]	Yoon et al. (2018)	“Strategies for virtual in-situ sensor calibration in building energy systems”	TRNSYS

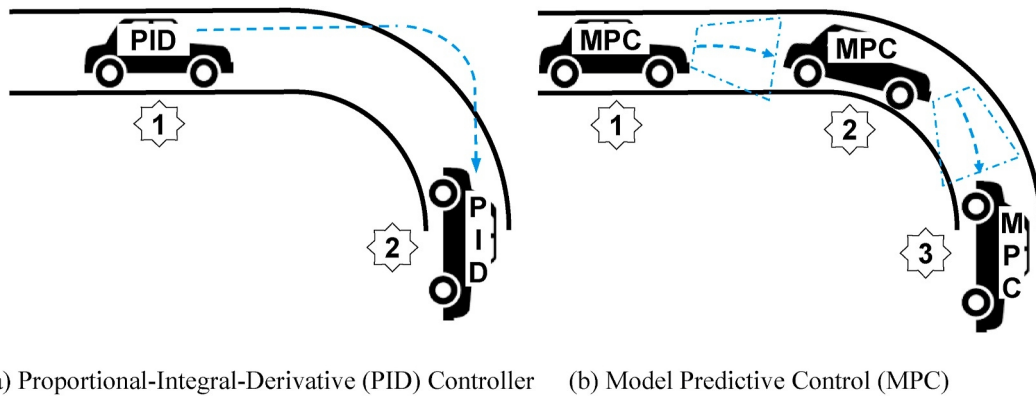


Fig. 1. Example to explain graphically the concept of MPC.

equations, heat transfer, etc. These physical-based techniques are related to thermodynamic properties for in-depth modeling and analysis, which use physical concepts to solve calculations representing the physical phenomena of heat transfer. It is commonly used in the HVAC industry.

- “Black box” or data-based model: a method created from a large amount of empirical data obtained from the real-world. The reasoning of mathematical models and statistical techniques are applied to predict future values through an algorithmic method that is used on a large number of calculations. These methods do not require knowing the intrinsic nature of the phenomenon that is happening real-world phenomena because they are framed on a function derived only from physical-sample records that explain the behavior of a particular system. Among the black box models used in energy forecasting in buildings are Multiple Linear Regression (MLR) or statistical regression model, Support Vector Machine, and Artificial Neural Networks (ANN). One of the most used models of this kind is ANN, a machine learning approach taking the interrelation between output and input variables. Its principle is inspired by the human brain.
- “Grey box” or hybrid model: it uses both black box and white box methods. This approach relies on physical laws, although some process parameters are estimated by taking data-based models. Within this method, resistor-capacitor networks (a simile with an electric circuit representing the heat transfer through the building envelope) are highly used for estimating climatization loads.

After the model estimation process, the next step is the decision making and uncertainty analysis where existing methods indicated in Ref. [52] such as Genetic algorithms, Dynamic programming, Expert systems, and Monte Carlo simulation. And recently within these processes of decision making and uncertainty analysis, different implementations of ANN have been carried out successfully: Du et al. [53] in a rural house in China, where energy consumption and indoor environment parameters were recorded during one year and were compared with the obtained annual simulation results; Escandon et al. [54] developed a surrogate model to evaluate the thermal behavior of social housing stock in Spain; Ciulla et al. [55] implemented a parametric simulation to assess the energy performance of 195 scenarios and justified the use of MLR method; Besides to these successful implementations with ANNs of modeling approaches, they have been also used for control tasks. Hussain et al. [56] presented the energy modeling with a nonlinear-autoregressive ANN with exogenous input in a chiller plant; Mehboob [57] developed an optimization of parametric adjustment making ANN model optimal for five climatic regions and Nasraddin et al. [58] addressed the multi-target optimization of a two-cooler system, which shows the potential of this way to determine the proper operation of high-technology HVAC systems in a house.

It is also noted that the technological advances made in recent years

have provided modeling and simulation tools with acceptable accuracy. After analyzing all previous researches, it is considered that conventional control systems based on Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers or similar strategies are not an optimal solution for managing a building climate control, where there are changing situations and a high risk of uncertainty. Considering the variety of existing intelligent control strategies, which have been introduced in the last part of the 20th century, it has been thoughtful to analyze the most efficient advanced control techniques in the research of the last ten years in building climatization, as justified by Drgoña et al. [59]. In this sense, the MPC systems have a wide transversal range of applications, and therefore, its development is being promoted in industrial areas for all types of applications. In building air conditioning, MPC is currently the most extended choice because there is a changing environment but the usage profiles can be established and/or predicted. Not many years ago, its computational requirements were a significant handicap for its use. However, the development achieved so far in hardware and software tools has overcome this drawback. Then, all the elements for its successful application are available. Also, it is possible to provide relatively good weather and occupation forecasts. Internal gains can be calculated via BEPS tools and the required comfort specifications are known. For all these reasons, it has been considered of interest to carry out an analysis of the current state-of-the-art on the MPC systems applied to building climatization.

### 2.5. MPC concept

To explain it graphically, it is typical to make the simile of when we drive a vehicle to move around. The variability in the consumption of fuels is under the influence of distinct variables such as the design of the vehicle, type of car, its weight, its aerodynamic, state of its tires, etc. The same applies in buildings with the effect of their design, orientation, size, insulating materials, shape and type of windows, etc. In the car example, this will also vary according to the route wherever we drive, the road type (motorway, mountain or urban roads), as well as the number of passengers, weight of the luggage, or traffic conditions, such as the state of the traffic lights, controls, traffic jams and long and interminable unpredictable situations that we are unable to control. For buildings, these factors are weather and occupation conditions which are predictable but not controllable. In spite of this apparent complex situation, we can have a great influence on consumption depending on the conditions of our vehicle, the state of the tires or the type of wheels. We can even improve their aerodynamics with spoilers, diffusers, side skirts and front wind splitters to minimize such consumption, as we do in buildings improving their envelope with new insulating materials or replacing their windows. Also we should have a “green driving” mode (less sporting and taking advantage of the inertia of our vehicle), thus decreasing fuel consumption. Moreover avoiding sudden braking at a red light or choosing the roads with the most advantageous conditions,

there is a very positive impact on the final consumption of the car.

Continuing with the simile, many times a vehicle is used to make regular trips. That is, almost every day people go to their jobs through a route that based on their experience, is considered the best for being the most comfortable or faster. What would happen if we follow the same strategy in a building? That is to say, what would happen if we manage an adequate algorithm with which we could control the HVAC system to optimize the thermal inertia of the building, also considering a forecast of occupation and climate as the basis? Fig. 1 illustrates it with a classic example to show the differences between the two strategies that are normally used. Both controllers PID and MPC know the reference trajectory for the system (the map of the road to move out with the car). The PID controllers make the control action once the error has been done and measured, i.e., once that the car has passed the curve, without possibility of preventing it. It is like driving looking in the rear view mirror. However, MPC controllers have a model of the vehicle (how the dynamics of the system is) and make a calculus of several control actions applying only the first one of them, taking into account how they will affect the control of the car during several sampling times. In short, it is as driving looking forward the road.

That could help to lay down the most suitable "route" to decrease consumption as much as possible and within the cheapest time periods. Continuing with the car example, if anybody drives a car through the route that is theoretically the most appropriate and also the driver knows the state of the traffic and even when he sees a red light in a traffic light, he allows as much as possible for the vehicle to approach with its own inertia, without accelerating or barely using the brake, it is surprising the consumption ranges that it can reach. We consider parallelism can be established with energy consumption in buildings and therefore, considering the MPC as an interesting tool to achieve nZEBs.

## 2.6. Literature review of MPC applied to buildings climatization

Authors have reviewed several papers about MPC which have been published in the recent literature to show the current situation in this field and the alternative approaches in use. In this review, the development of MPC based techniques for building climatization in recent years can be observed. There are numerous researches from the late 1980s to the present day, studying the best way to work out an MPC based strategy to minimize energy consumption and various tests or deployments which have been conducted. The most significant ones are shown in Table 3, where they are analyzed with the following fields:

- Focus of the article.
- Type of building analyzed (residential dwelling or public building).
- Its contribution or improvement at the predictive control level and if the research has considered the behavior of the building thermal mass under study.
- Type of weather data managed (Real and/or Forecast).
- Whether occupancy behavior or analysis of comfort requirements were considered.
- Whether the research has considered the energy source and the kind of emitter used.
- How was defined its building energy management defined, and whether they have used some Wireless Sensor Network (WSN) or any simulation program.

García et al. [60] demonstrated that MPC is an accurate control alternative because it considers both occupancy and climate forecasting

to achieve optimal energy management. Cho et al. [61] used and checked several approaches through which to enhance the power performance of discontinuous heating by means of radiant floor facilities, demonstrating that the MPC approach could achieve savings from 10% to 12% of the power requirement.

Oldewurtel et al. [62,63] developed climate management by applying a Stochastic MPC. Siroký et al. [64] performed an experimental test of MPC for building air conditioning. Gigler et al. [65] applied an MPC strategy on building climatization. Fabietti et al. [66] operated HVAC systems through implicit and explicit MPC. Xiwang et al. [67] overviewed building power modeling techniques for its running and control. De Coninck et al. [68,69] created a toolbox to obtain accepted grey box models of buildings and carried out a real application of MPC.

There have been several applications of MPC algorithms in distinct kinds of building and emplacements: Carrascal et al. [41] in an apartments building in the north of Spain: Bilbao - Basque Country; Hu et al. [70] in a state building in the USA: California; Ascione et al. [71] in a dwelling building in Italy: Naples; Sturzenegger et al. [72] in an office block in Switzerland: Allschwil and Vaccarini et al. [73] in a subway station in Spain: Barcelona, where a WSN was implemented to find out actual records of temperature, occupation, humidity, etc. Another application of a WSN is provided by Reena et al. [74] in their research where the actual occupancy was captured by sensors and used to manage the indoor environment (air temperature, humidity,...) in a Building Automation System (BAS). A solution with WSN can be regarded as the most proper working approach to prevent perturbations related to any sudden change of occupancy and temperature data. As exposed by Oldewurtel et al. [75], the occupancy data are a very sensitive factor to achieve optimal management in the climatization of a building. Besides, these sensors can now be harvested, so they are easier to install and maintain. By arranging a WSN, the actual records could be provided to the operational control to apply even minor real-time adjustments to the HVAC system. In this way, the performance is enhanced because the management system can provide a more adequate response to the comfort requirements demanded and optimize the power consumption of the building.

These researches have been successfully developed. However they require expert personnel and have a high complexity because of the model which requires high accuracy. It should not be forgotten that buildings are in a changing environment, with high variability, and on which it is very complex to establish fixed rules. That leads to the need to develop an approach with a learning capacity that allows modeling complex systems. In this sense, architectures based on ANNs and Fuzzy Logic Controllers (FLC) could also be considered a very interesting option.

For these reasons, we have also examined several investigations where authors researched different approaches to process the data and control the HVAC systems, to obtain the required comfort conditions, but minimizing the energy requirements through the building climate control: Collotta et al. [76] put a forward ANN to check indoor climatic conditions which were utilized to provide data to an FLC, Marvuglia et al. [77] linked a neuro-fuzzy model for indoor climatic conditions automatic and dynamic adjustment, Dragomir et al. [78] made an identification of the most commonly used criteria involved in every step of the modeling process, in order to determine an optimal forecasting tool with an ANN and Ghadi et al. [79] designed an update a FLC in a BAS.

**Table 3**  
List of the reviewed papers about MPC.

Authors	Focus of the article	Type of building		Applied strategy		Weather data		Occupancy		HVAC System		Energy Management	
		Dwelling	Public	Contribution/Improvement	Thermal mass	Real	Forecast	Behavior	Requirements	Source	Emisor	WSN	Simulation
[60] García et al. (1989)	"Model predictive control: Theory and practice—A survey"	-	-	Predictive Control	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No	Yes
[61] Cho et al. (2003)	"Predictive control operated by radiant floor heating systems"	-	-	MPC implementation	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes	No	Yes
[62] Oldewurtel et al. (2010)	"Climate control using stochastic model predictive control"	-	-	Stochastic strategy	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No	Yes
[63] Oldewurtel et al. (2011)	"Use of model predictive control and weather forecasts"	-	-	MPC implementation	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes
[64] Široký et al. (2011)	"Experimental analysis of model predictive control"	Yes	No	MPC implementation	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	No	Yes	Yes
[65] Giger et al. (2013)	"Implementing Model Predictive Control in building"	No	Yes	MPC implementation	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes	Yes	Yes
[66] Fabietti et al. (2014)	"Control of HVAC Systems via Explicit and Implicit MPC"	No	Yes	MPC implementation	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes
[67] Xi Wang et al. (2014)	"Review of building energy modeling for control"	-	-	Modeling and prediction	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No	Yes
[68] De Coninck et al. (2015)	"Toolbox for development and validation of grey-box building"	-	-	Predictive Control	Yes	No	Yes	No	No	No	No	No	Yes
[69] De Coninck et al. (2016)	"Practical implementation of model predictive control"	No	Yes	MPC implementation	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
[70] Carrascal et al. (2016)	"Heating System use in aged buildings via MPC"	Yes	No	MPC implementation	Yes	No	Yes	No	Yes	No	No	No	Yes
[71] Hu et al. (2016)	"Building Model Identification during Regular Operation"	No	Yes	MPC implementation	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	No	Yes	Yes
[72] Ascione et al. (2016)	"Simulation-based model predictive control"	Yes	No	MPC implementation	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes
[73] Sturzenegger et al. (2016)	"Model Predictive Climate Control of a Swiss Office"	No	Yes	MPC implementation	Yes	No	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
[74] Vaccarini et al. (2016)	"Model predictive energy control of ventilation for underground"	No	Yes	MPC & WSN	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes
[75] Collotta et al. (2014)	"A Dynamic Fuzzy Controller to Meet Thermal Comfort"	-	-	Dynamic Fuzzy controller	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes
[76] Marvuglia et al. (2014)	"Coupling a neural network predictor and a fuzzy logic"	No	Yes	Fuzzy logic controller	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes
[77] Dragomir et al. (2015)	"Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems as a Strategy"	-	-	Neuro-Fuzzy Systems	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes
[78] Ghadi et al. (2015)	"Development of advanced fuzzy logic controllers"	No	Yes	Fuzzy logic controllers	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	Yes



### 3. Discussion: main factors MPC to buildings climatization

Considering as previously mentioned that MPC is currently the most used advanced method to control for building climatization, it is convenient to review the main factors to take into account when applying MPC-based strategies. The geospatial information of the location of a building and the historical data of the climatological conditions together with the occupancy forecast data and the comfort conditions required by the current legislation are the basis for defining its appropriate HVAC system. Besides, a building model through an energy performance simulation software to take advantage of its thermal inertia is highly needed to optimize energy consumption.

#### 3.1. Meteorological data

In developed countries, it is easy to access databases available from governmental organizations and National Meteorological Institutes as indicated by Oldewurtel et al. [63] and Široký et al. [64], or even from meteorological stations located at airports or cities, as exposed by Hu et al. [70] and Collotta et al. [76]. It is also possible to use applications that allow calculating the incident solar radiation on flat surfaces arbitrarily oriented in any geographic emplacement. For example, *EnergyPlus* was used by Cigler et al. [65] and Ascione et al. [71] or other web sites as in Fabietti et al. [66]. This information can be complemented with other climatic parameters like air temperature, humidity, luminance, infrared radiation, atmospheric pressure, cloudiness, wind direction and speed, etc., related to the emplacement of the building.

A large proportion of these data are available through Geographic Information Systems (GIS). That allows having a database to gather historical data with different ranges of temperatures and humidities to define patterns from which create varied “recipes” to work on an HVAC system for a specific building.

#### 3.2. Occupancy and usage information of a building

The number of people or the density of occupation, the kind of the activities performed in a building, the length of the stay, the type and the power of the lighting equipments and other electrical devices as informatic hardware, or the air infiltrations control, as well as air renewals requirements, are vital in order to make a proper building energy simulation, as indicated in Roberts [29]. Furthermore, it is significant to determine its mode of operation: intermittent or continuous, and also to have a schedule for the use during distinct times of the year.

It is difficult to be completely sure of this information. Nevertheless, some standards can be known based on the comfort level required and the expected occupancy rate, as Oldewurtel et al. [75] point out. It is even more useful if the management also includes the option to set based on current registers collected by field sensors in a BAS, as indicated by Reena et al. [74]. These detectors allow to meet the real-world operating conditions and operate the HVAC system based on real conditions and minimizing its energy consumption.

#### 3.3. HVAC system layout information

The running and type of HVAC systems are essential, as well as their capability and their efficiency to reach the requested comfort standard minimizing the power required for it. In addition, if the goal is to reduce the economic impact, the fuel needed or electricity tariffs in the HVAC system should also be regarded as a substantial constraint. Also, considering all the possible HVAC systems, a properly insulated radiant floor, for instance, would be a highly effective system, as explained by Sarbu et al. [42] and Hawila et al. [80]. That allows the climatization of distinct zones of a building to a pre-established set point temperature depending on the occupancy and weather forecast. Besides, it is possible to get the most of the benefits of the thermal mass of the building envelope to reduce energy costs in function of the applicable energy tariff

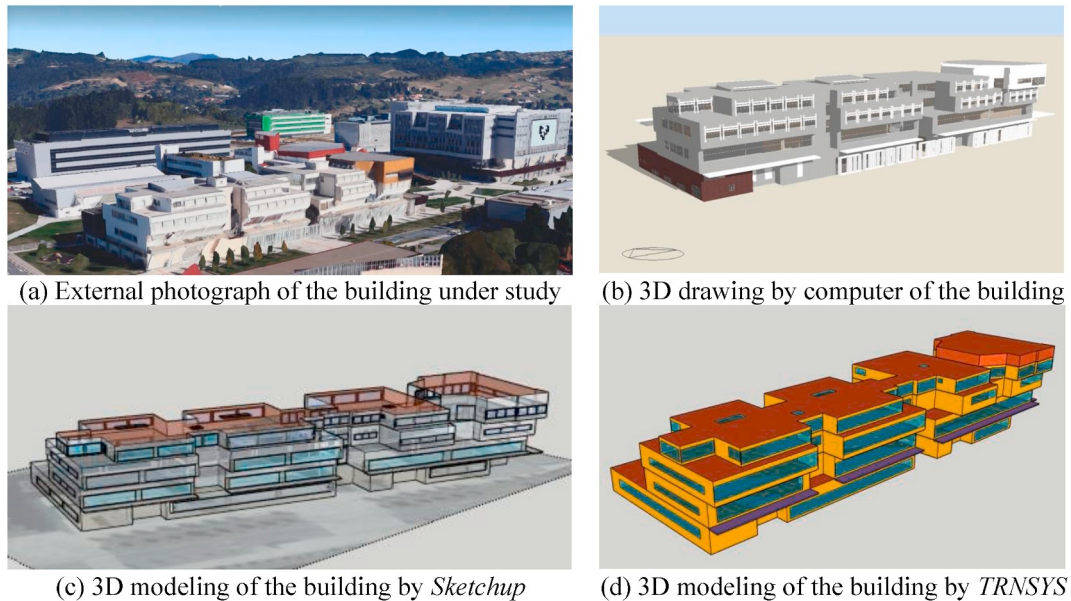
depending on its forecast. For instance, a building could climatize itself at night by taking advantage of a cheaper energy tariff, because its thermal mass could keep a comfort conditions while minimizing energy consumption at higher energy prices in other time slots.

It might also be possible to implement a WSN that allows the real occupation and temperature data to be known online to balance the on-site requirements at distinct periods. For this purpose, the use of high-performance HPs is considered in order to adjust the claimed comfort requirements in a faster way and thus, avoid any perturbation in the indoor environment of the building. These high-efficiency HPs have the ability to correct deviations caused by sudden changes in occupancy and/or comfort demands. Currently, these HPs achieve high efficiency and a great performance, as it is indicated by Tsai et al. [81] and Ruelens et al. [82]. Both high-efficiency HPs and radiant floor using solar water collectors are empowered to cool or heat the ubication where they are placed. Therefore, with them is possible to climatize a building at any time of the year.

### 4. Conclusions and future challenges

In this paper, the first concept that we have recalled has been nZEB. Through an analysis of several relevant papers of the literature, different factors that are important to reach this concept have been examined. However, the researches have been carried out normally considering some of these factors independently, e.g., making improvements on envelope features with a new insulating material or windows replacement to improve the air-tightness. Various researches have considered the occupancy behavior and the comfort requirements, while others have conducted an analysis of the HVAC facilities, and sometimes building energy management has been also reviewed. In our opinion, all of them are very worthwhile as they provide an opportunity to further develop energy efficiency in buildings, but it is required to tackle the issue with a broader perspective. In this sense, holistic treatment is desirable, i.e., a multidisciplinary approach that takes into account different areas of action (architectural solutions, development of insulation materials, improvements in the level of engineering, economic viability, etc.) since it facilitates the achievement of the objective of improving the energy efficiency of buildings.

Next, the BEPS tools have been considered very interesting to apply in buildings with the aim of improving their energy efficiency. Consequently, these tools have also been reviewed since using them, the possibility of minimizing energy consumption is huge. For these reasons, many recent papers about BEPS tools have been analyzed and three methods have been explained enabling the modeling of the energy efficiency of a building. Firstly, the “white box” method (or relying on physical models) has been introduced. This method is more appropriate in contexts where building design information is at hand and particularly in the new building design phase, but sometimes it is not possible. A second option is the “black box” method (or model based on machine learning), which uses statistical processing of temperature data and power consumption in the building, so we have highlighted some research about ANN. The “black box” method is useful when one has all the actual building operating conditions and real power consumption, but limited information about its design. However, it can be computationally expensive. Both methods are highly dependent on the quantity and quality of available data. Compared with physical based methods, a “black box” modeling demands less building design data and may seem simpler to perform, but it is not useful if an understanding of physical phenomena is required. The last method, we have considered is the “grey box” model (or hybrid approach), which is founded on both physical methods and automatic learning tools to modeling the building thermal behavior. Therefore, the “grey box” method seems to be a very promising focus at present because it can be considered as a nice balance between both types of models. This approach is very useful when a physical model of the construction is obtainable, but it is unfinished, or it cannot offer enough guarantee, and hence it must be supplemented. It



**Fig. 2.** Rectorate building of the University of the Basque Country.

is especially suitable in buildings already finished, where it is generally complicated to modeling a “perfect” physical pattern due to the lack of data because part of the information of the materials used is not available or they have just suffered a degradation of their characteristics. After the modeling process through the BEPS tools, a control management must be applied out to minimize energy consumption in the building HVAC systems. It has been considered of interest to first make a reflection on the current state based on the number of existing relevant papers, where the MPC is the most extended option. However, new advances in computer development makes it very likely that in the short or medium term, new trends could arise that would apply to the field of building climatization. Artificial Intelligence will probably have a considerable weight in this development, as shown by the existence of some research that is already applying it successfully.

Focusing on the most extended option up to the moment (MPC), the main factors affecting it when applying in building climatization have been shown. The MPC is considered an excellent control option for optimizing energy consumption, based on occupancy and climate forecasts. This conclusion is supported by several relevant papers, where implementations of MPC have been carried out in distinct kinds and emplacements of buildings. Therefore, using the BEPS tools and applying MPC in the air conditioning of buildings would lead to a change in the current work philosophy. The first step would be to carry out an analysis and modeling of the building by specialized technicians, and then to propose an energy management system that optimizes energy consumption in the HVAC, instead of carrying out laborious works, and in most cases costly, for modifying the envelope of the building under study. The levels of savings can be similar to the proper optimization of the energy consumption of HVAC systems through the management of occupancy forecasts, degree of use, and external environmental conditions. Indeed, that approach is supplementary to the conventional one, which improves with passive measures on the building envelope. It is possible to combine both techniques to achieve higher energy savings and consequently reduce CO<sub>2</sub> emissions.

From our point of view, it is crucial to promote the enhancement of power performance in stock buildings because their current rate of renovation or replacement is very low. In retrofitting buildings, it is advisable to use the new MPC and BEPS tools together with conventional solutions: insulation materials and architectural and engineering improvements, because as it has been shown, this combined use is a smart way to reach energy consumption reduction goals. And for these

reasons, our recommendation is to start with public office buildings because they have high power consumption in their climatization and their data prediction (forecasts and operational requirements) are simpler to know.

It is proposed as work to be developed in a next future to apply these concepts to a public office building: the Rectorate building of the University of the Basque Country (North of Spain) after its refurbishment from 2016 to 2019, in order to check on a real case the process of modeling, simulation, processing, and data analysis. In Fig. 2, (a) an external image of the building under study is shown, (b) its corresponding 3D drawing also of its exterior, (c) 3D modeling of the building by *Sketchup* software, and (d) 3D modeling of the building after plugin *Sketchup-TRNSYS17*.

#### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

#### Acknowledgments

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

#### References

- [1] Union European. Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Brussels, Belgium: Official Journal of the European Union; 2010.
- [2] Union European. Directive 2002/91/EC of the European parliament and of the council of December 16th, 2002 on the energy performance of buildings. Brussels, Belgium: Official Journal of the European Union; 2003.
- [3] Union European. Directive 2012/27/EU of the European parliament and of the council of 25 October 2012 on energy efficiency. Brussels, Belgium: Official Journal of the European Union; 2012.
- [4] Union European. 2030 framework (2013/2135(INI)) of the European parliament and of the council of 22 January 2014 for climate and energy policies. Brussels, Belgium: Official Journal of the European Union; 2014.
- [5] Loukaidou K, Michopoulos A, Zachariadis T. Nearly-zero energy buildings: cost-optimal analysis of building envelope characteristics. *Procedia Environ Sci* 2017; 38:20–7. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.069>.
- [6] Aste N, Adhikari RS, Del Pero C, Leonforte F. Multi-functional integrated system for energy retrofit of existing buildings: a solution towards nZEB standards. *Energ Procedia* 2017;105:2811–7. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.608>.

- [7] Barthelmes VM, Becchio C, Bottero MC, Corgnati SP. The influence of energy targets and economic concerns in design strategies for a residential nearly-zero energy building. *Buildings* 2014;4:937–62. <https://doi.org/10.3390/buildings4040937>.
- [8] Murano G, Ballarini I, Dirutigliano D, Primo E, Corrado V. The significant imbalance of nZEB energy need for heating and cooling in Italian climatic zones. *Eng Procedia* 2017;126:258–65. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.150>.
- [9] Cornaro C, Basciano G, Puggioni VA, Pierro M. Energy saving assessment of semi-transparent photovoltaic modules integrated into NZEB. *Buildings* 2017;9:7. <https://doi.org/10.3390/buildings7010009>.
- [10] Cornaro C, Pierro M, Puggioni VA, Roncarati D. Outdoor characterization of phase change materials and assessment of their energy saving potential to reach NZEB. *Buildings* 2017;5:57. <https://doi.org/10.3390/buildings7030055>.
- [11] Kurnitski J, Saari A, Kalamees T, Vuolle M, Niemelä J, Tark T. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation. *Energy Build* 2011;43:3279–88. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.033>.
- [12] Kang HJ. Development of a nearly zero emission building (nZEB) life cycle cost assessment tool for fast decision making in the early design phase. *Energies* 2017; 59:10. <https://doi.org/10.3390/en10010059>.
- [13] Karlessi T, Kampelis N, Kolokotsa D, Santamouris M, Standardi L, Isidori D, Cristalli C. The concept of smart and NZEB buildings and the integrated design approach. *Procedia Eng* 2017;180:1316–25. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.294>.
- [14] Péan TQ, Ortiz J, Salom J. Impact of demand-side management on thermal comfort and energy costs in a residential nZEB. *Buildings* 2017;37:7. <https://doi.org/10.3390/buildings7020037>.
- [15] Guillén-Lambea S, Rodríguez-Soria B, Marín JM. Comfort settings and energy demand for residential nZEB in warm climates. *Appl Energy* 2017;202:471–86. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.163>.
- [16] Keltsch M, Lang W, Auer T. Nearly zero energy standard for non-residential buildings with high energy demands—an empirical case study using the state-related properties of BAVARIA. *Buildings* 2017;25:7. <https://doi.org/10.3390/buildings7010025>.
- [17] Cellura M, Ciulla G, Guarino F, Longo S. Redesign of a rural building in a heritage site in Italy: towards the net zero energy target. *Buildings* 2017;68:7. <https://doi.org/10.3390/buildings7030068>.
- [18] Monteiro J, Castro O. Application of the nZEB methodology in the retrofitting of a typical Portuguese dwelling from the 50's. 11th REHVA World Congress. Prague: CLIMA 2013; 2013.
- [19] Becchio C, Fabrizio E, Monetti V, Filippi M. Cost optimality assessment of a single family house: building and technical systems solutions for the nZEB target. *Energy Build* 2015;90:173–87. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.050>.
- [20] Adhikari RS, Aste N, Del Pero C, Manfren M. Net zero energy buildings: expense or investment? *Eng Procedia* 2012;14:1331–6. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.887>.
- [21] Paoletti G, Pascual Pascuas R, Perneti R, Lollini R. Nearly zero energy buildings an overview of the main construction features across Europe. *Buildings* 2017;43:7. <https://doi.org/10.3390/buildings7020043>.
- [22] Attia S, Eleftheriou P, Xeni F, Morlot R, Ménézo C, Kostopoulos V, Betsi M, Kalaitzoglou I, Pagliano L, Cellura M, Almeida M, Ferreira M, Baracu T, Badescu V, Crutescu R, Hidalgo-Betanzos JM. Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in southern Europe. *Energy Build* 2017;155: 439–58. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043>.
- [23] Zangheri P, Armani R, Pietrobon M, Pagliano L. Identification of cost-optimal and nZEB refurbishment levels for representative climates and building typologies across Europe. *Eng Effic* 2017. <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9566-8>.
- [24] United Nations Environment Programme. Why buildings. Available: <http://staging.unep.org/sbci/AboutSBci/Background.asp>. [Accessed 20 March 2019].
- [25] EU energy in figures. Statistical pocketbook 2014, 2015 and 2016. European Commission; 2016. <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-statistical-pocketbook>. [Accessed 20 March 2019].
- [26] U.S. Energy Information Administration. Monthly energy review 2017. Available: 2017. <https://www.eia.gov/consumption/commercial/reports.php/>. [Accessed 20 March 2019].
- [27] Ruparathna R, Hewage K, Sadiq R. Improving the energy efficiency of the existing building stock: a critical review of commercial and institutional buildings. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;53:1032–45. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.084>.
- [28] Harish VSKV, Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;56:1272–92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>.
- [29] Roberts S. Altering existing buildings in the UK. *Energy Policy* 2008;36:4482–6. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.023>.
- [30] Chandel SS, Sharma A, Marwaha BM. Review of energy efficiency initiatives and regulations for residential buildings in India. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54: 1443–58. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.060>.
- [31] Santos-Herrero JM, Lopez-Guede JM, Flores I, Sala JM. An ongoing review on building energy efficiency improvement systems. Istanbul: IV European Conference on Renewable Energy Systems; 2016.
- [32] Kneifel J. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. *Energy Build* 2010;42:333–40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.011>.
- [33] Susorova I, Tabibzadeh M, Rahman A, Clack HL, Elnimeiri M. The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. *Energy Build* 2013;57:6–13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>.
- [34] Lin H-W, Hong T. On variations of space-heating energy use in office buildings. *Appl Energy* 2013;111:515–28. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.040>.
- [35] Aste N, Caputo P, Buzzetti M, Fattore M. Energy efficiency in buildings: what drives the investments? The case of Lombardy Region. *Sustain Cities Soc* 2016;20:27–37. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.09.003>.
- [36] Chung MH, Park JC. Development of PCM cool roof system to control urban heat island considering temperate climatic conditions. *Energy Build* 2016;116:341–8. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.056>.
- [37] Magnier L, Haghghat F. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Build Environ* 2010;45:739–46. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.016>.
- [38] De Boeck L, Verbeke S, Audenaert A, De Mesmaeker L. Improving the energy performance of residential buildings: a literature review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:960–75. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.037>.
- [39] Valdiserri P, Biserni C, Tosi G, Garai M. Retrofit strategies applied to a tertiary building assisted by Trnsys energy simulation tool. *Eng Procedia* 2015;78: 765–70. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.091>.
- [40] Vocale P, Pagliarini G, Rainieri S. Space heating load estimation procedure for CHP systems sizing. 33rd UIT Heat Transfer Conference; 2015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/655/1/012008>.
- [41] Carrascal E, Garrido J, Garrido AJ, Sala JM. Optimization of the heating system use in aged public buildings via model predictive control. *Energies* 2016;9:251. <https://doi.org/10.3390/en9040251>.
- [42] Sarbu I, Sebarchievici C. Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump. *Energies* 2016;9:228. <https://doi.org/10.3390/en9040228>.
- [43] Sarbu I, Sebarchievici C. Advances in geothermal energy: using ground-source heat Pump systems for heating/cooling of buildings. London: Basel I. Ismail; 2016. p. 1–36. <https://doi.org/10.5772/61372>.
- [44] Harish VSKV, Kumar A. Reduced order modeling and parameter identification of a building energy system model through an optimization routine. *Appl Energy* 2016; 162:1010–23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.137>.
- [45] Ogando A, Cid N, Fernández M. Energy modelling and automated calibrations of ancient building simulations: a case study of a school in the northwest of Spain. *Energies* 2017;10:807. <https://doi.org/10.3390/en10060807>.
- [46] Bagliivo C, Congedo P, Di Cataldo M, Coluccia L, D'Agostino D. Envelope design optimization by thermal modelling of a building in a warm climate. *Energies* 2017; 10:1808–42. <https://doi.org/10.3390/en10111808>.
- [47] González-Mahecha R, Lucena A, Szklo A, Ferreira P, Vaz A. Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in zero/nearly zero energy buildings. *Energy Build* 2018;172:505–16. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.027>.
- [48] Bozkaya B, Li R, Zeiler W. A dynamic building and aquifer co-simulation method for thermal imbalance investigation. *Appl Therm Eng* 2018;144:681–94. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.095>.
- [49] Palme M, Salvati A. UWG-TRNSYS simulation coupling for urban building energy modelling. Cambridge: 4th Building Simulation and Optimization Conference; 2018. p. 635–41.
- [50] Iturriaga E, Aldasoro U, Terés-Zubiaga J, Campos-Celador A. Optimal renovation of buildings towards the nearly Zero Energy Building standard. *Energy* 2018;160: 1101–14. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.023>.
- [51] Yoon S, Yu Y. Strategies for virtual in-situ sensor calibration in building energy systems. *Energy Build* 2018;172:22–34. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.043>.
- [52] Sha H, Xu P, Yang Z, Chen Y, Tang J. Overview of computational intelligence for building energy system design. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;108:76–90. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.018>.
- [53] Du Y, Huang Q, Zhang A, Zhang Q, Jing H. Prediction, comparison and analysis of comfort level and energy consumption of a passively remodeled dwelling based on BP neural network computation. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019;329. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/329/1/012006>.
- [54] Escandón R, Ascione F, Bianco N, Mauro GM, Suárez R, Sendra JJ. Thermal comfort prediction in a building category: artificial neural network generation from calibrated models for a social housing stock in southern Europe. *Appl Therm Eng* 2019;150:492–505. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.013>.
- [55] Ciulla G, D'Amico A. Building energy performance forecasting: a multiple linear regression approach. *Appl Energy* 2019;253:113500. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113500>.
- [56] Hussain SA, Yuen RKK, Lee EWM. Energy modeling with nonlinear-autoregressive exogenous neural network. E3S Web of Conferences 2019;111: Bucharest. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911103059>.
- [57] Mehboob KB. Development of energy saving technique for setback time using artificial neural network. *Aust J Mech Eng* 2019;1–15. <https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1605685>.
- [58] Nasruddin Sholahudin, Satrio P, Mahlia TMI, Giannetti N, Saito K. Optimization of HVAC system energy consumption in a building using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *Sustain Eng Technol Assess* 2019;35:48–57. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.06.002>.
- [59] Dragoña J, Arroyo J, Figueroa IC, Blum D, Arendt K, Kim D, Ollé EP, Oravec J, Wetter M, Vrabie DL, Helsén L. All you need to know about model predictive control for buildings. *Annu Rev Contr* 2020;50:190–232. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.09.001>.

- [60] García CE, Prett DM, Morari M. Model predictive control: theory and practice—a survey. *Automatica* 1989;25:335–48. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(89\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(89)90002-2).
- [61] Cho SH, Zaheer-uddin M. Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems. *Energy Convers Manag* 2003;44:1333–42. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00116-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00116-4).
- [62] Oldewurtel F, Parisio A, Jones C, Morari M, Gyalistras D, Gwerder M, Stauch V, Lehmann B, Wirth K. Energy efficient building climate control using stochastic model predictive control and weather predictions. *American Control Conference* 2010:5100–5.
- [63] Oldewurtel F, Parisio A, Jones C, Gyalistras D, Gwerder M, Stauch V, Lehmann B, Morari M. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy Build* 2011;45:15–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.022>.
- [64] Široký J, Oldewurtel F, Cigler J, Prívára S. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Appl Energy* 2011;88:3079–87. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.009>.
- [65] Cigler J, Gyalistras D, Široký J, Tiet V-N, Ferkla L. Beyond theory: the challenge of implementing Model Predictive Control in buildings. *Prague: 11th REHVA World Congress (CLIMA 2013)*; 2013.
- [66] Fabietti L. Control of HVAC systems via explicit and implicit MPC: an experimental case study. Master's degree project of the KTH electrical engineering - No. XE-EE-RT 2014:006. 2014.
- [67] Xiwang L, Wen J. Review of building energy modeling for control and operation. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;37:517–37. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.056>.
- [68] De Coninck R, Magnusson F, Akesson J, Helsen L. Toolbox for development and validation of grey-box building models for forecasting and control. *J Build Perform Simu* 2015;9:3. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1046933>.
- [69] De Coninck R, Helsen L. Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels. *Energy Build* 2016;111:290–8. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.014>.
- [70] Hu Q, Oldewurtel F, Balandat M, Vrettos E, Zhou D, Tomlin CJ. Building model identification during regular operation – empirical results and challenges. *Boston: IEEE American Control Conference*; 2016.
- [71] Ascione F, Bianco N, De Stasio C, Mauro GM, Vanoli GP. Simulation-based model predictive control by the multi-objective optimization of building energy performance and thermal comfort. *Energy Build* 2015;111:131–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.033>.
- [72] Sturzenegger D, Gyalistras D, Morari M, Smith RS. Model predictive climate control of a Swiss office building: implementation, results, and cost-benefit analysis. *Contr Syst Technology* 2015;24:1. <https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2415411>.
- [73] Vaccarini M, Giretti A, Tolve LC, Casals M. Model predictive energy control of ventilation for underground stations. *Energy Build* 2016;116:326–40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.020>.
- [74] Reena M, Mathew AT, Jacob L. Energy efficient wireless networked building automation system controlled by real occupancy. *Macau: TENCON 2015 - IEEE Region 10 Conference*; 2015.
- [75] Oldewurtel F, Sturzenegger D, Morari M. Importance of occupancy information for building climate control. *Appl Energy* 2012;101:521–32. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.014>.
- [76] Collotta M, Messineo A, Nicolosi G, Pau G. A dynamic fuzzy controller to meet thermal comfort by using neural network forecasted parameters as the input. *Energies* 2014;7:4727–56. <https://doi.org/10.3390/en7084727>.
- [77] Marvuglia A, Messineo A, Nicolosi G. Coupling a neural network temperature predictor and a fuzzy logic controller to perform thermal comfort regulation in an office building. *Build Environ* 2014;72:287–99. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.020>.
- [78] Dragomir OE, Dragomir F, Stefan V, Minca E. Adaptive neuro-fuzzy inference systems as a strategy for predicting and controlling the energy produced from renewable sources. *Energies* 2015;8:13047–61. <https://doi.org/10.3390/en8112355>.
- [79] Ghadi YY, Rasul MG, Khan MMK. Design and development of advanced fuzzy logic controllers in smart buildings for institutional buildings in subtropical Queensland. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54:738–44. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.105>.
- [80] Hawila AW, Merabtine A, Troussier N, Mokraoui S, Kheiri A, Laaouatni A. Dynamic model validation of the radiant floor heating system based on the object oriented approach. *Marrakech: 4th International Renewable and Sustainable Energy Conference*; 2016.
- [81] Tsai H-L. Design and evaluation of a photovoltaic /thermal-assisted heat pump water heating system. *Energies* 2014;7:3319–38. <https://doi.org/10.3390/en7053319>.
- [82] Ruelens F, Iacovella S, Claessens BJ, Belmans R. Learning agent for a heat-pump thermostat with a set-back strategy using model-free reinforcement learning. *Energies* 2015;8:8300–18. <https://doi.org/10.3390/en8088300>.

## Anexo E:

### Artículo de investigación de la tesis en publicación científica JCR: SREP

Publicación: *Scientific Report*

Editorial: *SPRINGER NATURE* Categoría: JCR - Q1

## scientific reports



OPEN

# Energy and thermal modelling of an office building to develop an artificial neural networks model

Jose María Santos-Herrero<sup>1</sup>, Jose Manuel Lopez-Guede<sup>2</sup>, Ivan Flores Abascal<sup>3</sup> & Ekaitz Zulueta<sup>2</sup>

Nowadays everyone should be aware of the importance of reducing CO<sub>2</sub> emissions which produce the greenhouse effect. In the field of construction, several options are proposed to reach nearly-Zero Energy Building (nZEB) standards. Obviously, before undertaking a modification in any part of a building focused on improving the energy performance, it is generally better to carry out simulations to evaluate its effectiveness. Using Artificial Neural Networks (ANNs) allows a digital twin of the building to be obtained for specific characteristics without using very expensive software. This can simulate the effect of a single or combined intervention on a particular floor or an event on the remaining floors. In this paper, an example has been developed based on ANN. The results show a reasonable correlation between the real data of the Operative Temperature with the Energy Consumption and their estimates obtained through an ANN model, trained using an hourly basis, on each of the floors of an office building. This model confirms it is possible to obtain simulations in existing public buildings with an acceptable degree of precision and without laborious modelling, which would make it easier to achieve the nZEB target, especially in existing public office buildings.

#### Abbreviations

ANN	Artificial neural networks
ASHRAE	American society of heating, ventilating, and air conditioning engineers
BAS	Building automation systems
BEPs	Building energy performance simulation
EPBD	Energy performance of buildings directive
FEMP	Federal energy management program
HP	Heat pump
HVAC	Heating, ventilation and air conditioning
IPMVP	International performance measurement and verification protocol
MBE	Mean bias error
MPC	Model predictive control
MSE	Mean squared error
nZEBs	Nearly-zero energy buildings
PCM	Phase change materials
PVs	Photovoltaic systems
RES	Renewable energy source
RMSE	Root mean square error
TDNN	Time delayed neural networks
TMY	Typical meteorological year
WSN	Wireless sensor network

In the European construction sector, the nearly-Zero Energy Buildings (nZEB) regulation has been issued in the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) 2010/31/EU<sup>1</sup> for all new buildings after 31 December 2020.

<sup>1</sup>Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, University of the Basque Country (UPV/EHU), Plaza Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain. <sup>2</sup>Systems and Automatic Control Department, University Faculty of Engineering of Vitoria, University of the Basque Country (UPV/EHU), c/Nieves Cano 12, 01006 Vitoria-Gasteiz, Spain. <sup>3</sup>Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, University of the Basque Country (UPV/EHU)/ENEDI Research Group, Plaza Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain. <sup>✉</sup>email: jmsantos005@ikazte.ehu.es



OPEN

## Energy and thermal modelling of an office building to develop an artificial neural networks model

Jose Maria Santos-Herrero<sup>1✉</sup>, Jose Manuel Lopez-Guede<sup>2</sup>, Ivan Flores Abascal<sup>3</sup> & Ekaitz Zulueta<sup>2</sup>

Nowadays everyone should be aware of the importance of reducing CO<sub>2</sub> emissions which produce the greenhouse effect. In the field of construction, several options are proposed to reach nearly-Zero Energy Building (nZEB) standards. Obviously, before undertaking a modification in any part of a building focused on improving the energy performance, it is generally better to carry out simulations to evaluate its effectiveness. Using Artificial Neural Networks (ANNs) allows a digital twin of the building to be obtained for specific characteristics without using very expensive software. This can simulate the effect of a single or combined intervention on a particular floor or an event on the remaining floors. In this paper, an example has been developed based on ANN. The results show a reasonable correlation between the real data of the Operative Temperature with the Energy Consumption and their estimates obtained through an ANN model, trained using an hourly basis, on each of the floors of an office building. This model confirms it is possible to obtain simulations in existing public buildings with an acceptable degree of precision and without laborious modelling, which would make it easier to achieve the nZEB target, especially in existing public office buildings.

### Abbreviations

ANN	Artificial neural networks
ASHRAE	American society of heating, ventilating, and air conditioning engineers
BAS	Building automation systems
BEPS	Building energy performance simulation
EPBD	Energy performance of buildings directive
FEMP	Federal energy management program
HP	Heat pump
HVAC	Heating, ventilation and air conditioning
IPMVP	International performance measurement and verification protocol
MBE	Mean bias error
MPC	Model predictive control
MSE	Mean squared error
nZEBs	Nearly-zero energy buildings
PCM	Phase change materials
PVs	Photovoltaic systems
RES	Renewable energy source
RMSE	Root mean square error
TDNN	Time delayed neural networks
TMY	Typical meteorological year
WSN	Wireless sensor network

In the European construction sector, the nearly-Zero Energy Buildings (nZEB) regulation has been issued in the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) 2010/31/EU<sup>1</sup> for all new buildings after 31 December 2020.

<sup>1</sup>Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, University of the Basque Country (UPV/EHU), Plaza Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain. <sup>2</sup>Systems and Automatic Control Department, University Faculty of Engineering of Vitoria, University of the Basque Country (UPV/EHU), c/Nieves Cano 12, 01006 Vitoria-Gasteiz, Spain. <sup>3</sup>Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering in Bilbao, University of the Basque Country (UPV/EHU)/ENEDI Research Group, Plaza Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain. ✉email: jmsantos005@ikasle.ehu.es

However, the large number of existing buildings that still do not comply with these standards, as well as their slow renovation process, as indicated in the research developed by D'Agostino et al.<sup>2</sup> and Ruparathna et al.<sup>3</sup>, make it necessary to propose alternatives in order to be able to achieve these CO<sub>2</sub> emission reduction targets through other solutions. In the case of existing buildings, the most common renovation strategies are usually focused on envelope improvement (for instance, window replacement as suggested by Aste et al.<sup>4</sup>, envelope insulation improvement as indicated by Terés-Zubiaga et al.<sup>5</sup> and even the development of new materials as proposed by Chung et al.<sup>6</sup>). Other strategies are based on the renovation of Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems; either by improving existing equipment as proposed by Che et al.<sup>7</sup> and Dascalaki et al.<sup>8</sup>, or by integrating systems based on renewable energy sources as developed by Caskey et al.<sup>9</sup> and Dipasquale et al.<sup>10</sup>.

In order to explore other alternatives, the use of work philosophies applied to the industrial field has been considered, where the search for the optimization of their processes has continued for years in order to achieve maximum efficiency, as suggested by Drgoña et al.<sup>11</sup>. To fulfil this target, the Building Energy Performance Simulation (BEPS) tools are an interesting option and they could be of great help in finding solutions that allow energy consumption to be optimized with a relatively low economic investment. Nevertheless, these developments require a great effort, given the enormous amount of data that is collected in the field; namely environmental conditions (temperatures and humidity) and energy consumption. Furthermore, it is usual to carry out a calibration process to debug the information for the simulation data, so as to have a correlation to the real information captured in the building with the minimum possible margin of error. In addition, considering that the users of the building can also cause disturbances, as indicated by Oldewurtel et al.<sup>12</sup>; these tasks are laborious and require specific knowledge, a great amount of time, and an economic cost through licenses for computer programs and equipment, which could be an important handicap.

Therefore, in this research, we have proposed to simplify and reduce the economic cost of the process. In order to do this, we have developed an algorithm based on Artificial Neural Networks (ANN) that allows us to obtain the Operative Temperatures and Energy Consumption of the different areas of an office building, in our case the Rectorate building of the University of the Basque Country located in northern Spain.

This paper explains the research developed, dividing it into 5 sections: Sect. 1 explains the motivations and gives a global vision of the study, as well as a short review of the different current BEPS tools which allow energy modelling and simulations of any type of building. Section 2 sets out the background of the methodology applied and gives a brief review of the research that justifies this work. Section 3 provides a case study of how the synthetic data used has been generated through modelling versus the real data from 2016 to 2019; the developed ANN algorithm is also presented. In Sect. 4, the results are justified by considering that the margins of error achieved are acceptable. Finally, the conclusions are summarized in Sect. 5.

**Literature review.** Current BEPS tools allow energy modelling and simulations of any type of building. Several investigations have been carried out successfully in recent years applying this type of BEPS software. Among the various BEPS tools are: *DesignBuilder*, *IDA-ICE*, *EnergyPlus*, *CPLEX*, *TRNSYS*, *DOE-2* or *ESP-r*, which allow the given energy consumption to be minimized and the most appropriate strategies respecting the established comfort requirements to be identified.

In this sub-Section, various investigations<sup>13–29</sup> are indicated that justify this. For example, Murano et al.<sup>13</sup> applied *DesignBuilder* to explain the imbalance between heating and cooling in the different climatic zones of Italy in different types of buildings; while Cornaro et al.<sup>14,15</sup> characterized several commercial elements: a Phase Change Materials (PCM) panel, which was validated with a PCM computerized tool using *IDA-ICE* as well as a benchmarking of potential energy savings analysis among four types of “Photovoltaic Semi-Transparent Materials” with respect to conventional double panel glass. In addition, the *IDA-ICE* tool was used by Kurnitski et al.<sup>16</sup> to estimate nZEB energy efficiency levels in compliance with “Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations” requirements, along with its optimal cost. Other papers have developed their research applying *EnergyPlus*; for instance Loukaidou et al.<sup>17</sup> carried out experiments with several test-cell buildings for cost-optimal analysis according to the characteristics of the building envelope; Kang<sup>18</sup> performed some research to optimize the economic sustainability of the “Life Cycle Cost” with the aim of applying energy saving methods from the early phases in the design of a building; Becchio et al.<sup>19</sup> presented a roadmap to establish net zero energy balance measures with high energy efficient technical systems to optimize the insulation of the envelope, which was tested on a single family house nZEB in Northern Italy; Barthelmes et al.<sup>20</sup> explained an example of a newly built single-family house applying a cost-optimal methodology from a preliminary design phase of the project; Adhikari et al.<sup>21</sup> proved that a zero energy building can have a viable investment cost, especially if Photovoltaic (PV) facilities are used. Furthermore, the *CPLEX* tool was also used in the case of González et al.<sup>22</sup>, who assessed an optimization model to evaluate on-site RES composed by mini-wind turbines, solar PVs and a battery storage which was tested in a real building in Portugal to minimize its annual energy costs.

However, one of the BEPS tools most applied, with the best results and an acceptable accuracy, has been *TRNSYS*. Aste et al.<sup>23</sup> reviewed the energy-efficiency of an integrated multifunctional system to provide the HVAC demands using RES consisting of PVs, aerothermal energy and Heat Pumps (HP) on residential dwellings; Bozkaya et al.<sup>24</sup> explored a dynamic co-simulation method with three different insulation parameters to look into the influence of the thermal imbalance of aquifer thermal energy storage systems and building thermal load; Ogando et al.<sup>25</sup> developed a real case of the application of energy modelling and deterministic calibrations in an elementary school in Galicia (Northwest Spain); Baglivo et al.<sup>26</sup> modelled several design options and different configurations of a construction prototype situated in a warm weather climate to compare its thermal behaviour and optimize the design of its envelope; Peán et al.<sup>27</sup> analysed the impact on a demand-side energy management control strategy by simulating a refurbished dwelling nZEB; Palme et al.<sup>28</sup> presented a new simulation methodology considering the effects of the urban microclimate through a climate model, the “Urban Weather

Generator”; while Iturriaga et al.<sup>29</sup> carried out a simulation work with a “Mixed-Integer Linear Programming” model, which was implemented in an existing building in the Basque Country (Northern Spain), where energy saving actions were adopted to optimize the power requirement in the retrofitting of existing buildings in order to reach the nZEB standard.

## Methodology

**Background of the methodology.** The “*Kaizen*” philosophy is the most widespread in advanced companies in the industrial sector. In this philosophy, continuous improvement is a fundamental pillar, in which the origin of possible inefficiencies must be analysed under the “*Muda*” concept: “*The 7 big wastes*”. Each of these typical wastes in the industrial field have a correlation in building climatization, if it is to be considered as an industrial process:

- **Defects** ... any building climatization has energy losses. It is very important to take care with the building’s degree of infiltration, avoiding losses for bad insulation of the piping net or other devices. A previous analysis and design phase can largely prevent certain types of defect or minimize the risk that they may happen.
- **Transport** ... obviously, if the energy is produced at a great distance from its point of consumption, losses will occur during its transport. It would be very interesting, whenever possible, to generate the energy at its point of consumption through the use of solar with water accumulators and / or photovoltaic panels on the roof.
- **Time** ... this concept can be interpreted in building climatization as taking into consideration the thermal inertia of the building itself and the importance of knowing in advance how much energy is required at any time.
- **Overproduction** ... it would be interesting to avoid hot water immobilized for hours waiting for its demand. Applying the “*Just In Time*” concept in the building climatization would lead to the production of hot water only and exclusively when it is required.
- **Inventory** ... the self-stored energy as the thermal inertia of the building itself, which can have a positive or negative contribution, depending on how it is managed.
- **Movements** ... wasting energy without a clear target does not make sense either. That is why it is important to have a roadmap established where what we want to do at all times is planned, depending on the external conditions as well as the existing needs at any given time.
- **Processes** ... depending on the way a production and air conditioning process is defined, it will be more or less efficient. It would be very interesting to establish an equation or algorithm that takes into account all the wastes that can be generated in the building climatization so as to minimize them as much as possible.

For this purpose, it has been proposed to apply modelling and simulation tools focusing on the last 5 wastes indicated, given that they will facilitate the tasks of:

- Previously knowing the amount of energy required at each moment,
- Planning energy needs at all times based on external conditions and comfort requirements,
- Reaching an algorithm that allows all the data needed to minimize the energy consumption to be managed.

**Justification on this research.** Considering the various works of research carried out, some of which are mentioned in the subsection “1.2. Literature review”, the modelling and simulation process of a building is a laborious process that requires costly technical and human resources. Moreover, this process usually requires a calibration with real measurements to make a final adjustment to the simulation. In this situation, where it is necessary to collect field data, recording real information to adjust the model and make its simulation closer to reality, it has led us to propose the development of a new working hypothesis. The said hypothesis is to design an ANN model based on real measurements, defined as inputs, that represent the main factors which have an impact on the air conditioning system of a building; and also to validate its response with the outputs that have been considered: the Operative Temperatures and the Energy Consumption. All these data were taken on an hourly basis, for each of the floors of a public office building.

This approach through an ANN model could significantly reduce the necessary resources, since it would not be necessary to develop an entire modelling process with the time involved in collecting drawings, documentation and information on the building envelope. Neither would a full simulation process be required, with its subsequent calibration, because the database of real measurements is used as the basis for developing the ANN model. Therefore, if reliable estimates of the Operative Temperature and Energy Consumption of a public building could be made through an ANN model, this would open up the possibility of reducing the modelling and simulation process of any building. This is our working hypothesis, starting from real data captured in the building itself, without modelling and the subsequent calibration process, aiming to emulate the energy and thermal behaviour of the building under study with reasonable accuracy.

Nowadays, the accuracy of the BEPS tools and their calibration processes are checked with the criteria set out by such different global organizations as the Federal Energy Management Program (FEMP), with its Measurement and Verification guidelines (M&V)<sup>30</sup>, the International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP)<sup>31</sup>, or the Guideline 14 of the American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)<sup>32</sup>. All of them apply some standardized statistical indices, the Mean Bias Error (MBE) (%) or the Coefficient of Variation of Root Mean Square Error CV(RMSE) (%), where the Root Mean Square Error (RMSE) is applied to assess the performance of a calibration or the simulation model. For instance, by



applying an hourly basis, ASHRAE and FEMP set the maximum percentage diversion at  $\pm 10\%$ , while IPMVP sets it at  $\pm 5\%$ . This can establish whether a calibration can be considered as acceptable. However, it cannot be guaranteed that the input data applied in the BEPS are in line with reality. In our research, the work carried out by Martin-Escudero et al.<sup>33</sup>, on a part of the same building as in our study, has been taken as the calibration reference. There, the West block was monitored to check its energy behaviour by simulating it for a year with the *EnergyPlus* simulation tool. In that research, the result of the calibration assessment (obtained in one winter week with an hourly basis) for the heating energy consumption was  $MBE = -3.70\%$ .

Accordingly, with the current Machine Learning models, it is possible to carry out predictive analytics on any type of data, especially in its application to Sustainable Energy Systems, as extensively explained by Donti et al.<sup>34</sup> using algorithms that imitate human cognitive functions through ANN because they stand out in the analysis and optimization processes. Therefore, there is a great potential in using these tools to optimize the methodology applied in the modelling and simulation of the thermal behaviour, as well as the energy consumption of a building, as indicated by Santos-Herrero et al.<sup>35</sup> in its overview of MPC in building climatization.

In addition, for the reasons given at the end of the subsection "1.2. Literature review", the *TRNSYS* software has been used, as it is considered a sufficiently validated tool. This transient systems simulation program was developed by the University of Wisconsin (USA) in 2010. It has been improved with different updates, making it a BEPS tool that allows the characteristics of the envelope, the conditions of use and the thermal behaviour of any building to be simulated. For our research, the *TRNSYS* version 17<sup>36</sup> has been used to generate the synthetic data, which have allowed us to generate a modelling and simulation of an existing public office building. The format generated through the *TRNSYS17*, containing 8,760 tuples (1 line for each hour of a year) with the inputs and outputs applied in the modelling, as well as its corresponding simulation, has been respected. The proposal was to develop an experimental configuration to build an ANN model. Finally, the possible results can be compared against a reference value to substantiate the new applied methodology.

## Case study

**Modelling process and simulation.** The first step carried out was the generation of synthetic data that allowed us to create the input database for our ANN model. These inputs were:

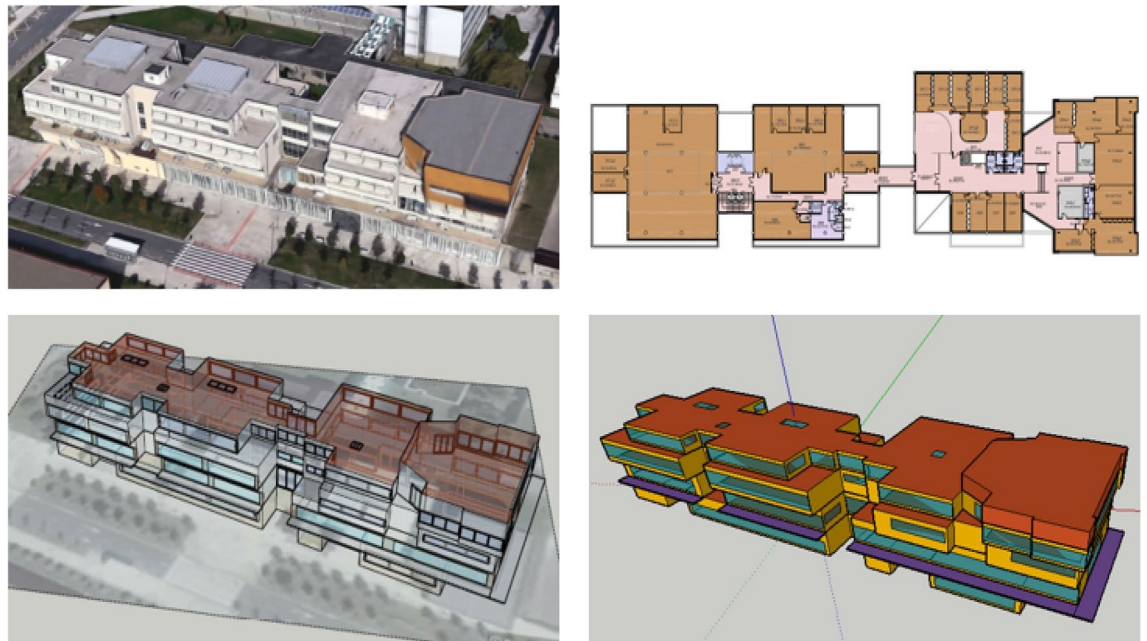
- External atmospheric conditions (dry temperature) with 8,760 tuples each year,
- Schedules for heating or cooling and ventilation with its percentage of use,
- Timetables and number of users inside the building,
- Other internal gains such as the percentage of use of lights and the number of computers running,
- The comfort conditions required in each time slot, and
- The main characteristics of the envelope, as well as the grade of infiltration of the building.

To obtain a model, the first task is to gather the maximum technical information about the building envelope to be analysed and its conditions of use, paying special attention to the possible existing internal gains, as well as its HVAC system. The basic information required to perform a correct modelling involves knowing the exact location of the building, aside from having its construction plans, to be able to define orientations and, above all, define the areas of analysis that are considered appropriate. Next, starting from the construction reports and the drawings, it is important to define the construction materials used, with their main characteristics. Once the information on the physical part of the building has been collected, it is also necessary to know the technical details of its implemented HVAC system with its operating range and limitations. The next step is to know the conditions of use of the building in question, ranging from the number of occupants in the different time slots to the characteristics of the possible equipment that can affect its internal gains, such as the type and quantity of lighting equipment, number of computers or other electronic equipment commonly used inside the building.

For our research, we have taken the Rectorate building of the University of the Basque Country, which is an office building located in the town of Leioa (Vizcaya), in Northern Spain. This building has undergone a re-construction process focused on optimizing its energy consumption. Its data collection was therefore very exhaustive, taking in the years between 2016 and 2019. It had several sensors on each floor, which made it possible to have a redundant system to guarantee that the required data concerning the internal environmental conditions and its energy consumption throughout the entire building was captured. Once all the possible information on the building had been collected, it was necessary to define the most appropriate strategy for its modelling, considering how its subsequent simulation would be developed, taking into account the objectives to be achieved and the accuracy required. Firstly, the TMY data available in the *TRNSYS17* was compared, to check if they are within of the range of the real data of the 4 years indicated. They could thus be applied, in a first phase, to define and train a first ANN model with a unique simulation based on the standard TMY. It could then be used as a reference to replicate this simulation with an ANN model. Based on all this, simplifications were considered as was the definition of more or less wide areas, according to the real measurements that were available, etc. All this would allow us to have a modelling and simulation as close as possible to reality within the existing limitations.

In our work, a three-dimensional model of the building under study was created using *Sketchup* software. This program has enough drawing tools to generate the required geometry of the building, with the later use of a plugin that transfers it to *TRNSYS17*. In this way, and thanks to the interaction between both software programmes, incorporating a toolbar interface in *Sketchup*, it has been possible to define the thermal zones considered, as well as windows or shadow areas. A sequence of the steps of the modelling process of the building under study is shown in Fig. 1.

After creating the geometry of the building and defining its thermal zones, windows and shadow areas with *Sketchup* and the plugin for *TRNSYS17*, an ASCII file with an IDF extension was created containing the input



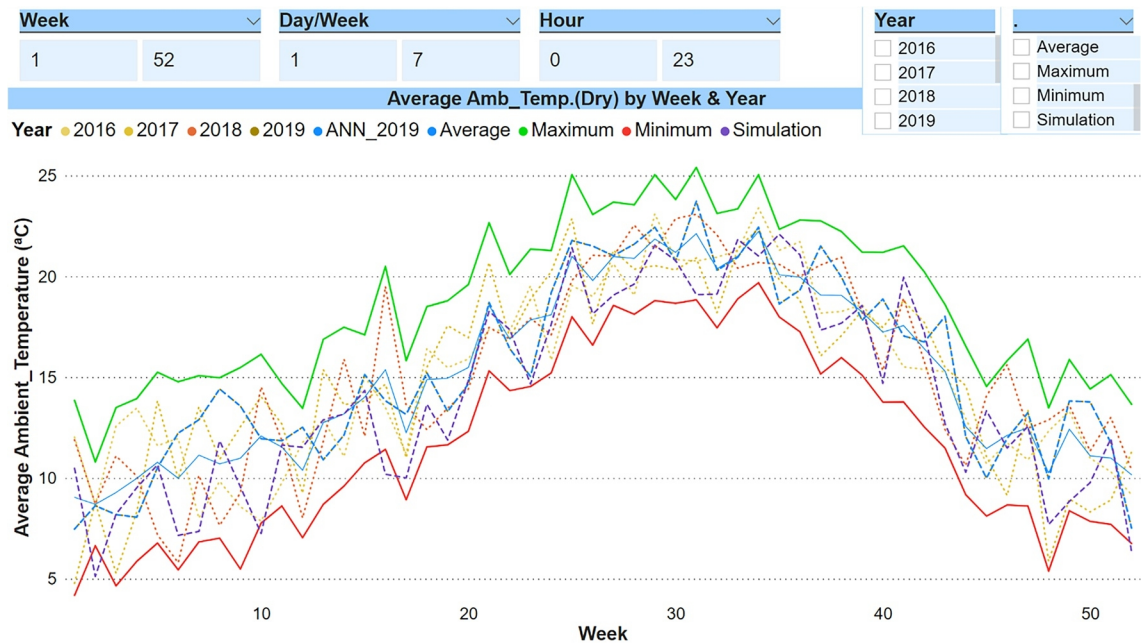
**Figure 1.** Modelling process of the University of the Basque Country Rectorate building. Photo taken by *Google Earth* and drawings developed with *SketchUp Make 2017*.

	Number of sensors	Maximum occupancy	Quantity computers	Envelope elements	Type of material	U value (W/m <sup>2</sup> K)	Thickness (m)
<b>Ground Floor</b>							
	3	40	15	Soil floor	Sand+Concrete	2.081	0.6
				Ext wall	Face Brick	2.975	0.2
				Ext roof	Slab with XPS	0.445	0.3
				Glazing Surface	Alu without TB	1.060	4/16/4
<b>First Floor</b>							
	3	40	48	Ground_floor	Slab with XPS	0.440	0.3
				Ext wall	Face Brick	2.975	0.2
				Ext_roof	Slab with XPS	0.445	0.3
				Glazing Surface	Alu without TB	1.060	4/16/4
<b>Second Floor</b>							
	4	25	31	Ground_floor	Slab with XPS	0.440	0.3
				Ext wall	Face Brick	2.975	0.2
				Ext_roof	Slab with XPS	0.445	0.3
				Glazing Surface	Alu without TB	1.060	4/16/4
<b>Third Floor</b>							
	3	50	56	Ground_floor	Slab with XPS	0.440	0.3
				Ext wall	Face Brick	2.975	0.2
				Ext_roof1	Slab without XPS	2.223	0.3
				Glazing Surface	Alu without TB	1.060	4/16/4

**Table 1.** Relevant information and envelope’s characterization of the building.

data that describes the building. With this modelled building geometry, the *3D-Building Wizard* of *TRNSYS17* was used to characterize its envelope, defining its walls, floors, ceilings and windows. All this is defined in the *TRNBuild*, together with all the factors that influence the thermal behaviour of a building: Enclosure, Infiltration, Heating, Refrigeration, Ventilation, Internal gains, Comfort conditions and Hours of use. Table 1 summarizes this characterization of the building under study:

In our study, the building has been characterized defining 4 thermal zones, each of which corresponds to a floor of the building. The Simulation Study over a full year (8,760 h), obtaining data every hour through *TRNSYS17* by applying an hourly basis, was developed later. The results obtained were archived in a CSV format for further processing.



**Figure 2.** Graphs of the ambient temperatures (Dry): simulation data VS real data.

**Analysis of the data obtained.** The synthetic data obtained through *TRNSYS17* and the data from real measurements taken in 2016, 2017, 2018 and 2019 in each of the thermal zones with the same CSV format have all been crosschecked. This comparison has allowed us to verify the accuracy and validity of our model. To develop this work of analysis and comparison of the data, a *Business Intelligence* application (an Extract, Transform and Load tool): *Microsoft Power BI Desktop* was used that allowed us to collect and join information from different sources: databases, spreadsheets, web services, etc., to get a data layout to make its analysis and presentation easier. This information and all the data series is shown in the link: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODBkNGNIM2ItNzNkNC00NTA0LTgwMDQyYzYzhjZDY3ZDcwIiwidCI6ImYzM2Y0ODE2LTc0OTMtNDZmYi05ZjY4LWY0NDJmNzU0ZmNhNyIsImMiOjI9>.

In our case study, with 8,760 tuples for each year, the most decisive data of a building's energy systems have firstly been analysed to control the factors that could cause a significant influence, as indicated in the paper developed by Santos et al.<sup>35</sup>; while data that could cause errors have also been refined.

**Site and weather conditions.** The location of the building under study determines the climatic conditions to which it is subjected, and also allows us to have a history of the data with a greater or lesser degree of precision, depending on the distance at which a meteorological station is located. In addition, it is important to clarify that the meteorological data available by default from a database of a BEPS tool are averages from several years, the so called "Typical Meteorological Year" (TMY). In our case, the data applied by default in the *TRNSYS17* application correspond to Bilbao airport (at a distance of approximately 8 km). In our case, we had the atmospheric conditions captured on-site from the building itself. Figure 2 graphically shows the outside temperature (°C) with a comparison of the data applied in the simulation versus the real data for the years from 2016 to 2019. It should be noted that, although at the annual level it might seem that there are no major differences when entering into monthly detail and above all at the hourly level, the differences between data are substantial, which means that accurate comparisons cannot be made between days of the different years; so the data must be grouped, for instance in weeks.

Considering the minimum and maximum of the real data from 2016 to 2019, it can be observed how the TMY data used in the simulation with *TRNSYS17* are within this range. However, all ambient temperature data have strong fluctuations that could lead to significant discrepancies. As the ambient temperature is a critical factor, it is very interesting to know the weather forecast, because it allows the management of the HVAC system to be anticipated in order to fulfil the comfort requirements, while also optimizing the energy consumption of the building.

**Occupancy and operational requirements.** As indicated in the Introduction section, the users of the building themselves cause important disturbances; the number of people, the computer equipment or the lights that are operating in the building have a strong influence because they generate thermal gains that affect the system. In addition, some occupants can change the comfort requirements or modify the internal environmental conditions of a thermal zone, for instance, by leaving a window open, because it changes completely the thermal behaviour of the system. Figure 3 graphically shows the operative temperature (°C) inside each defined thermal zone. As indicated in the previous section, a monthly analysis groups the information excessively and does not allow a good comparison to be established. For this reason, the information has been displayed on a weekly basis, which has also been organized to make the same week coincide in all the series in order to establish a fairer comparison between the data.

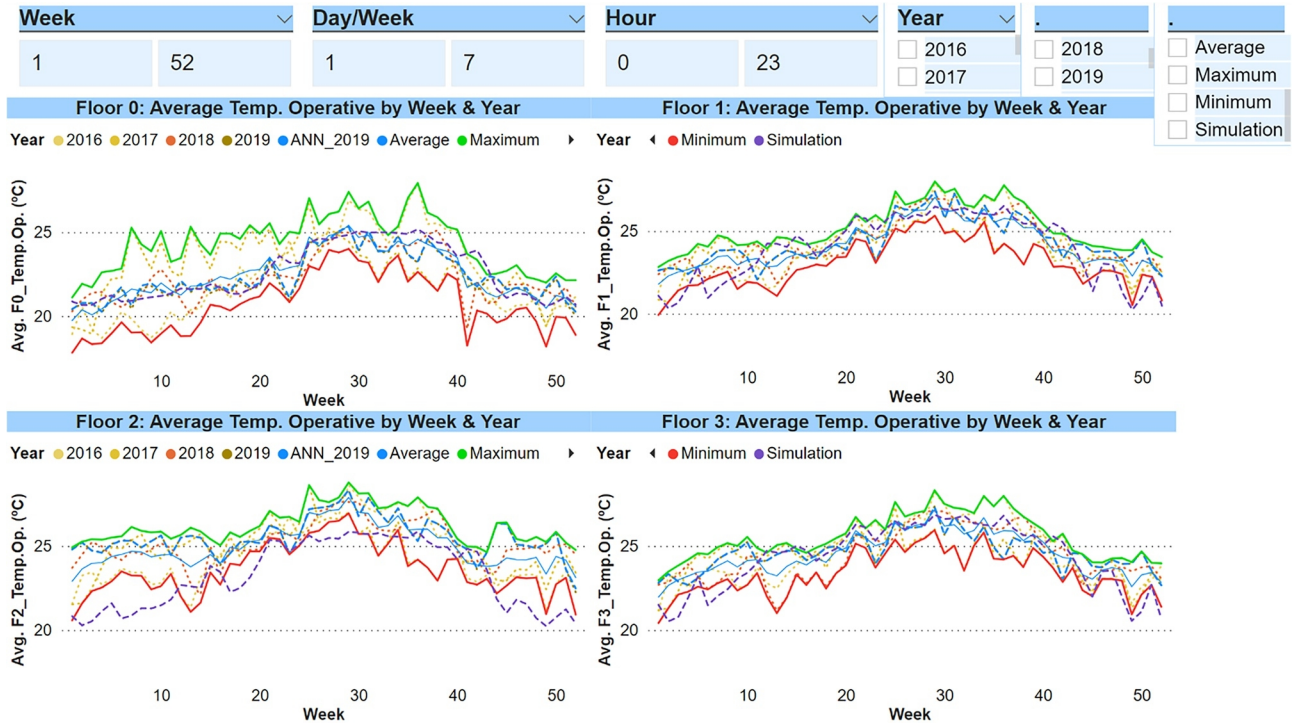


Figure 3. Graphs of operative temperature: simulation data VS real data.

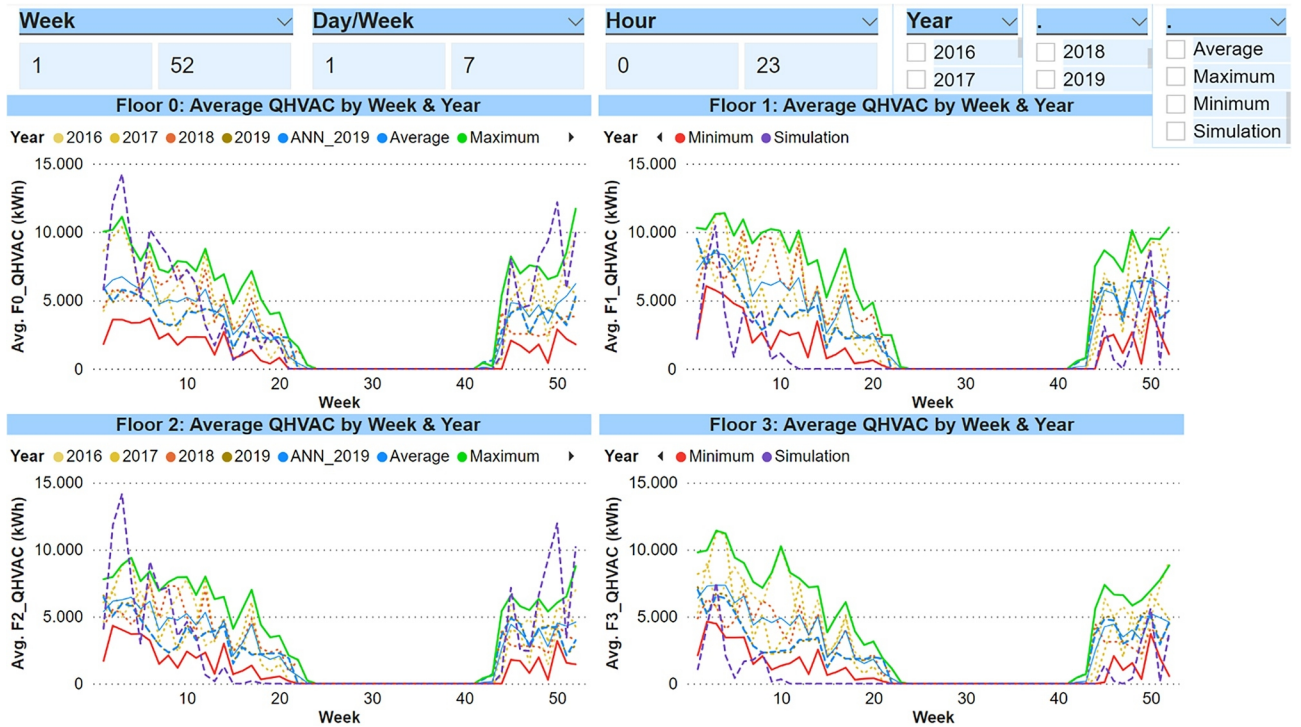


Figure 4. Graphs of energy consumption: simulation data VS real data.

*Building envelope.* It is not always possible to know all the information about a building envelope. Sometimes, for instance in a reconstruction of an old building, part of the information of the materials used is not available or they have simply suffered a degradation of their characteristics. In many research works, models and simulations are carried out first. After that, a calibration process is done, based on real data measured in the field. These real measurements allow adjustments to be made in the different parameters of the model so as to reach an acceptable margin of error and to consider the subsequent correct simulations. Figure 4 graphically shows the

	Qty. nodes in the hidden layer	Qty. Input delays	Qty. feedback delays	Computational Time (s)
<b>Operative Temperature</b>				
Ground Floor	2	1	11	8.09
First Floor	8	13	11	12.74
Second Floor	8	5	13	13.51
Third Floor	6	3	13	10.02
<b>Energy Consumption</b>				
Ground Floor	4	13	13	32.07
First Floor	10	7	11	17.54
Second Floor	2	7	13	10.16
Third Floor	8	9	13	22.66

**Table 2.** Definition of the ANN structure and Computational Time.

energy consumption (kWh) per floor of the simulation versus the real data. This information has been displayed weekly, for the same reasons as those explained above.

**Experimental setup to generate an ANN model.** In this subsection, the process of building the artificial network based models is described. After the data gathering process described previously, they were arranged in three different subsets, in other words, the training, validation and test subsets. More specifically, the 8,760 tuples of the year 2017 were used for training the ANN, the 8,760 tuples of 2018 for validating the ANN in order to prevent overfitting, and finally, the 8,760 tuples of 2019 were taken to test the learning and the generalization capability of the trained model.

There are a number of types of ANN architectures. Among them, given the characteristics of the behaviour of the complex system to be learnt, the authors chose a specific type of ANN named Time Delayed Neural Networks (TDNN), whose characteristics are detailed by Rios et al.<sup>37</sup> and Alanis et al.<sup>38</sup>. This type of ANNs is typically taken as networks with memory, in the sense that they can retain the dynamics of the system to be modelled. This characteristic is particularly appropriate for dealing with this problem, given the high importance of the thermal inertia underlying it. In order to acquire this feature, the TDNN networks have extra inputs in their input layer: the delayed inputs and the feedback inputs. The first are delayed versions of the input signals, while the second are the delayed versions of the signals generated by the TDNN. They are flexible in the sense that the designer can determine the number of delays of each one of these subsets of inputs.

Once the structure of the ANN has been chosen, the inputs and the outputs are determined. The outputs are the Operative Temperature and the Energy Consumption (QHVC) that are real valued magnitudes. Regarding the inputs, the authors chose the Ambient Temperature (Dry), the occupation in persons (in function of the %Schedule by the maximum expected occupancy, as indicated in Table 1), the occupation in powered computers as it is an administrative building (in function of the % schedule by the quantity of computers, as indicated in Table 1) and the level of lights (ranged from 0 to 100% in function of the %Schedule). The %Schedule is related to the hours of use: the building only has activity during weekdays from 7:00 a.m. to 9:00 p.m., its peak activity being between 8:00 a.m. and 11:00 a.m. with 100%, varying by up to 10% in the last hour from 8:00 p.m. to 9:00 p.m.. Furthermore, the setpoint or reference for the temperature is considered as an input (with only two values: 0% meaning that the HVAC system is off and 100% when HVAC is on). As stated before, delayed versions of these signals (both inputs and outputs) are considered at the input layer of the ANNs.

For each of the two magnitudes to be predicted, different ANNs were obtained for each of the floors of the building. In order to determine the specific structure of each ANN, heuristics were used (some techniques for finding a maybe non-optimal solution, but an acceptable one in a very short time compared with a full search in the solutions space), the following being the main ones for both the Operative Temperature and the QHVC models, as indicated in Table 2:

- Different specific ANNs were used for both Operative Temperature and Energy Consumption.
- Different specific ANNs were used for each one of the 4 different floors.
- ANNs of one hidden layer were used.
- The evaluated number of hidden nodes was not consecutive.
- There was a balance between the number of input delays and the feedback delays.
- The evaluated number of delays, for both input and feedback, was not consecutive.

All the ANNs were trained using the Levenberg–Marquardt algorithm, with the Mean Squared Error "MSE" value as the metric of the achieved learning.

Finally, the time needed to train the best model for each floor is shown in the last column of Table 2, for both the Operative Temperature and the Energy Consumption. They were obtained using *Mathworks Matlab R2021b* software, and the specific characteristics of the computer used are the following: 2 *Intel Xeon* processors with a

total of 28 cores, 96 GB of RAM memory and HDD type SSD, running *Microsoft Windows 10*. Having fixed the structure of the models, it is possible to retrain them again when new real data are gathered without a significant increment in the training time.

## Results

The results of the predictions made by the obtained ANN model, have been considered acceptable for establishing an effective prediction of the Operative Temperature and Energy Consumption based on the RMSE, the Mean Squared Error (MSE) and the Standard Deviation Error from each of the defined thermal zones for the Operative Temperatures and total Energy Consumption, as well as with hourly calibration criteria of the FEMP<sup>30</sup> ( $MBE \leq \pm 10\%$ ), the IPMVP<sup>31</sup> ( $MBE \leq \pm 5\%$  /  $R^2 > 0,75$ ), or the ASHRAE Guideline 14<sup>32</sup> ( $MBE \leq \pm 10\%$  /  $R^2 > 0,75$ ). These criteria have been analysed by Fernández et al.<sup>39</sup>, with the aim of standardizing the calibration process of modelling a building and by Ramos et al.<sup>40</sup> to clarify the typical errors that can occur in such modelling. Furthermore, the value of the calibration is very promising because the MBE values on all floors are below -3.70%, which was the reference value based on research carried out in the West block of the same building in the study<sup>33</sup>, as shown in Table 3:

Despite the variations that may occur in real climatic conditions, the data obtained through the ANN model are very promising. The synthetic data obtained have a very high correlation in all the comparisons made with the benchmarking carried out against the real data available. Figure 5a shows the evolution of the Real Data VS Estimated Data by the ANN of the total energy consumption (QHVAC) in kWh for the year 2019. Figure 5b shows the energy consumption in each of the defined thermal zones, i.e., each floor in this research. Even better results have been obtained in the ANN model of Operative Temperatures (°C), as shown in Fig. 5c.

The main implication of this paper is that the working hypothesis has been validated through an ANN model, where reliable estimates of the Operative Temperature and Energy Consumption of each of the floors of the public office building can be made. This approach opens up the possibility of reducing the modelling and simulation process of any building. Therefore, starting from only the real data captured from a building itself, without a modelling process and subsequent calibration; the energetic and thermal behaviour of a building can be emulated, since the ANN model itself can be used to check whether it has an acceptable correlation with the reality of the building.

## Conclusions and future challenges

This research has shown a reasonable correlation between real data for the Operative Temperature and Energy Consumption in 4 thermal zones, defined in each of the floors of a public office building, and the estimates obtained through an ANN model trained with the Levenberg–Marquardt algorithm. This research confirms that, by developing a model based on ANN, it is possible to obtain an estimate of the Operative Temperature and Energy Consumption required to air-condition each of the floors of an office building, with an acceptable degree of precision. That is, based on the results obtained, it has been concluded that it is feasible to apply an ANN model to simplify the entire modelling and simulation process described in a public office building. It should be highlighted that, in this research, the process has been simplified to demonstrate a work methodology and we have thus considered each floor of the building as a thermal zone, but this methodology is scalable. In other words, by expanding the data collection level to monitor different thermal zones, with a guarantee and the consequent increase in computational effort, it is feasible to divide a building into as many thermal zones as are considered of interest.

With this approach it is possible to simplify and reduce the cost of the building's modelling / simulation process while optimizing its energy consumption based on forecasts of atmospheric temperatures, as well as the use of the building itself. As explained in the previous sections, the building's modelling and simulation process is a laborious process that requires expensive technical and human resources. By developing an ANN-based model, a prediction of the Operative Temperature and Energy Consumption can be obtained with an acceptable accuracy, as can be seen by contrasting them with actual measurements from 4 consecutive years. This study shows a reasonable correlation between the real data of the Operative Temperature and Energy Consumption in the 4 thermal zones defined in each of the floors of the office building and those obtained through an algorithm generated by ANN based on the synthetic data obtained from TRNSYS. This implies that, with this methodology, the process of modelling and simulation of a building can be reduced, as it can be based on the real data captured from the building itself, while the calibration process can be simplified to validate the information on the thermal behaviour of any given building. This ANN model can be used to test whether it has an acceptable correlation with the reality of the building. In fact, we would not need to use TRNSYS, or any other modelling software, which means not having to invest time in collecting information about the building under study; and nor do we have to draw or model the building or pay for the license of a modelling program, since we can avoid all this by using the ANN to do the modelling from real data.

As future challenges, with the use of this same ANN model, a Model Predictive Control (MPC) philosophy could be applied. Based on the atmospheric forecasts that are available and using Building Automation Systems (BAS) technology, it should be possible to manage the HVAC system to optimize energy consumption based on the occupancy history and comfort requirement settings. It is even possible to improve the BAS by applying a Wireless Sensor Network (WSN) that allows occupation data and atmospheric conditions inside the building to be known in real time. The opinion of the users could also be considered, for instance, through "Smiley surveys" that the algorithm could take into account in order to make small adjustments to the environmental conditions inside of the building. In short, we consider that the ANN model developed, where all the factors that influence the thermal behaviour of a building have been modelled, as well as having the forecasts of atmospheric conditions of external temperature, allows the energy consumption of the building under control to be optimized. If

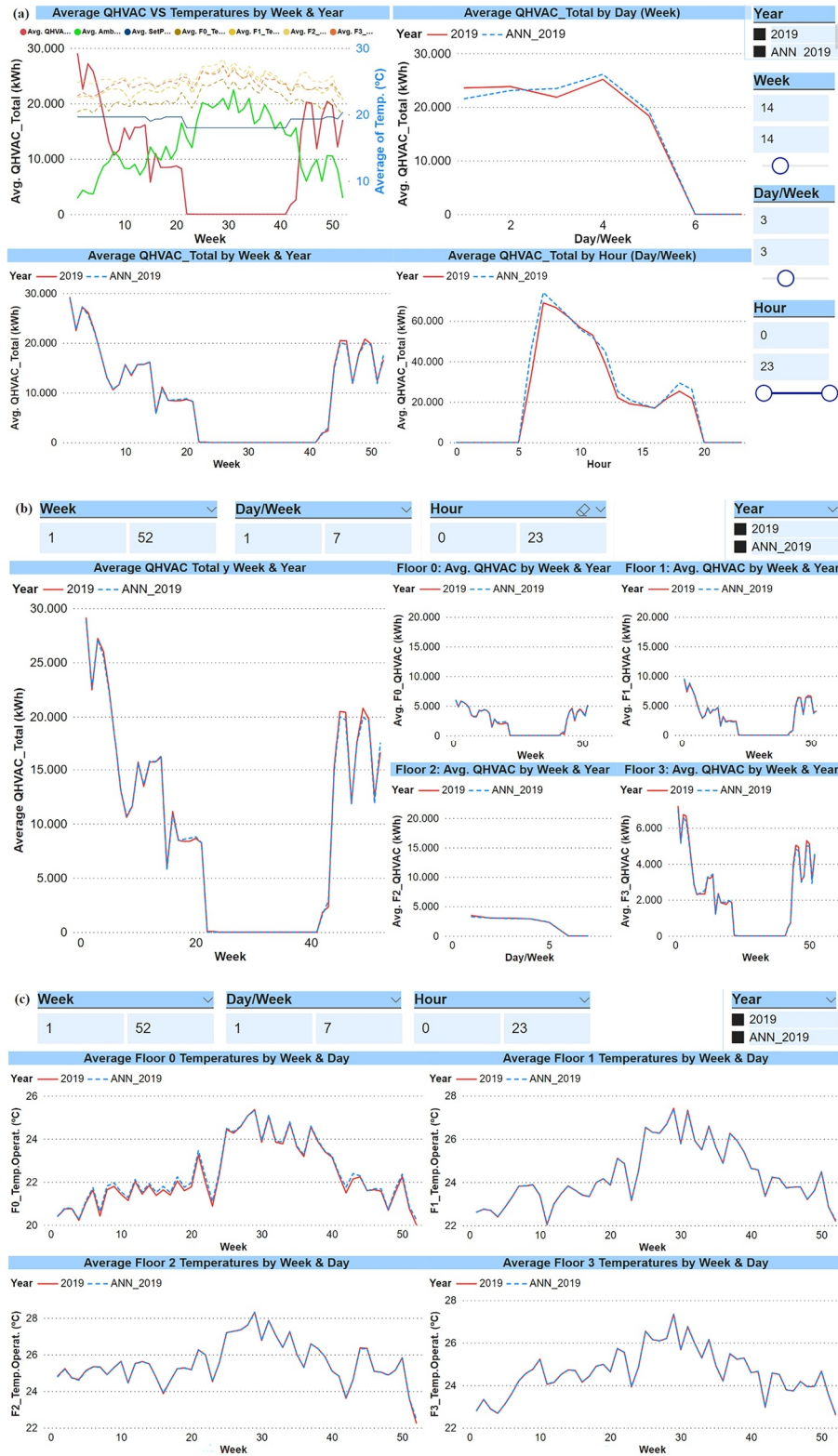
Year: 2019	Calibration Hourly criteria	Accuracy Results:	Value Weekly Average:	% min.	% mean	% max.
<b>Operative Temperature</b>						
<b>Ground Floor:</b>				(20.25 °C)	(22.41 °C)	(25.32 °C)
MBE (%) $\leq \pm 5\%$	-0.45%	RMSE (test)	0.12609 °C	0.62%	0.56%	0.50%
<b>Model recommendation</b>		MSE (test)	0.01590 °C <sup>2</sup>			
R <sup>2</sup> (> 0.75)	0.97	Std. dev. error	0.01021			
<b>First Floor:</b>				(22.07 °C)	(24.33 °C)	(27.38 °C)
MBE (%) $\leq \pm 5\%$	-0.01%	RMSE (test)	0.01991 °C	0.09%	0.08%	0.07%
<b>Model recommendation</b>		MSE (test)	0.00040 °C <sup>2</sup>			
R <sup>2</sup> (> 0.75)	0.99	Std. dev. error	0.00275			
<b>Second Floor:</b>				(22.48 °C)	(25.56 °C)	(28.32 °C)
MBE (%) $\leq \pm 5\%$	0.02%	RMSE (test)	0.03635 °C	0.16%	0.14%	0.13%
<b>Model recommendation</b>		MSE (test)	0.00132 °C <sup>2</sup>			
R <sup>2</sup> (> 0.75)	0.99	Std. dev. error	0.00509			
<b>Third Floor:</b>				(22.67 °C)	(24.65 °C)	(27.32 °C)
MBE (%) $\leq \pm 5\%$	-0.01%	RMSE (test)	0.01272 °C	0.06%	0.05%	0.05%
<b>Model recommendation</b>		MSE (test)	0.00016 °C <sup>2</sup>			
R <sup>2</sup> (> 0.75)	0.99	Std. dev. error	0.00174			
<b>Energy Consumption</b>						
<b>Ground Floor:</b>				(0 kWh)	(2,194 kWh)	(5,951 kWh)
MBE (%) $\leq \pm 5\%$	-1.23%	RMSE (test)	120.26261 kWh	-	5.48%	2.02%
<b>Model recommendation</b>		MSE (test)	14,463.10 kWh <sup>2</sup>			
R <sup>2</sup> (> 0.75)	0.82	Std. dev. error	16.38734			
<b>First Floor:</b>				(0 kWh)	(2,722 kWh)	(9,498 kWh)
MBE (%) $\leq \pm 5\%$	1.07%	RMSE (test)	117.42150 kWh	-	4.31%	1.24%
<b>Model recommendation</b>		MSE (test)	13,787.81 kWh <sup>2</sup>			
R <sup>2</sup> (> 0.75)	0.94	Std. dev. error	15.92995			
<b>Second Floor:</b>				(0 kWh)	(2,092 kWh)	(6,443 kWh)
MBE (%) $\leq \pm 5\%$	1.55%	RMSE (test)	91.10844 kWh	-	4.35%	1.41%
<b>Model recommendation</b>		MSE (test)	8,300.75 kWh <sup>2</sup>			
R <sup>2</sup> (> 0.75)	0.93	Std. dev. error	12.16969			
<b>Third Floor:</b>				(0 kWh)	(2,075 kWh)	(6,993 kWh)
MBE (%) $\leq \pm 5\%$	1.66%	RMSE (test)	118.34496 kWh	-	5.70%	1.69%
<b>Model recommendation</b>		MSE (test)	14,005.53 kWh <sup>2</sup>			
R <sup>2</sup> (> 0.75)	0.91	Std. Dev. Error	15.98215			

**Table 3.** Calibration and accuracy results of the obtained ANN based model.

the algorithm is also provided with the internal environmental conditions and the grade of occupation of the building through a WSN, this ANN-based model would have all the information necessary to optimize its HVAC system, that is, an MPC would be applied. Obviously, if the HVAC system is made up of RES facilities, reaching the nZEB standards would be totally feasible.

There is, however, one small but important detail in the case of public buildings, where there may be significant fluctuations in their grade of occupancy, and that is to include such elements as HP. These devices, with a high energy efficiency, allow us to react to these sudden variations, which can be detected by the WSN and, after the corresponding processing of the information captured in the algorithm, manage its operation. This would ensure that all the building's comfort requirements are met without penalizing its excess energy consumption.

Finally, and continuing with the application of advances achieved in the industrial sector, the strategies of the "Industry 4.0" should be applied in the near future to building climatization so that all their systems can be integrated and synchronized in real time. "Industry 4.0" considers a network model where the different processes are interconnected, instead of the traditional pyramidal model of industrial automation. This allows the creation of more flexible systems through such connections between processes and the consequent continuous exchange of their data. "Cloud Computing" and "Big Data" are fundamental for optimizing this model, together with the "Internet of things", which allows data to be captured and transmitted in real time through the Internet. It also allows all the generated information to be processed and analysed through "Cyber-Physical Systems" made up of the appropriate hardware and algorithms. This analysis process is based on converting an immense amount of data into useful information, which allows the appropriate decisions to be taken at all times. This is what the industrial sector calls "Business Intelligence" and it could obviously be applied in building climatization to optimize the energy consumption, as well as its consequent reduction of CO<sub>2</sub>.



**Figure 5.** Year 2019: Comparative of Real Data VS Estimated Data by ANN. (a) Total Energy Consumption, (b) Energy Consumption per floor, (c) Operative Temperatures per floor.



Received: 26 October 2021; Accepted: 17 May 2022  
 Published online: 27 May 2022

## References

1. European Union, *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings* Recast (Official Journal of the European Union, Brussels, Belgium, 2010).
2. D'Agostino, D. & Mazzarella, L. What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. *Build. Eng.* **21**, 200–212. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019> (2019).
3. Ruparathna, R., Hewage, K. & Sadiq, R. Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **53**, 1032–1045. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.084> (2015).
4. Aste, N., Caputo, P., Buzzetti, M. & Fattore, M. Energy efficiency in buildings: What drives the investments? The case of Lombardy Region. *Sustain Cities Soc.* **20**, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.09.003> (2016).
5. Terés-Zubiaga, J. *et al.* Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA EBC Annex 75 and a demonstration case study. *Energ. Build.* **224**, 110280. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110280> (2020).
6. Chung, M. H. & Park, J. C. Development of PCM cool roof system to control urban heat island considering temperate climatic conditions. *Energ. Build.* **116**, 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.056> (2016).
7. Che, W. W. *et al.* Energy consumption, indoor thermal comfort and air quality in a commercial office with retrofitted heat, ventilation and air conditioning (HVAC) system. *Energ. Build.* **201**, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.029> (2019).
8. Dascalaki, E. & Santamouris, M. On the potential of retrofitting scenarios for offices. *Build. Environ.* **37**, 557–567. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00002-1) (2002).
9. Caskey, S. L. & Groll, E. A. Hybrid air-hydronic HVAC performance in a residential net-zero energy retrofit. *Energ. Build.* **158**, 342–355. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.003> (2018).
10. Dipasquale, C. *et al.* Database of energy, environmental and economic indicators of renovation packages for European residential buildings. *Energ. Build.* **203**, 109427. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109427> (2019).
11. Drgoña, J. *et al.* All you need to know about model predictive control for buildings. *Annu. Rev. Control.* **50**, 190–232. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.09.001> (2020).
12. Oldewurtel, F., Sturzenegger, D. & Morari, M. Importance of occupancy information for building climate control. *Appl. Energ.* **101**, 521–532. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.014> (2012).
13. Murano, G., Ballarini, I., Dirutigliano, D., Primo, E. & Corrado, V. The significant imbalance of nZEB energy need for heating and cooling in Italian climatic zones. *Energ. Procedia* **126**, 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.150> (2017).
14. Cornaro, C., Basciano, G., Puggioni, V. A. & Pierro, M. Energy saving assessment of semi-transparent photovoltaic modules integrated into NZEB. *Buildings* **9**, 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7010009> (2017).
15. Cornaro, C., Pierro, M., Puggioni, V. A. & Roncarati, D. Outdoor characterization of phase change materials and assessment of their energy saving potential to reach NZEB. *Buildings* **55**, 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7030055> (2017).
16. Kurnitski, J. *et al.* Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation. *Energ. Build.* **43**, 3279–3288. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.033> (2011).
17. Loukaidou, K., Michopoulos, A. & Zachariadis, T. Nearly-zero energy buildings: cost-optimal analysis of building envelope characteristics. *Procedia Environ. Sci.* **38**, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.069> (2017).
18. Kang, H. J. Development of a nearly zero emission building (nZEB) life cycle cost assessment tool for fast decision making in the early design phase. *Energies* **59**, 10. <https://doi.org/10.3390/en10010059> (2017).
19. Becchio, C., Fabrizio, E., Monetti, V. & Filippi, M. Cost optimality assessment of a single family house: building and technical systems solutions for the nZEB target. *Energ. Build.* **90**, 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.050> (2015).
20. Barthelmes, V. M., Becchio, C., Bottero, M. C. & Corgnati, S. P. The influence of energy targets and economic concerns in design strategies for a residential nearly-zero energy building. *Buildings* **4**, 937–962. <https://doi.org/10.3390/buildings4040937> (2014).
21. Adhikari, R. S., Aste, N., Del Pero, C. & Manfren, M. Net Zero energy buildings: Expense or investment?. *Energ Procedia* **14**, 1331–1336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.887> (2012).
22. González-Mahecha, R., Lucena, A., Szklo, A., Ferreira, P. & Vaz, A. Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in zero/nearly zero energy buildings. *Energ. Build.* **172**, 505–516. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.027> (2018).
23. Aste, N., Adhikari, R. S., Del Pero, C. & Leonforte, F. Multi-functional integrated system for energy retrofit of existing buildings: A solution towards nZEB standards. *Energ. Procedia* **105**, 2811–2817. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.608> (2017).
24. Bozkaya, B., Li, R. & Zeiler, W. A dynamic building and aquifer co-simulation method for thermal imbalance investigation. *Appl. Therm. Eng.* **144**, 681–694. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.095> (2018).
25. Ogando, A., Cid, N. & Fernández, M. Energy modelling and automated calibrations of ancient building simulations: A case study of a school in the Northwest of Spain. *Energies* **10**, 807. <https://doi.org/10.3390/en10060807> (2017).
26. Baglivo, C., Congedo, P., Di Cataldo, M., Coluccia, L. & D'Agostino, D. Envelope design optimization by thermal modelling of a building in a warm climate. *Energies* **10**, 1808–1842. <https://doi.org/10.3390/en10111808> (2017).
27. Péan, T. Q., Ortiz, J. & Salom, J. Impact of demand-side management on thermal comfort and energy costs in a residential nZEB. *Buildings* **37**, 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7020037> (2017).
28. Palme, M. & Salvati, A. UWG-TRNSYS simulation coupling for urban building energy modelling. In *4th Building Simulation and Optimization Conference*, Cambridge 635–641 (2018).
29. Iturriaga, E., Aldasoro, U., Terés-Zubiaga, J. & Campos-Celador, A. Optimal renovation of buildings towards the nearly zero energy building standard. *Energies* **160**, 1101–1114. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.023> (2018).
30. *M&V Guidelines: Measurement and Verification for Performance-Based Contracts* (U.S. Department of Energy, Washington DC, USA, 2015); Available: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/mv\\_guide\\_4\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/mv_guide_4_0.pdf) (accessed 19 February 2022).
31. *International Performance Measurement and Verification Protocol* (Efficiency Valuation Organization, Toronto, Canada, 2012); Available: [http://www.eepperformance.org/uploads/8/6/5/0/8650231/ipmvp\\_volume\\_i\\_2012.pdf](http://www.eepperformance.org/uploads/8/6/5/0/8650231/ipmvp_volume_i_2012.pdf) (accessed on 19 February 2022).
32. *Measurement of Energy, Demand and Water Savings, ASHRAE Guideline 14–2014* (American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 2014) Available: [https://upgreengrade.ir/admin\\_panel/assets/images/books/ASHRAE%20Guideline%2014-2014.pdf](https://upgreengrade.ir/admin_panel/assets/images/books/ASHRAE%20Guideline%2014-2014.pdf) (accessed 7 May 2021).
33. Martín-Escudero, K., Atxalandabaso, G., Erkoreka, A., Uriarte, A. & Porta, M. Comparison between energy simulation and monitoring data in an office building. *Energies* **15**, 239. <https://doi.org/10.3390/en15010239> (2022).
34. Donti, P. L. & Kolter, J. Z. Machine learning for sustainable energy systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **46**, 719–747. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020220-061831> (2021).
35. Santos-Herrero, J. M., Lopez-Guede, J. M. & Flores, I. Modeling, simulation and control tools for nZEB: A state-of-the-art review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **142**, 110851. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110851> (2021).
36. *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory* (University of Wisconsin: Madison, WI, USA, 2010); Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys> (accessed on 21 March 2019).

37. Rios, J., Alanis, A., Arana-Daniel, N. & Lopez-Franco, C. Neural Networks Modeling and Control (ed. Sanchez, E.N.) Chapter 2 (Academic Press, 2020) ISBN: 9780128170793.
38. Alanis, A. & Sanchez, E. Discrete-Time Neural Observers (ed. Sanchez, E.N.) Chapter 5 (Academic Press, 2017) ISBN: 9780128105443.
39. Fernández, C. & Ramos, G. Towards a new generation of building envelope calibration. *Energies* **10**, 2102. <https://doi.org/10.3390/en10122102> (2017).
40. Ramos, G. & Fernández, C. Validation of calibrated energy models: common errors. *Energies* **10**, 1587. <https://doi.org/10.3390/en10101587> (2017).

### Acknowledgements

The authors are also grateful to A2PBEER Project, which has been financed through the “7th Framework Program of the European Union” for research, and particularly the *Acciona* company, which within the aforementioned project has been responsible for placing sensors and providing the data of monitoring through a web application. In turn, to thank the workers of the Rector’s Building of the UPV/EHU for providing all the information that has been required.

### Author contributions

All authors contributed to develop of the research, its discussing and revising the paper.

### Competing interests

The authors declare no competing interests.

### Additional information

**Supplementary Information** The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12924-9>.

**Correspondence** and requests for materials should be addressed to J.M.S.-H.

**Reprints and permissions information** is available at [www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints).

**Publisher’s note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article’s Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article’s Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2022